

T.C
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ VE HİBRİT ARAÇLAR İÇİN MOTOR
SÜRÜCÜ İNVERTÖRÜ GELİŞTİRİLMESİ

MAHMUT ERSİN ERÇİN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2020

T.C
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ VE HİBRİT ARAÇLAR
İÇİN MOTOR SÜRÜCÜ İNVERTÖRÜ
GELİŞTİRİLMESİ

MAHMUT ERSİN ERÇİN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF.DR ABDULKADİR BALIKÇI

GEBZE
2020

T.R
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF
TRACTION INVERTER FOR ELECTRIC
AND HIYBRID VEHICLES**

MAHMUT ERSİN ERÇİN
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE**
DEPARTMENT OF ELECTRONIC ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF.DR ABDULKADİR BALIKÇI

GEBZE
2020

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 05/02/2020 tarih ve 2020/08 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 04/03/2020 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Mahmut Ersin ERÇİN 'in tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Abdulkadir BALIKÇI

ÜYE : Prof. Dr. M.Hakan HOCAOĞLU

ÜYE : Doç. Dr. Uğur HASIRCI

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Bu tez çalışmasında, elektrikli ve hibrit araçlarda kullanılabilir nitelikte invertör tasarımı yapılmıştır. Gündelik hayatta kullanılan bazı içten yanmalı, hibrit ve elektrikli araçların performans verileri derlenerek tahrik sistemlerinin güç, çalışma voltajı vb. özellikleri saptanmıştır.

Yapısında invertör barındıran mevcut kullanımdaki bazı tahrik sistemleri incelenmiştir. Sonrasında bu tahrik sistemlerinde kullanılabilir tahrik motorları ve enerji depolama sistemleri hakkında temel bilgi verilmiştir. Belirlenen özellikler ışığında, tasarımı yapılacak invertörün gücü ve diğer elektriksel özellikleri belirlenmiştir. Ortaya çıkan ihtiyaçlardan yola çıkılarak, invertör içerisinde kullanılacak temel elemanların seçimi yapıp, bu elemanlar hakkında bilgi verilmiştir.

İnvertör tasarımı bölümünde ise tasarım hakkında dikkat edilmesi gereken hususlar hakkında bilgiler verilmiş ve ortaya çıkan tasarımların görselleri, örnek olması amacıyla paylaşılmıştır. Anahtarlama elemanı, IGBT modül ve soğutma sistemi hakkında bilgi verilip, seçilen modüldeki soğutma yapısı incelenmiştir. Testler başlığı altında, ortaya çıkan invertörün elektriksel testleri yapılmıştır. Sonuçlar ve öneriler başlığı altında ise tasarım hakkındaki yorumlar yapıp, gelecek çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Evirici, İnvertör, Elektrikli Araçlar, Güç Elektronikleri, Tahrik İnvertörü, Motor Sürücü.

SUMMARY

In this thesis, an inverter to be used for electric and hybrid vehicles is designed. Performance datas of internal combustion powered vehicles, hybrid and electric vehicles used in daily life are compiled. According to these datas, some properties such as the power, operating voltage, etc. of the drive systems are determined.

The propulsion systems in current use, which contain an inverter, are examined. Afterwards, basic information about the drive motors and energy storage systems that can be used in these drive systems are given. According to the determined features, the power of the inverter to be designed and other electrical properties are determined. Based on the emerging needs, the basic components to be used in the inverter are selected and general information is given.

In the inverter design section, information is given about the issues to be considered about the design and the resulting designs are shared as examples. Information about the switching element, IGBT module cooling system, cooling structure in the selected module is examined. Electrical tests of the inverter, which appeared under the title of tests, are made. Under the heading of conclusions and suggestions, comments about the design were made and information about future studies is given.

Keywords: Inverter, Electric Vehicles, Power Electronic, Traction Inverter, Driver.

TEŐEKKÖR

BaŐta, danıŐmanım Sayın Prof. Dr. Abdulkadir BALIKÇI 'ya bu tez çalıŐmasının oluŐmasında sağladığı yardımlardan dolayı teŐekkÖrlerimi sunarım. Tez çalıŐmasının oluşmasını sağlayan CADEM A.Ő.'ye, destekleriyle yanımızda olan mÖdÖrÖmÖz Fatih TERZİÖĞLU 'na, yol gÖstericiliği ile Erol ÖZKARSLI 'ya, iÇ arkadaşlarım Furkan, Ömer, Levent ve Hatice 'ye teŐekkÖrÖ borç bilirim. EĞitim hayatım boyunca ve tez sÖrecinde her daim bana destek olan ve bana karşı sabırlı olan anne ve babama, kardeŐim Mehmet'e sonsuz teŐekkÖr ederim. Tez sÖrecinde bana her daim destek olan ve sabır gÖsteren gÖzel insan, NilÖfer Hanım'a çok teŐekkÖr ederim.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| ÖZET | v |
| SUMMARY | vi |
| TEŞEKKÜR | vii |
| İÇİNDEKİLER | viii |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ | x |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | xi |
| TABLolar DİZİNİ | xiii |
| | |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Tezin Amacı | 5 |
| 1.2. Tezin Katkısı ve Geleceği | 5 |
| 1.3. Literatür Araştırması | 6 |
| 2. ARAÇ TAHRİĞİ | 7 |
| 2.1. Araç Tahriğindeki İhtiyaçlar | 7 |
| 2.2. Tahrik Sistemleri | 8 |
| 3. ELEKTRİK TAHRİĞİ SİSTEMLERİ | 10 |
| 3.1. Hibrit Tahrik Sistemi | 10 |
| 3.1.1. Paralel Hibrit Tahrik Sistemi | 10 |
| 3.1.2. Seri Hibrit Tahrik Sistemi | 11 |
| 3.1.3. Seri-Paralel Hibrit Tahrik Sistemi | 11 |
| 3.1.4. Kompleks Hibrit Tahrik Sistemi | 12 |
| 3.2. Elektrikli Tahrik Sistemi | 13 |
| 3.3. Elektrikli Araç Tahrik Sistemi Bileşenleri | 14 |
| 3.3.1. Elektrik Motoru | 14 |
| 3.3.1.1. Fırçalı Doğru Akım Motoru | 15 |
| 3.3.1.2. İndüksiyon Motoru | 15 |
| 3.3.1.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor | 16 |
| 3.3.1.4. Relüktans Motorları | 16 |
| 3.3.1.5. Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor | 17 |
| 3.3.2. İntertör | 17 |
| 3.3.2.1. İntertör Topolojisi | 19 |

| | |
|---|----|
| 3.3.2.2. Gerilim Frekans Kontrolü | 21 |
| 3.3.2.3. Doğrudan Moment Kontrolü | 21 |
| 3.3.2.4. Alan Yönlendirmeli Kontrol | 22 |
| 3.3.3. Enerji Depolama Sistemleri | 24 |
| 3.3.3.1. Volanlar | 24 |
| 3.3.3.2. Süperkapasitörler | 25 |
| 3.3.3.3. Yakıt Hücreleri | 25 |
| 3.3.3.4. Bataryalar | 26 |
| 4. İNVERTÖR TASARIMI VE UYGULAMASI | 28 |
| 4.1. İhtiyaçların Belirlenmesi | 28 |
| 4.2. İnvertörde Kullanılan Temel Elemanların Seçimi | 32 |
| 4.2.1. Güç Yarıiletkeni | 32 |
| 4.2.2. Mikrodenetleyici | 36 |
| 4.2.3. Akım Sensörü | 37 |
| 4.2.4. Motor Pozisyon Sensörü Arayüzü | 39 |
| 4.2.5. DC Bara Kapasitörü | 40 |
| 4.2.6. Dijital ve Analog Giriş Çıkışlar | 42 |
| 4.3. İnvertör Tasarımı | 44 |
| 4.3.1. Kontrol Kartı Tasarımı | 45 |
| 4.3.2. Güç Kartı Tasarımı | 48 |
| 4.4. Soğutma Sistemi | 51 |
| 5. TESTLER | 54 |
| 5.1. Kontrol Kartı Testleri | 57 |
| 5.2. Güç Kartı Testleri | 59 |
| 5.3. İnvertör Testleri | 65 |
| 6. SONUÇLAR | 73 |
| KAYNAKLAR | 74 |
| ÖZGEÇMİŞ | 76 |

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar

Açıklamalar

| | |
|------------|-------------------------------------|
| T_e | : Elektromanyetik moment |
| φ | : Manyetik akı |
| i_a | : Faz akımı |
| p | : Kutup sayısı |
| i_q | : Q eksenli akımı |
| i_d | : D eksenli akımı |
| L_q | : Q eksenli endüktansı |
| L_d | : D eksenli endüktansı |
| i_α | : α eksenli akım vektörü |
| i_β | : β eksenli akımı vektörü |
| V_α | : α eksenli gerilimi vektörü |
| V_β | : β eksenli gerilimi vektörü |
| BYS | : Batarya yönetim sistemi |
| EM | : Elektrik motoru |
| DGM | : Darbe genişlik modülasyonu |
| IGBT | : Insulated gate bipolar transistor |
| İYM | : İçten yanmalı motor |
| MSİ | : Motor sürücü invertörü |
| PCB | : Printed circuit board |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Sekil No:</u> | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 1.1: İlk elektrikli lokomotif 'Galvani'. | 1 |
| 1.2: İlk elektrikli trolleybüs "Electomote". | 2 |
| 1.3: Electobats. | 2 |
| 1.4: Londra'daki ilk elektrikli taksi. | 3 |
| 1.5: New York'taki ilk elektrikli taksi. | 3 |
| 1.6 : Ferdinand Porsche hub motorlu aracı. | 4 |
| 2.1: İçten yanmalı tahrik sistemi. | 9 |
| 3.1: Paralel hibrit tahrik sistemi. | 10 |
| 3.2: Seri hibrit tahrik sistemi. | 11 |
| 3.3: Seri-paralel hibrit tahrik sistemi. | 12 |
| 3.4: Kompleks hibrit tahrik sistemi. | 13 |
| 3.5: Elektrikli tahrik sistemi. | 14 |
| 3.6: Çeşitli motor tiplerine ait rotor ve stator yapıları. | 15 |
| 3.7: Tez konusu invertörün yapısı. | 18 |
| 3.8: Üç fazlı invertör topolojisi. | 19 |
| 3.9: Gerilim frekans kontrolü blok diyagramı. | 21 |
| 3.10: Doğrudan moment kontrolü blok diyagramı. | 22 |
| 3.11: Gerilim vektörlerinin α ve β düzleminde gösterimleri. | 23 |
| 3.12: Alan yönlendirmeli kontrolün genel blok diyagramı. | 23 |
| 3.13: Volan. | 25 |
| 4.1: Tahrik invertörlerinde kullanılan yarıiletkenlerin karşılaştırılması. | 33 |
| 4.2: Tristör gösterimi. | 33 |
| 4.3: GTO gösterimi. | 34 |
| 4.4: IGBT gösterimi. | 35 |
| 4.5: Infineon FS820R08A6PLB tam köprü IGBT modülü. | 35 |
| 4.6: Infineon FS820R08A6PLB tam köprü IGBT modülü içyapısı. | 36 |
| 4.7: TMS570 serisi mikrodenetleyici. | 36 |
| 4.8: LEM HAH3DR 800-S07/SP1 modeli akım sensörü. | 37 |
| 4.9: Motor pozisyon sensörü. | 39 |
| 4.10: Kapasitör simgesi ve eşdeğer devresi. | 41 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.11: | DC bara kapasitörü. | 42 |
| 4.12: | V0 inverter blok diyagramı. | 45 |
| 4.13: | İnvertör donanımı blok diyagramı. | 46 |
| 4.14: | V0 kontrol kartı tasarımı. | 47 |
| 4.15: | Kontrol kartı tasarımı (önden görünüşü). | 48 |
| 4.16: | Kontrol kartı tasarımı (yandan görünüşü). | 48 |
| 4.17: | Güç kartı tasarımı (önden görünüşü). | 50 |
| 4.18: | Güç kartı tasarımı (yandan görünüşü). | 51 |
| 4.19: | Dolaylı ve direkt su ile soğutma yapısı. | 52 |
| 4.20: | Dolaylı ve direkt su ile soğutma yapısı görünümü. | 53 |
| 4.21: | Elektrikli tahrik sistemi genel soğutma sistemi. | 53 |
| 5.1: | Test düzeneğinin blok diyagramı. | 55 |
| 5.2: | Test düzeneği. | 56 |
| 5.3: | Üç fazlı invertör topolojisi. | 60 |
| 5.4: | Temel IGBT anahtarlama devresi. | 61 |
| 5.5: | İnverter IGBT anahtarlama devresi. | 62 |
| 5.6: | A fazı IGBT'lerin gate şarj gerilimleri (CH1 AH, CH2 AL). | 62 |
| 5.7: | B fazı IGBT'lerin gate şarj gerilimleri (CH1 BH, CH2 BL). | 63 |
| 5.8: | C fazı IGBT'lerinin gate şarj gerilimleri (CH1 CH, CH2 CL). | 63 |
| 5.9: | -DA bara IGBT gate şarj gerilimleri. | 64 |
| 5.10: | +DA bara gate şarj gerilimleri. | 64 |
| 5.11: | 300 V DA giriş, 20 A rms faz akımı dalga şekilleri. | 65 |
| 5.12: | 300 V DA giriş, 20 A rms faz akımı dalga şekilleri (ayrı fazlar). | 66 |
| 5.13: | 300 V DA giriş, 20 A rms faz akımı dalga şekilleri (filtre kapalı). | 66 |
| 5.14: | 442 V DA giriş, 10 A rms faz akımı dalga şekilleri. | 67 |
| 5.15: | 442 V DA giriş, 15 A rms faz akımı dalga şekilleri. | 67 |
| 5.16: | 442 V DA giriş, 15 A rms faz akımı dalga şekilleri (filtre kapalı). | 68 |
| 5.17: | 442 V DA giriş, 15 A rms faz akımı dalga şekilleri (filtre kapalı). | 68 |
| 5.18: | 442 V DA giriş, 18 A rms faz akımı dalga şekilleri (filtre kapalı). | 69 |
| 5.19: | 442 V DA giriş, 20 A rms faz akımı dalga şekilleri (filtre kapalı). | 69 |
| 5.20: | 442V D A giriş, 20 A rms faz akımı dalga şekilleri (filtre kapalı). | 70 |
| 5.21: | İnvertör, motor ve sistem verimi. | 71 |
| 5.22: | Test altındaki invertör görünümleri. | 71 |
| 5.23: | İnvertör kutusu. | 72 |

TABLolar DİZİNİ

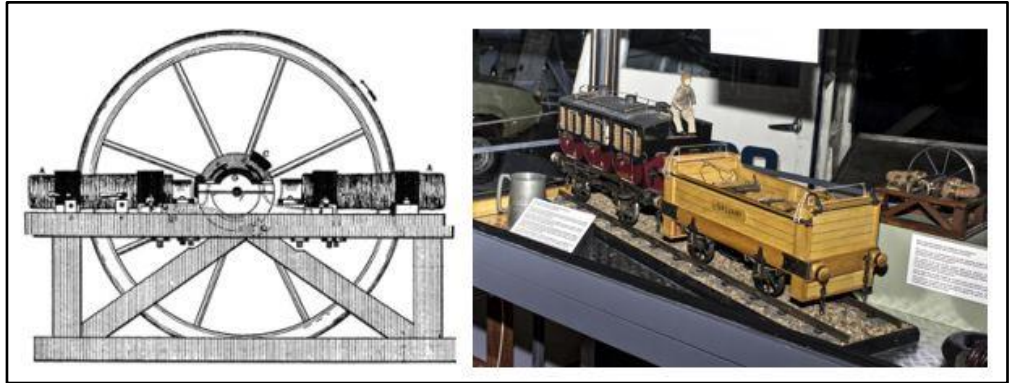
| <u>Tablo No:</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| 3.1: Anahtarlama durumlarına göre faz-faz ve faz nötr arası gerilimler. | 20 |
| 3.2: Elektrikli araç bataryalarının özellikleri. | 27 |
| 4.1: Araçların karşılaştırılması. | 28 |
| 4.2: Akım sensörü özellikleri. | 38 |
| 4.3: Enkoder özellikleri. | 40 |
| 4.4: Farklı kapasitör yapılarının performans karşılaştırılması. | 41 |
| 4.5: Kontrol kartı giriş-çıkışları izole gerilim referansları. | 43 |
| 4.6: Güç kartı izole gerilim referansları. | 43 |
| 4.7: İnvörtör özellikleri. | 44 |
| 5.1: Test düzeneği bileşenleri özellikleri. | 56 |
| 5.2: Kontrol kartı güç kaynakları testi. | 59 |

1. GİRİŞ

İnsanlığın ilk yıllarından beri bir noktadan bir noktaya güvenli ve hızlı şekilde ulaşmak, temel ihtiyaçlardan biri olmuştur. Bu ihtiyacın giderilmesi amacıyla karayolu ulaşımında ilk olarak binek hayvanlar kullanılmıştır. Daha sonra hayvanların tahrik ettiği araçlar ortaya çıkmıştır. Bu gelişim sırasında, sanayi ve teknikteki ilerlemeler neticesinde, tahrik kaynağı olarak kullanılan hayvanların yerini makineler almaya başlamıştır. Makine ile tahrik edilen ve dünyanın seyrini değiştiren en önemli ulaşım aracı ise şüphesiz demir yolu ulaşımıdır. Demiryolu ile birlikte gelen ulaşım hızı ve kapasitesi diğer ulaşım araçlarının gelişiminde katalizör etkisi yapmıştır. Bu etki sayesinde diğer ulaşım araçları hızla gelişmiştir [1].

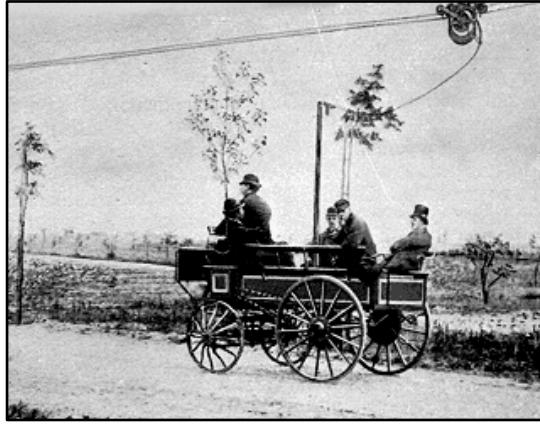
Sanayi devrimi ile birlikte tüketimin hızla artması gibi etkenler nedeniyle, 18. yüzyılın başlarında ilk otomobil örnekleri görülmeye başlamıştır. İlk üretilen araç, demiryolu araçlarında kullanılan buhar makinesi (dıştan yanmalı motor) ile tahrik edilmiştir. Daha sonraları buhar makinesinden esinlenilerek geliştirilen içten yanmalı motorlar ile otomobil endüstrisinde patlama yaşanmıştır.

19. yüzyılın ilk çeyreğinde elektrik motoru ortaya çıkmıştır. İlk elektrikli araç, 1835 yılında Prof. Stratingh tarafından Hollanda da geliştirilmiştir. Elektrik motoru ile ilk tahrik örneği ortaya konunca ulaşım sektöründe elektrikli tahrik fikri yayılmış ve örnekler çoğalmıştır. 1839 yılında Robert Davidson Şekil 1.1'de gözükten ilk elektrikli lokomotif üretmiştir [3].



Şekil 1.1: İlk elektrikli lokomotif 'Galvani'.

Şekil 1.2’de, 1882 yılında Siemens firmasının üretmiş olduğu “Elektromote” adında dünyanın ilk elektrikli trolleybüsü görülmektedir [3], [4].



Şekil 1.2: İlk elektrikli trolleybüs "Electomote".

Şekil 1.3’te 1895 yılında Morris ve Salomon iki koltuklu “Electrobats” adında araç geliştirmişlerdir [5].



Şekil 1.3: Electobats.

Gündelik hayatta elektrikli araçların kullanımına güzel örneklerden biri de 1897 yılında ‘Londra Elektrikli Taksi Şirketi’ tarafından Şekil 1.4’te verilen 15 adet elektrikli taksi kullanıma alınmıştır [23].



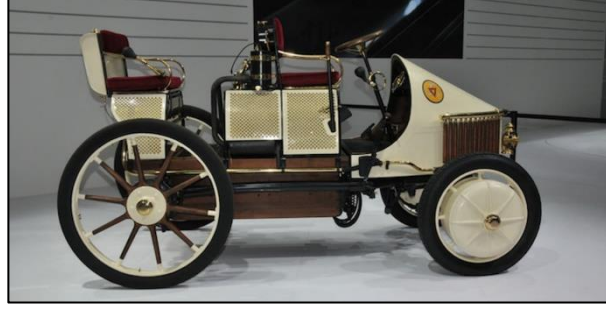
Şekil 1.4: Londra'daki ilk elektrikli taksi.

Daha sonra 1907 yılına gelindiğinde, “New York Taxi” firması da Şekil 1.5’te gözüken elektrikli araçları taksi olarak kullanmaya başlamıştır [24].



Şekil 1.5: New York'taki ilk elektrikli taksi.

1900 yılında French Electroautomobile ve 1903 yılında Krieger şirketleri, elektrikli benzinli araçları üreterek ilk kez hibrit tahrik sistemini denemişlerdir. Bu dönemlerde, günümüzde popüler olan tekerlek içine motor yerleştirilmesi ile doğrudan tahrik sisteminin ilk örneği Ferdinand Porsche tarafından tasarlanmıştır. Şekil 1.6 ‘da gözüken tasarım aynı zamanda içten yanmalı motor da içerdiği için hibrit tahrik sistemin ilk örneklerinden biridir [25].



Şekil 1.6 :Ferdinand Porsche hub motorlu aracı.

1916 yılında “Woods Motor Araç şirketi” tarafından, dört silindirli benzinli motor, doğrudan elektrik motoru/jeneratör grubuna ve şaft aracılığı ile ön tahrik aksına bağlanarak paralel hibrit sistemi geliştirilmiştir. O dönemlerdeki batarya teknolojisinin hayli yetersiz olması ve bunun sonucunda meydana gelen düşük menzil problemlerinden dolayı 1930-1960 yılları arasında elektrikli araçlara olan ilgi azalmıştır. 1935-1960 yılları arasında neredeyse hiç elektrikli araç çalışması yapılmamıştır.

İçten yanmalı motorların atık olarak ürettiği egzoz gazlarının çevreye verdiği zararın bilincinin oluşmaya başlamasıyla elektrikli araçlar tekrar gündeme gelmeye başlamıştır. 1970 yılının ortalarında ortaya çıkan petrol krizi, önde gelen birçok ülkenin gündemine elektrikli araçları tekrar almasına neden olmuştur. 1990’ dan sonra batarya teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte birçok araç firması elektrikli araçlar geliştirmeye başlamıştır.

Elektrikli araçlar, tahrik sistemiyle diğer içten yanmalı araçlardan ayrılırlar. İçten yanmalı araçlar, tahriğini, yakıtların yakılması ile ortaya çıkan enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürerek sağlarlar. Elektrikli araçlarda ise durum farklıdır.

Elektrikli araçlar da kendi aralarında tahrik sistemleri yapısına göre ayrılırlar. Elektrikli araç denilince ilk olarak akla, tahrik sistemi içerisinde elektrik motoru bulunduran araçlar gibi çağrışım yapsa da elektrikli araç tabiri, tahrik sisteminde sadece elektrik motoru bulunan araçları ifade eder. Günümüzde sıkça duyulan hibrit araçlar ise tahrik sistemi olarak içten yanmalı ve elektrik motorunun birlikte bulunduğu araçlardır.

Elektrikli araç tahrik sisteminin üç temel bileşeni bulunmaktadır. Elektrik motoru, motor sürücü invertörü ve bataryalar. Elektrik motoru, elektrik enerjisini hareket enerjisine dönüştürerek aracın hareketini sağlar. Motor sürücü invertörü,

elektrik motorunun istenilen hız ve moment değerlerinde çalışması için gereken elektrik enerjisini, elektrik motoruna en uygun şekilde ileten bileşendir. Bataryalar, aracı tahrik etmek için gereken enerjiyi depolayan birimdir.

Hibrit araç tahrik sisteminde, içten yanmalı motor, elektrik motoru ile birlikte çalışarak araç tahriği sağlanır. Elektrik motoru sürüş şartlarına göre jeneratör gibi de çalışarak araçta bulunan bataryaları şarj eder veya içten yanmalı motora araç tahriğinde destek olur. Hibrit tahrik sistemi, içten yanmalı motorun ve elektrik motorunun mekanik bağlantı şekillerine göre paralel, seri, seri-paralel ve kompleks hibrit tahrik sistemi olarak dört başlık altında incelenirler [2].

1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışması sonucunda elektrikli ve hibrit tahrik sistemi ana bileşenlerinden biri olan motor sürücü invertörü tasarımı yapılacaktır. Öncesinde konu olan araçlarda kullanılan tahrik sistemi çeşitleri hakkında genel bilgiler verilecektir. İlgili tahrik sistemi için gereksinimlerden yola çıkılarak elektrik motorları, invertör ve depolama sistemleri hakkında bilgi verilip örneklerle desteklenerek anlatılacaktır.

İnvertör kısmında motor kontrol yöntemleri hakkında özet bilgiler verilip, tasarımı yapılacak invertörün kontrol algoritması belirlenecektir. Daha sonra invertör tasarımı başlığı altında motor sürücü invertöründen beklenen özellik ve performans incelemesi yapıp tasarım kısmına geçilecektir. Tasarım başlığı altında invertörün iç işleyişi için gerekli olan devreler ve komponentler hakkında bilgi verilip PCB tasarımları yapılacaktır.

Bu tez sonucunda araç tahriği için mekanik gereksinimlerden yola çıkılarak sırasıyla motor, invertör, batarya gereksinimleri ve son bölüme doğru motor sürücü invertörü tasarımı, yukarıdaki sıralamaya benzer şekilde, motor sürücü invertöründen beklenen gereksinimlerden yola çıkılarak gerçekleştirilecektir.

1.2. Tezin Katkısı ve Geleceği

Bu tez çalışmasında araç tahriği için temel gereksinimlerden yola çıkılarak, elektrikli ve hibrit araçların tahrik sistemlerinde kullanılan temel bileşenlerin özellikleri derlenerek anlatılacaktır. Tezin konusu olan motor sürücü invertörü için gereken performans hedefleri ve özellikleri diğer tasarımcılar için örnek teşkil

edecektir. Tasarım sürecinde, yapılan literatür araştırmaları neticesinde derlenen test metotları değerlendirilip elenerek test aşamasında uygulanıp, değerlendirmeler yapılacaktır. İnvörtör alıştığım ekip tarafından tasarlanan sürekli mıknatıslı senkron motorun sürülmesinde ve testlerinde kullanılacaktır. Motor sürücü invörtörü sürüş algoritması, çeşitli güçlerdeki sürekli mıknatıslı motorları yüksek verimli sürecekle şekilde programlanabilir ve DGM için özel çıkışlara sahip olan otomotiv ve savunma projelerinde kullanılan mikroişlemci ile koşturulacaktır. Bu sayede motor sürüş algoritması geliştirmek için de uygun donanım görevi görecektir. Ortaya çıkacak invörtör, barındırdığı komponentlerin standartları değiştirilerek hedef pazarı genişletilebilecek niteliktedir.

Tez sonrası olarak laboratuvar çalışmalarından sonra invörtör hafif ticari bir araca montaj edilerek gerçek yol testleri gerçekleştirilecektir. Yol testlerinden elde edilen veriler ışığında gelecek çalışmalar belirlenecektir.

1.3. Literatür Araştırması

Piyasadaki seri üretimi yapılan bazı araçların teknik verileri incelenerek geliştirilecek motor sürücü invörtörünün özellikleri belirlenmiştir.

Edinilen bilgiler ışığında ilk olarak, araç sınıfları için gereken moment, hız ve güç değerleri derlenmiştir. Daha sonra derlenen bilgiler ışığında hedef araç sınıfları belirlenmiştir.

Binek, M1, M2, N1, N2 sınıfı araçların tahrik sistemleri incelenmiştir. Tahrik sistemlerinin araç tipine ve performansına göre gücü, 60-180 kW arası, DA alışma gerilimleri de 200 – 800V arası olarak saptanmıştır.

Elektrikli ve hibrit araçlarda, farklı tiplerde motorların kullanıldığı görölmüştür. Genel olarak sürekli mıknatıslı senkron motor, indüksiyon motoru ve nadir de olsa bilezikli senkron motor tercih edilmiştir [6].

2. ARAÇ TAHİRİĞİ

Çevremizde gördüğümüz hareket eden tüm araçlar, kendilerinden beklenen şekilde hareket etmelerini sağlayan elektromekanik sistemlere sahiptirler. Temel fizikte, belirli bir hızda hareket eden ve kütlesi olan bir cisim üzerinde, hareketinden dolayı oluşan bir enerji (kinetik enerji) den söz edilir. Ayrıca fizikte, enerjinin yoktan var edilemeyeceği, sadece bir formdan diğer bir forma dönüşmesi yasası vardır. Buradan yola çıkılarak, tahrik sistemi, enerji kaynaklarındaki enerjiyi, aracı hareket ettirecek şekilde dönüştüren mekanik veya elektromekanik unsurların tümü olarak tanımlanır.

2.1. Araç Tahriğindeki İhtiyaçlar

Araçlarda kullanılan tahrik sisteminden beklenen ilk özellik, mekanik tahrik enerjisini istenilen anda ve istenilen (moment ve hız) miktarda üretmesidir. Günümüz ihtiyaçları için bu tek maddenin dışında daha birçok madde sayılır. Bunların da en başında da verimlilik gelmektedir. Düşük verimli herhangi bir tahrik sistemi araç tahriğinde ve diğer tahrik uygulamalarında istenmez.

Verimlilik konusu, özellikle mobil araçlarda daha da kritik hale gelmektedir. Araçlar enerji kaynağı olan yakıtlarını, kendi üzerinde, sınırlı bir depolama hacminde taşıdığından ötürü, verimli bir tahrik sistemi, az yakıt ile daha uzun menzil ve çalışma süresi sunar. Ayrıca, hareketli araçlarda, toplam hareket ettirilen ağırlık da verimlilik açısından önemli bir unsurdur. Aynı miktardaki yakıt ile daha düşük ağırlığa sahip bir araç, daha uzun süre yakıt ikmaline ihtiyaç duymadan daha verimli şekilde görevini yerine getirir.

Tahrik sisteminden beklenen bir başka özellik ise, düşük hacim ve ağırlığa sahip olup, yüksek güce sahip olmasıdır. Araç tasarımında, yolcu ve eşya için olan kullanılabilir alanın toplam araç alanına olan oranın yüksek olması araçlarda istenilen bir özelliktir. Bu konuya örnek olarak; içten yanmalı motor tahrik sistemine sahip olan araçların çoğunun motoru ön tarafta bulunmaktadır. Bundan ötürü aracın ön kısmı, içten yanmalı motorun kapladığı hacim nedeniyle, herhangi bir yolcu veya bagaj alanı olarak kullanılamamaktadır. Bu örnekte tahrik sistemi aynı güçte olup, daha az yer ihtiyacı olan başka bir tahrik sistemi ile değiştirilirse, yeni sistem eskisine göre araç

üzerinde daha az yer kaplayacağından kullanılabilir alanın artması ve aracın toplam ağırlığının azalması nedeniyle verimi arttıracaktır.

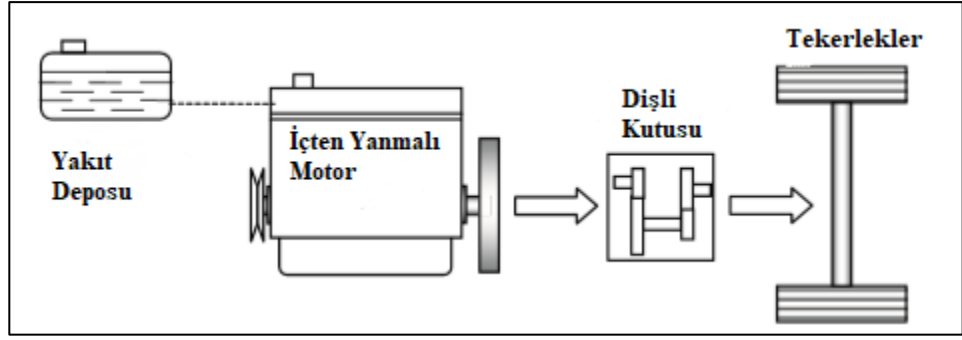
Daha az hareketli parçadan oluşan bir sistem, güvenilirlik açısından aynı işi daha fazla parça ile gerçekleştiren sisteme göre daha düşük bir arıza yapma olasılığına sahiptir. Az parçadan oluşan sistemin diğer bir avantajı ise bakım sıklığı ve ihtiyacı daha seyrek ve azdır.

Günümüz içten yanmalı motor kullanılan tahrik sisteminin verimi maksimum %15 civarına kadar çıkabilmektedir. Elektrik motoru kullanılan tahrik sisteminin verimi ise %85 seviyelerine çıkabilmektedir. Sadece verim odaklı hareket edilse bile elektrikli tahrik sistemi büyük ölçüde ön plana çıkmaktadır [7].

2.2. Tahrik Sistemleri

İçten yanmalı tahrik sistemlerinde, petrol bazlı yakıtlar, içten yanmalı motorda yakılarak, yakıt bünyesindeki enerji hareket enerjisine dönüştürülür. Bu sistemde içten yanmalı motor tarafından üretilen dönme momenti, dişli kutusunda, araç hareketi için gereken uygun hız ve moment seviyesine dönüştürülür. Daha sonra dişli kutusundan çıkan moment, akslar sayesinde tekerleklere iletilerek araç hareketi sağlanır.

İçten yanmalı tahrik sistemi, üretilen tüm araçların tamamına yakın bir kısmında uzun süredir kullanılmaktadır. Bu sistemin kullanımın olumsuz yönleri gün geçtikçe daha da çarpıcı hale gelmektedir. En önemli olumsuz yönü ise sistemden atık olarak doğaya salınan egzoz gazlarıdır. Yoğun nüfuslu şehirlerdeki birim alan başına düşen araç sayısı ve bu araçlardan salınan egzoz gazları düşünüldüğünde durumun ciddiyeti daha iyi anlaşılmaktadır. Diğer bir olumsuz yön ise, sistemin toplam veriminin ciddi manada düşük olmasıdır. İYM çalışma prensibi gereği, yakıt motor içerisinde patlatılarak yakıldığı için gürültülü şekilde çalışmaktadır. Bu gürültü her ne kadar egzoz sistemi vasıtasıyla azaltılmaya çalışılsa da tamamen yok edilmesi mümkün olamamaktadır [7].



Şekil 2.1: İçten yanmalı tahrik sistemi.

Bu tür problemlerden ötürü İYM ve elektrik motorunu bir arada barındıran hibrit tahrik sistemleri geliştirilmiştir. Hibrit tahrik sisteminin ortaya çıkmasındaki ana amaç, İYM 'nin düşük verimini elektrik motoru ile iyileştirmektir. Bu sistemde elektrik motoru ve İYM araç hareketi birlikte sağlarlar. Sistemdeki iki tür motorun araç aksına moment sağlaması şekillerine göre kendi içinde paralel, seri, seri-paralel, kompleks ve hafif hibrit tahrik sistemleri olarak gruplara ayrılırlar.

Hafif hibrit tahrik sistemi, hibrit tahrik sistemleri ile benzer yapıdadır. Aralarındaki fark ise kullanılan EM' nin amacı, içten yanmalı motorun düşük verimli çalışma bölgelerinde devreye girerek verimini arttırmak ve bazı yardımcı sistemlerin yaptığı işi yapmaktır. Bu sistemin bünyesinde barındırdığı EM düşük güçlüdür ve düşük gerilim seviyelerinde çalışır.

Elektrikli tahrik sisteminde, araç hareketi tamamen EM ile gerçekleştirilir. İYM bulunmaz ve bundan ötürü yakıt tankı gibi diğer İYM 'nin çalışması için gereken vites kutusu vb. yardımcı unsurlar yoktur. Enerji kaynağı olarak yüksek kapasiteli bataryalar mevcuttur.

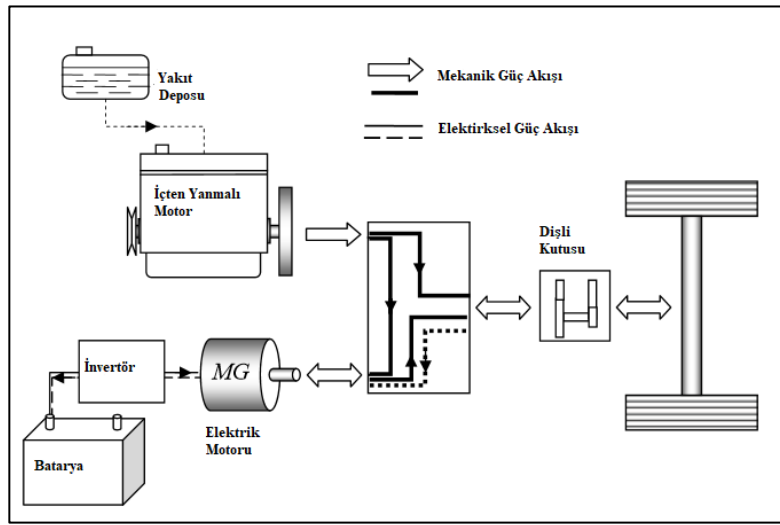
3. ELEKTRİK TAHRİĞİ SİSTEMLERİ

3.1. Hibrit Tahrik Sistemi

Hibrit tahrik sistemi, bünyesinde EM ve İYM birlikte bulunduran sistemlere verilen genel isimdir. Bu sistem, elektrik ve içten yanmalı motorun birbirine bağlantı şekline göre, kendi içinde guruplara ayrılır. Bünyesinde her iki motor tipini bulundurduğundan ötürü araç üzerinde yakıt deposuyla birlikte batarya grubu da mevcuttur.

3.1.1. Paralel Hibrit Tahrik Sistemi

Paralel hibrit tahrik sistemi, İYM ve EM 'nin araç hareketine doğrudan moment sağladığı sistem yapısını ifade eder. Her iki motorun shaftı, dişli kutusuna mekanik olarak bağlıdır. Aracı hareket ettirmek için gereken momenti birlikte sağlarlar. Bu sistem yapısında araç tahriği için gereken moment İYM ile EM 'den doğrudan sağlandığından, motorlar arasındaki moment paylaşımı harici bir kontrol ünitesi tarafından kontrol edilip en verimli şekilde aracı hareket ettirecek moment kontrolü gerçekleştirilir. Sistemdeki EM, enerji yönetimi planına göre jeneratör olarak çalışarak bataryaları şarj etme görevini de üstlenir. Bu sistemin çalışabilmesi için gereken batarya kapasitesi diğer hibrit tiplerine kıyasla daha küçüktür.



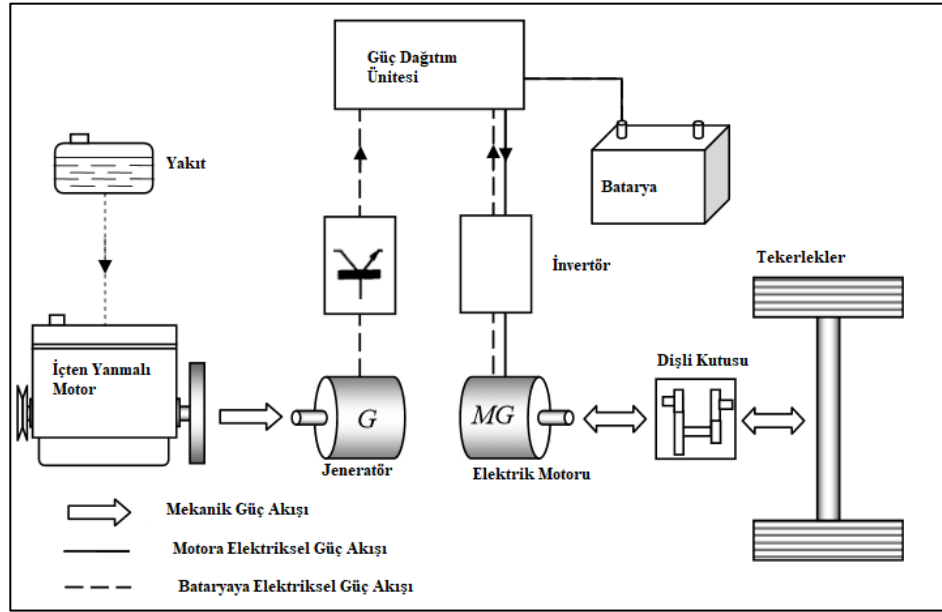
Şekil 3.1: Paralel hibrit tahrik sistemi.

3.1.2. Seri Hibrit Tahrik Sistemi

Seri hibrit tahrik sisteminde, paralel hibrit sistemine benzer şekilde İYM ile EM birlikte bulunur, fakat İYM 'nin araç hareketinde doğrudan moment katkısı yoktur. Araç tahriği için gereken momenti EM tek başına sağlar. Bundan ötürü dişli kutusuna sadece EM mekanik olarak bağlıdır.

EM 'nin çalışması için gereken enerji İYM tarafından çalıştırılan jeneratör tarafından üretilir. Üretilen enerjinin fazlası ise bataryalarda depolanır.

Araçlarda kullanılan seri hibrit sisteminin çok benzeri yıllardır demiryollarında dizel lokomotiflerde ve maden sahalarındaki devasa kaya kamyonlarında kullanılmaktadır. Bu örnek araçlarda kullanılan sistemin farklı yanı ise üretilen enerjinin bataryalarda depolanmadan direkt olarak kullanılmasıdır.

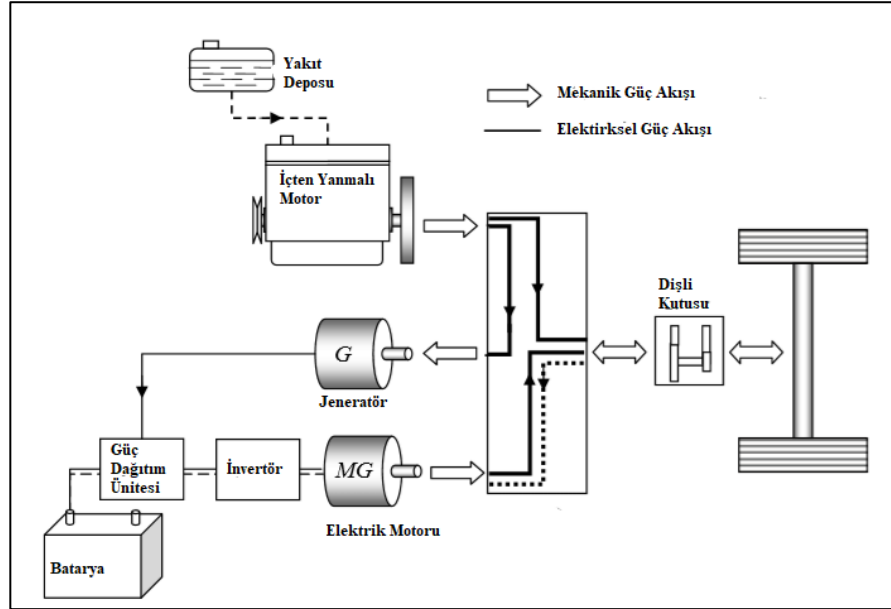


Şekil 3.2: Seri hibrit tahrik sistemi.

3.1.3. Seri-Paralel Hibrit Tahrik Sistemi

Bu hibrit tahrik sistemi, seri ve paralel tahrik sistemlerinin avantajlarını tek bir sistemde toplamak için geliştirilmiştir. EM ve İYM 'nin şaftı dişli kutusuna mekanik olarak bağlıdır ve araç tahriği için gerekli momenti birlikte sağlarlar. Fakat İYM aynı zamanda araç üzerinde bulunan jeneratörü de mekanik olarak tahrik eder. Bu sayede batarya şarjında da görev alır. Bu iki motorun birlikte çalıştırılmasıyla, diğer hibrit

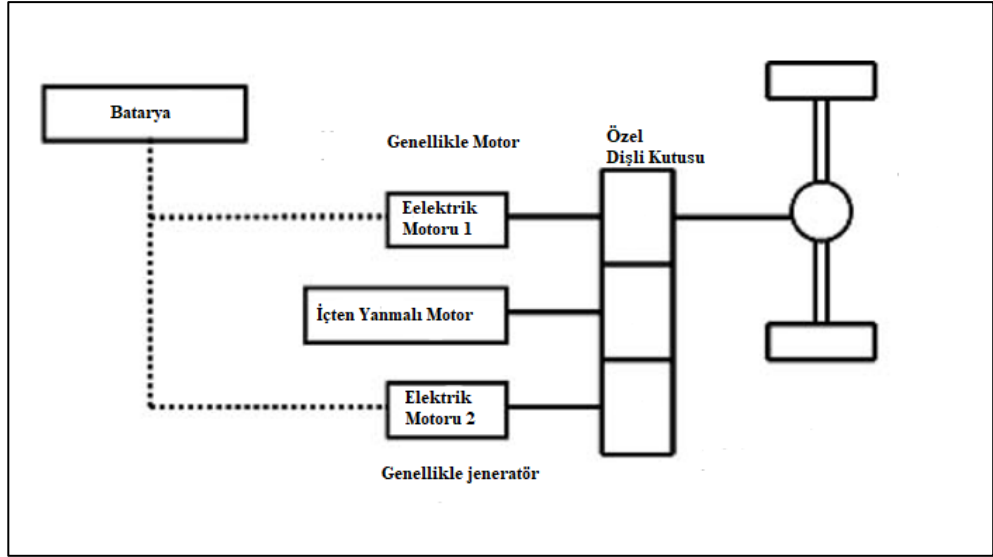
sistemlerde olduğu gibi İYM 'nin verimsiz olduğu moment ve devir aralıklarında, EM momentini üzerine alarak yakıt ekonomisi sağlar. Fakat bu sistem, çalışması için karmaşık dişli kutuları ve mekanik kavrama donanımlarına ihtiyaç duyduğundan, uygulanması nispeten zor ve maliyetlidir.



Şekil 3.3: Seri-paralel hibrit tahrik sistemi.

3.1.4. Kompleks Hibrit Tahrik Sistemi

Kompleks Hibrit tahrik sistemi, Seri-Paralel hibrit sistemine oldukça benzer bir yapıya sahiptir. Seri-Paralel yapıda, İYM mekanik olarak dişli kutusuna ve jeneratöre bağlı şekilde araç tahriği ve jeneratör için gereken enerjiyi sağlar. Kompleks yapıda ise sadece jeneratör olarak kullanılabilen bir makineyle birlikte, ihtiyaç durumunda motor ve jeneratör olarak çalışabilen bir EM bulunur. Bu ikili, paralel hibrit tahrik sistemindeki yapının aynısıdır. Araç bünyesinde bulunan, biri içten yanmalı ikisi elektrik olmak üzere üç motor, araç tahriği için gereken enerji yönetimi senaryoları arasında daha etkin geçiş imkânı sunar. Sistem genelinde incelenecek olursa, toplam sistem ve alt sistem sayısının diğer tahrik sistemlerine göre fazla olması, uygulanabilirlik ve güvenilirlik konularında diğer hibrit tahrik sistemlerine göre geride kalmasına neden olmaktadır.



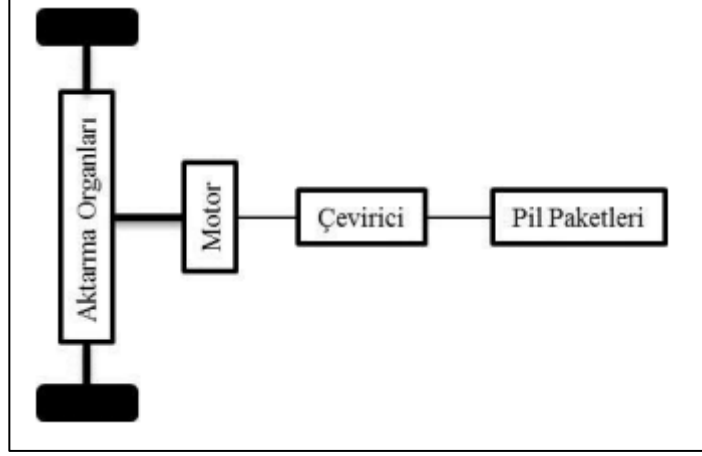
Şekil 3.4: Kompleks hibrit tahrik sistemi.

3.2. Elektrikli Tahrik Sistemi

Elektrikli tahrik sistemi denilince ilk bakışta, tahrik sisteminde kısmi veya sadece elektrikli tahrik unsuru bulunduran sistemler gelmektedir. Fakat bu isimlendirme tahrik sisteminde sadece elektrikli tahrik unsurları bulunduran sistemler için geçerlidir. Önceki bölümlerde anlatılan hibrit tahrik sistemlerinin elektrikli tahrik sistemi olarak isimlendirilmesi yanlış bir yaklaşımdır.

Bu sistemde bulunan enerji depolama ünitesi (bataryalar), araç hareketi için gereken enerjinin tek kaynağı olduğu için hibrit sistemlerdeki batarya gruplarına göre daha yüksek kapasitelidir. EM 'nin gücü, seri-hibrit tahrik sistemindeki gibi, gereken tahrik momentinin tamamını tek başına sağladığı için diğer tahrik sistemlerinden fazladır. Çevreye salınan eksoz gazları, gürültü, tasarım karmaşıklığı, düşük verim gibi olumsuzluklar düşünülecek olursa elektrikli tahrik sistemi diğer tüm tahrik sistemleri arasından sıyrılarak ön plana çıkmaktadır. Bu sistemin en büyük dezavantajı ise araçların üzerlerindeki bataryalarda depoladığı sınırlı enerji nedeniyle ortaya çıkan sınırlı menzilleridir. Günümüz batarya teknolojileri göz önünde alındığında elektrikli binek araçların menzili kabaca 300-340 km civarındadır. Daha sonrasında şarj edilmeleri gerekmektedir. Batarya kapasiteleri büyük olduğundan ötürü evlerde bulunan standart monofaze (16A-3500W) prizler ile yaklaşık 12 saatte şarj edilebilirler. Bu süre, günlük kullanılan bir araç için neredeyse kabul edilemez uzunluktadır. Bunun için şarj süresini kısaltmak amacıyla trifaze den beslenen daha

yüksek güçlü ve direkt olarak batarya çalışma geriliminde şarj edebilen yüksek güçlü şarj cihazları geliştirilmektedir.

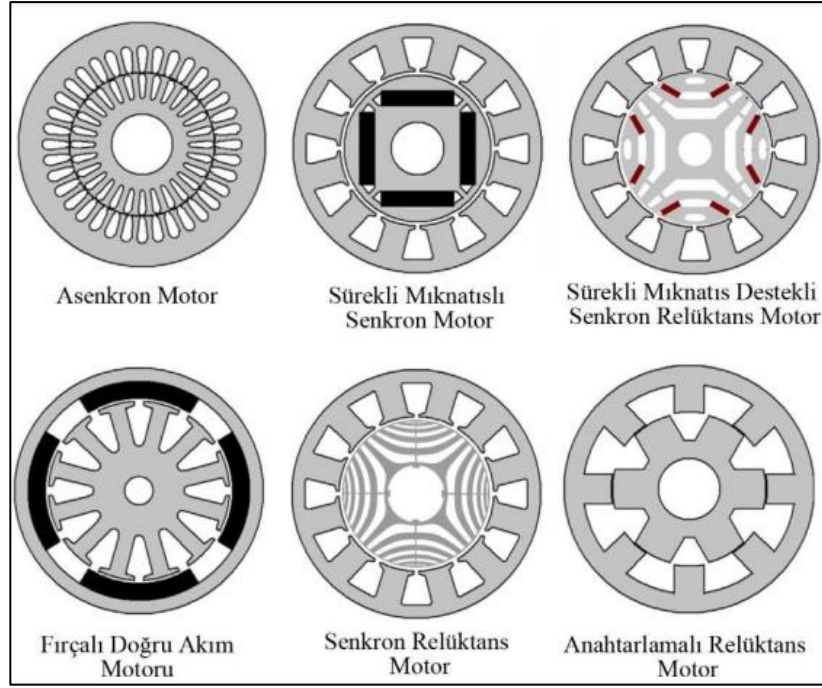


Şekil 3.5: Elektrikli tahrik sistemi.

3.3. Elektrikli Araç Tahrik Sistemi Bileşenleri

3.3.1. Elektrik Motoru

Akım taşıyan bir iletken manyetik alana maruz kalırsa, iletken üzerinde fiziksel bir kuvvet oluşur (Amper Kanunu). Bu kanun elektrik motorlarının çalışma prensibidir. EM, üzerinden geçen akımın şiddeti kontrol edilen birden fazla iletkenin maruz kaldığı manyetik alan neticesinde üzerlerinde oluşan kuvvetin, doğrusal veya kendi eksenini etrafında dönebilen bir şaft aracılığıyla kullanılabilir hale getiren makinelerdir. Rotor ve stator olarak iki parçadan oluşur. Stator, EM 'nin gövdesine sabit ve zamana göre değişen akım taşıyan iletkenlerin bulunduğu parçadır. Rotor ise hareketli şaft üzerinde bulunan mıknatıs veya iletkenleri barındıran parçadır. Stator içindeki iletkenlerin üzerinden geçen akımın şiddeti kontrol edilerek, sistemin ürettiği kuvvet veya moment kontrol edilir. Böylece elektrik enerjisi, EM kullanılarak mekanik enerjiye dönüşmüş olur. Motor içerisinde manyetik alanı oluşturmak için elektrik motorunun çalışma prensibine göre, sabit mıknatıslar veya sabit manyetik alan oluşturabilen sargılar bulunur. Şekil 3.6 'da çeşitli motor tiplerinde ait rotor ve stator yapıları gösterilmiştir [8].



Şekil 3.6: Çeşitli motor tiplerine ait rotor ve stator yapıları.

3.3.1.1. Fırçalı Doğru Akım Motoru

Fırçalı doğru akım motorunda sabit manyetik alanı oluşturmak için stator kısmında DA akım ile beslenen sargılar bulunur. Rotor üzerindeki sargılara fırçalar ve komütatör aracılığı ile şiddeti kontrol edilen akım uygulanır. Kontrol edilen akım sayesinde motor istenilen moment devir seviyelerinde çalıştırılır. Bu motor tipi diğer motor tiplerine göre düşük verimli ve bakım ihtiyacı olduğundan dolayı gelişmiş elektrikli araçlarda tercih edilmez. Ancak golf aracı gibi basit hizmet araçlarında düşük maliyetli olması nedeniyle tercih edilir.

$$T_e = k * \varphi * i_a \quad (3.1)$$

3.3.1.2. İndüksiyon Motoru

İndüksiyon motorunun çalışma prensibi diğer motor tiplerinden biraz farklıdır. Motorun içerisinde herhangi bir mıknatıs veya ayrı olarak sabit manyetik alan üreten sargı bulunmaz. Stator dan geçirilen akım, rotor üzerinde bulunan uç kısımları birbirleri ile kısa devre yapılmış çubuklar üzerinde gerilim indükleyerek akım

geçmesine neden olur ve böylece manyetik alan oluşur. Oluşan kuvvet neticesinde motor şaftından moment elde edilir. İndüksiyon motorunda sabit mıknatıs ve akımı rotora ileten fırçalar olmadığı için dayanıklı, bakımsız ve düşük maliyetlidirler. Bu nedenlerden ötürü sanayide yoğun olarak kullanılırlar. Rotor üzerinde indüklenen gerilim stator akımı ve rotorun dönüşü ile doğrudan ilişkili olduğundan, hassas hız kontrolü gereken uygulamalar için uygun değildir. Günümüz motor sürücü invertörleri ile büyük ölçüde hız ve moment kontrolü yapılabilmektedir. Bu sayede elektrikli araçlarda kullanılabilir.

3.3.1.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor

Bu tip motorlar, rotorunda sabit manyetik alan oluşturabilen mıknatıslar bulundurulur. Manyetik alanın şiddeti, indüksiyon motorlarındakinin aksine rotorun dönüş hızı ve statordan geçen akıma bağlı olmadığından ötürü, kontrol hassasiyeti ve ürettiği moment yönünden avantajlıdır. Bu sayede motor gücünün-motor ağırlığına oranı, güç yoğunluğu açısından diğer motor tiplerinden daha başarılıdır. Elektrikli araçlar gibi güç-ağırlık oranının önemli bir parametre olduğu alanlarda sıklıkla kullanılır. Mıknatısların motor içerisindeki yerlerine göre kendi içinde gruplara ayrılırlar. Motor momenti, Denklem 3.2 ve 3.3 ile hesaplanır.

$$T_e = \frac{3}{2} * p * \varphi_m * i_q \quad (3.2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} * p * (\varphi_m * i_q + (L_d - L_Q)i_d * i_q) \quad (3.3)$$

3.3.1.4. Relüktans Motorları

Relüktans motoru, diğer motor tiplerinden farklı bir çalışma topolojisine sahiptir. Bu tip motorların rotorlarında, herhangi bir sarı veya iletken çubuk bulunmaz. Buna mukabil, rotor üzerinde özel geometrilere sahip hava boşlukları bulunur. Hava boşluklarının, statordan geçirilen akım neticesinde ortaya çıkan manyetik alana direnç/relüktans oluşturmasıyla rotor üzerinde bir kuvvet oluşur. Düşük maliyetli

olması ve kontrol yöntemlerinin gelişmesi sonucunda kullanım alanı artmıştır. Motor momenti, Denklem 3.4 ve 3.5 ile hesaplanır.

$$T_e = \frac{1}{2} * i^2 * \frac{dL}{d\theta} \quad (3.4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} * p * (L_d - L_q) * i_d * i_q \quad (3.5)$$

3.3.1.5. Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor

Sürekli mıknatıslı motorlarda kullanılan mıknatısların, maliyeti arttıran bir unsur olması nedeniyle, araştırmacılar, yeni elektrik motoru topolojileri üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar neticesinde, sürekli mıknatıslı motorların güç yoğunluğu ve Relüktans motorun ekonomi avantajları göz önüne alınarak, bu motor tipi geliştirilmiştir. Mıknatıs miktarının azaltılması nedeniyle kaybedilen moment kapasitesi, Relüktans ile oluşturulan moment ile karşılanır. Günümüz elektrikli araçlarda henüz kullanım örneği yoktur. Motor momenti, Denklem 3.6 ile hesaplanır.

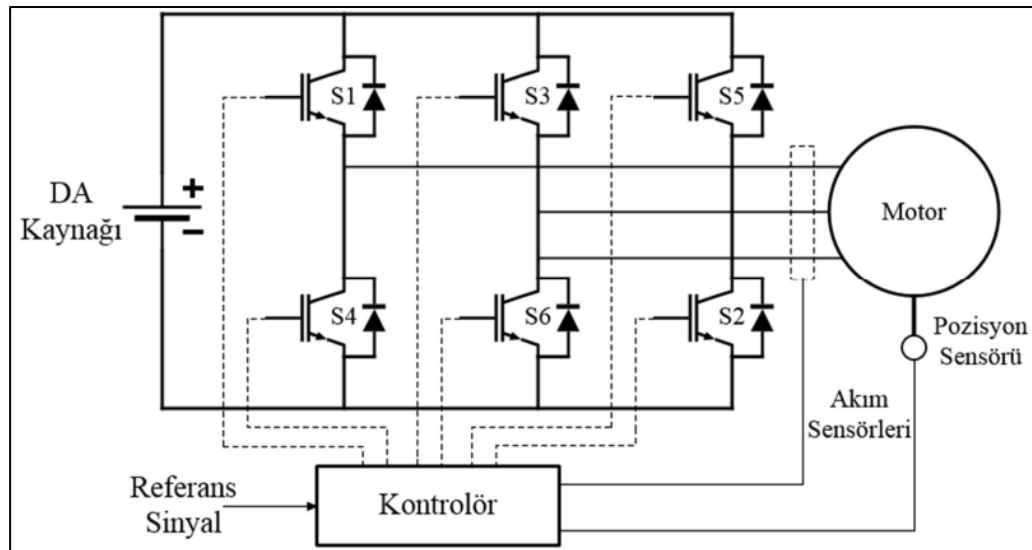
$$T_e = \frac{3}{2} * p * (\varphi_m * i_q + (L_d - L_q) i_d * i_q) \quad (3.6)$$

3.3.2. İnvvertör

İnvvertör, elektriksel bir güç dönüştürme elemanı olarak tanımlanır. Doğru akımı (DA) alternatif akıma (AA) dönüştüren güç elektroniği devreleri, İngilizcede ‘inverter’ (İnvvertör), dilimizde de evirici olarak isimlendirilir. Herhangi bir DA kaynağından aldığı gerilimi, yüke en uygun şekilde işleyerek, sabit veya değişken genlik ve frekanslı AA gerilime dönüştürürler. En basit örneği, sabit kaynak gerilimini istenilen genlikte ve frekansta, kare dalga (DGM) ya dönüştürerek kontrollü şekilde elektriksel yüke ileten devrelerdir. Gelişmiş örnekleri bir veya birden fazla şekilde DA enerjiyi AA forma çevirirler [10].

Tez konusu olan elektrikli araç invertörü ise genellikle üç fazlı bir çıkışa sahiptir. Bu nedenle ileriki bölümlerde sadece üç faz çıkışına sahip invertör topolojisine yer verilmiştir. İnvörtör iç yapısı; DA giriş kapasitörü, anahtarlama elemanı, önsürücü (anahtarlama elemanı sürücü), soğutma elemanı, sensörler ve mikroişlemci olarak altı ana bileşen şeklinde incelenecektir.

DA giriş kapasitörü, anahtarlama elemanları tarafından oluşturulan AA akım neticesinde kaynaktan çekilen değişken akım salınımının ve DA giriş gerilimindeki salınımın azaltılmasında görev yapar. Anahtarlama elemanı, motorun çalışması için gereken akım şeklinin oluşturulmasında görev alır. Anahtarlama elemanı sürücü (önsürücü) ise mikroişlemciden gelen düşük güçlü anahtarlama (DGM) sinyallerini düşük gerilimi ile yüksek gerilimden elektrikselsel olarak izole edip, anahtarlama elemanının çalışmasını sağlarlar. Soğutma elemanı, anahtarlama elemanı üzerindeki gerilim düşümünden kaynaklanan kayıpların neden olduğu ısı enerjisinin uzaklaştırılmasında görev alır. Sensörler, kontrol algoritmasının çalışması için gereken faz akımlarının ölçümünde kullanılır. Mikroişlemci ile, sensörler ve araçtan gelen bilgiler toplanır ve istenilen şekilde motor kontrol algoritması çalıştırılır. Şekil 3.7 'de elektrikli araçlarda kullanılan invertör topolojisi görülmektedir [11].

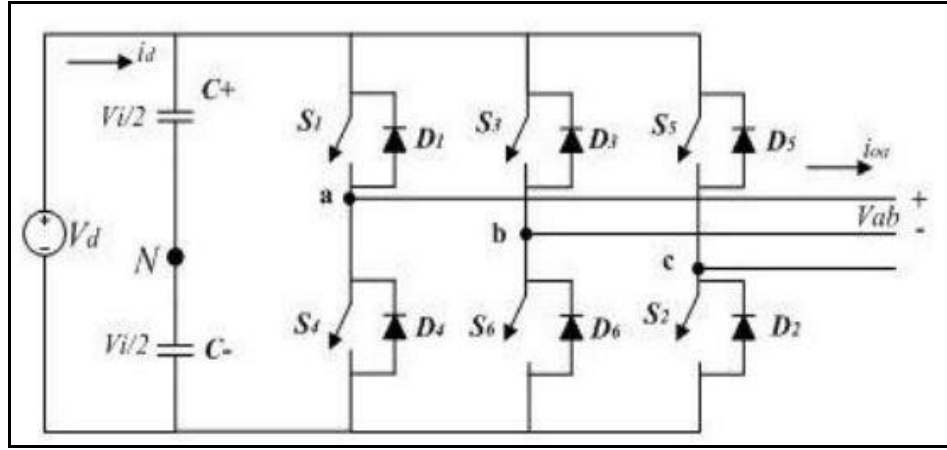


Şekil 3.7: Tez konusu invertörün yapısı.

Elektrik motorunun verimli çalıştırılmasında motor kontrol yöntemleri-algoritması büyük öneme sahiptir. İnvörtör başlığı altında üç temel motor kontrol algoritması hakkında bilgi verilecektir [12].

3.3.2.1. İnvörtör Topolojisi

İnvörtör, hedef uygulama gücüne göre bir den fazla sayıda faz çıkışına sahip şekilde tasarlanabilir. Tez konusu olan binek elektrikli araç tahrik invörtörleri ise ihtiyaç duyulan güç aralığı ve tasarım sadeliği gibi konular düşünüldüğünde üç fazlı bir çıkışa sahip olması yeterli olmaktadır. Önceki bölümde, invörtör hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bu bölümde ise üç fazlı invörtör topolojisi hakkında bilgi verilecektir.



Şekil 3.8: Üç fazlı invörtör topolojisi.

Üç fazlı invörtör topolojisinde kullanılan temel yapı Şekil 3.8'de görülmektedir. Üç fazlı çıkış AA gerilim üretmek için aralarında $2\pi/3$ radyan faz farkı bulunan üç adet yarım köprüden oluşmaktadır. Şekildeki DA bara ya seri olarak bağlı iki adet kapasitörün orta noktasının potansiyeli invörtör için sanal 0 noktası olarak kabul edilerek, invörtörün çıkış gerilimleri Fourier serisi formatında, Denklem 3.7, 3.8 ve 3.9'daki gibi ifade edilebilir.

$$V_{a0} = \frac{2V_d}{\pi} \left[\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \dots \right] \quad (3.7)$$

$$V_{b0} = \frac{2V_d}{\pi} \left[\cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{1}{3} \cos 3 \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \frac{1}{5} \cos 5 \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \dots \right] \quad (3.8)$$

$$V_{c0} = \frac{2 V_d}{\pi} \left[\cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{1}{3} \cos 3 \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + \frac{1}{5} \cos 5 \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) - \dots \right] \quad (3.9)$$

Denklem 3.7, 3.8 ve 3.9 ‘dan yola çıkılarak faz ile sanal referans noktası arası gerilim eşitlikleri Denklem 3.10, 3.11, 3.12 ile belirlenir.

$$V_{ab} = V_{a0} - V_{b0} \quad (3.10)$$

$$V_{bc} = V_{b0} - V_{c0} \quad (3.11)$$

$$V_{ca} = V_{c0} - V_{a0} \quad (3.12)$$

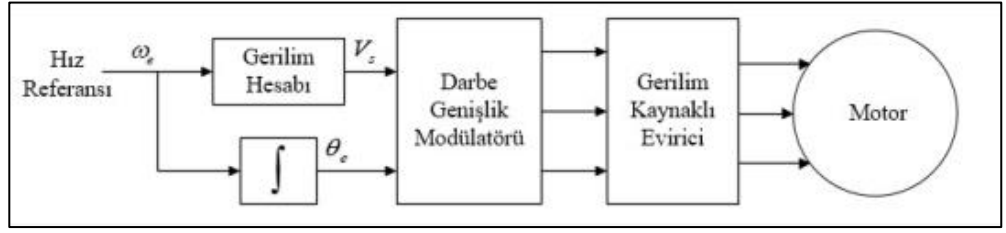
Evirici üç fazdan oluştuğu için her fazdaki anahtarlama durumuna göre, her fazın + DA bara geriliminde ya da – DA bara geriliminde olmasına göre toplam sekiz adet anahtarlama durumu oluşmaktadır. Her fazdaki yarım köprü çıkışı sırasıyla S_A , S_B , S_C şeklinde ifade edilirse, anahtarlama durumlarına göre invertör faz gerilimleri Tablo 3.1 ‘deki gibi olacaktır.

Tablo 3.1: Anahtarlama durumlarına göre faz-faz ve faz nötr arası gerilimler.

| Vektör | S_A | S_B | S_C | V_A | V_B | V_C | V_{AN} | V_{BN} | V_{CN} |
|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------------------|-------------------|-------------------|
| V_0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1 | 1 | 0 | 0 | V_d | 0 | $-V_d$ | $\frac{2}{3}V_d$ | $-\frac{1}{3}V_d$ | $-\frac{1}{3}V_d$ |
| V_2 | 1 | 1 | 0 | 0 | V_d | $-V_d$ | $\frac{1}{3}V_d$ | $\frac{1}{3}V_d$ | $-\frac{2}{3}V_d$ |
| V_3 | 0 | 1 | 0 | $-V_d$ | V_d | 0 | $-\frac{1}{3}V_d$ | $\frac{2}{3}V_d$ | $-\frac{1}{3}V_d$ |
| V_4 | 0 | 1 | 1 | $-V_d$ | 0 | V_d | $-\frac{2}{3}V_d$ | $\frac{1}{3}V_d$ | $\frac{1}{3}V_d$ |
| V_5 | 0 | 0 | 1 | 0 | $-V_d$ | V_d | $-\frac{1}{3}V_d$ | $-\frac{1}{3}V_d$ | $\frac{2}{3}V_d$ |
| V_6 | 1 | 0 | 1 | V_d | $-V_d$ | 0 | $\frac{1}{3}V_d$ | $-\frac{2}{3}V_d$ | $\frac{1}{3}V_d$ |
| V_7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

3.3.2.2. Gerilim Frekans Kontrolü

Gelişmiş kontrol yöntemlerinin en başında, çevremizde sıklıkla gördüğümüz indüksiyon motorlarının kontrolünde kullanılan kontrol yöntemi olan V/f, gerilim frekans (skaler) kontrolü gelir. Motor fazlarına uygulanan gerilimin genliği ve frekansı kontrol edilerek elektrik motoru istenilen hız ve momentte çalışmasını sağlar. Yöntemin blok diyagramı Şekil 3.9 'da verilmiştir.



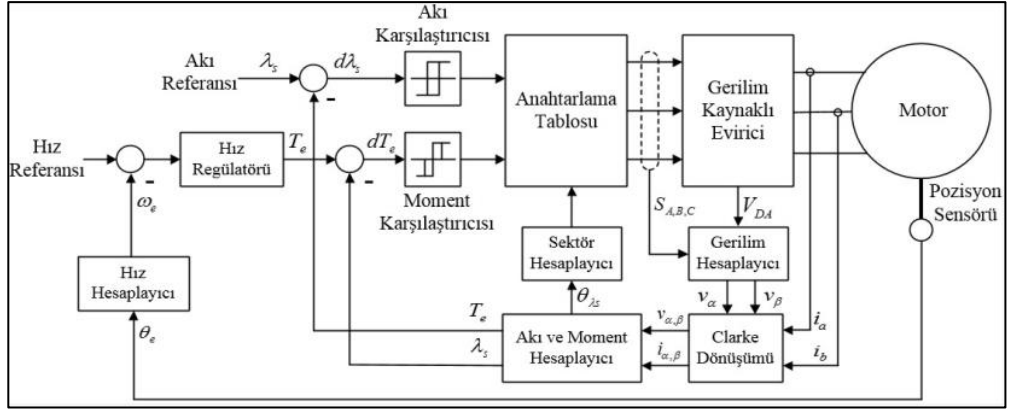
Şekil 3.9: Gerilim frekans kontrolü blok diyagramı.

Bu kontrol yönteminde elektrik motorundan herhangi bir geri besleme sensör bilgisi alınmadığı için açık çevrim çalışır. Bundan ötürü hassas kontrol ihtiyacı olmayan fan ve pompa motoru gibi kontrol uygulamalarında sıklıkla kullanılır. Moment kontrolü, bilinen yük tarafından motor hızına bağlı olarak hesaplandığından, moment ve hız kontrol edilerek dolaylı olarak sağlanır. Bundan ötürü gerilim-frekans kontrolü yönteminde dinamik performans düşüktür. Yüksek verimlilik, performans ve hassasiyet gerektiren uygulamalarda tercih edilmez.

3.3.2.3. Doğrudan Moment Kontrolü

Teknolojinin gelişmesine paralel olarak, elektrik motorlarından beklenen performans ta artmıştır. Bundan ötürü daha yüksek keskinlikte ve dinamik performansa sahip motor kontrol yöntemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Doğrudan moment kontrolü, stator ile rotor arasında oluşturulan akının kontrol edilerek momentin kontrol edilmesidir. Bu yöntem, faz akımları, senkron elektrik motorlarında rotor hızı ve konumu sensörlerinden ölçülen verileri kullandığı için dinamik performans yönünden başarılıdır.

Ön tanımlı anahtarlama tablolarından, anlık ölçülen faz akımı, rotor hızı ve pozisyonu verilerine göre en uygun gerilim vektörü seçilir.



Şekil 3.10: Doğrudan moment kontrolü blok diyagramı.

Doğrudan moment kontrolünün çalışma prensibi uzay vektör teorisine dayanır. Akım sensörlerinden gelen faz akımları clarke dönüşümü ile üç boyutlu abc referans düzleminden, iki boyutlu $\alpha\beta$ referans düzlemine dönüştürülür ve elektrik motorunun anlık çalışma verilerinden akı ve moment tahminin yapılır. Yapılan moment tahmini ile referans moment değeri histerisiz karşılaştırıcıya girilir. Aynı zamanda akı tahmini hesaplayıcından hesaplanan akı tahmini de referans akı ile birlikte histerisiz karşılaştırıcıya girer. Bu iki karşılaştırıcı sonucunda uygun anahtarlama sektörü ön tanımlı tablodan seçilir ve invertöre uygulanır. Yöntemin blok diyagramı Şekil 3.10 'da verilmiştir.

3.3.2.4. Alan Yönlendirmeli Kontrol

Elektrikli araç tahrik motoru gibi, motorun ürettiği hız ve momentin doğru ve hızlı şekilde kontrol edilmesinin önemli olduğu uygulamalar için 1970'li yılların başında geliştirilmiş bir EM kontrol yöntemidir. Bu yöntemde ilk olarak, üç faz stator akımları I_a , I_b ve I_c ölçülerek, üç eksenli düzlem üzerine aralarında 120° faz farkı olacak şekilde yerleştirilir. İşlem kolaylığı sağlaması açısından Clarke dönüşümü ile iki boyutlu düzlemde i_α ve i_β şeklinde ifade edilir. Elde edilen i_α ve i_β akımları rotor pozisyon sensöründen gelen açı bilgisi ile birlikte Park dönüşümü uygulanarak iki boyutlu düzlem üzerinde ve dönel bir eksende statorun akı ve moment bileşenlerine ayrılır. Kontrol işlemi, bu akı ve moment bileşenleri üzerinden yapılır.

3.3.3. Enerji Depolama Sistemleri

Mobil araçlar tasarımları gereği enerji kaynaklarını kendi üzerlerinde taşırlar. Araç tasarımında genel enerji verimliliği, önemli tasarım özelliklerinden biridir. Hareket ettirilen toplam kütle ile harcanan enerji arasında doğrudan bir ilişki vardır. Bundan ötürü araçlarda kullanılan tüm tahrik sistemi unsurlarında, güç/ağırlık oranının yüksek olması, verimli bir çalışma için gerekli ve istenilen bir özelliktir. Hafif araç için diğer konu da aracın küçük hacimli olmasıdır. Bundan ötürü araç tahrik sistemlerinde güç/ağırlık oranının yanında, güç/hacim oranı da verim için önemli bir parametredir.

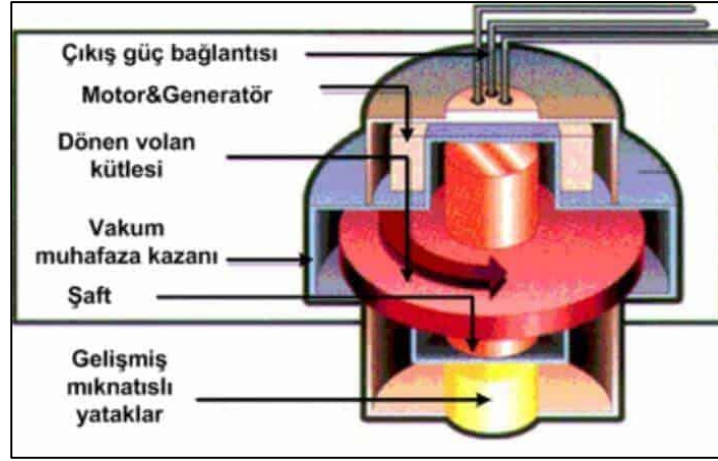
İçten yanmalı araçlarda enerji depolama sistemi, sıvı yakıtın içine konulabileceği bir depodan oluşmaktadır. Hibrit ve elektrikli araçlarda ise enerji depolama sistemi olarak bataryalar mevcuttur. Bataryalar, elektrikli bir tahrik sisteminin en fazla kütleyle sahip bileşenidir.

Son yıllardaki Lityum içerikli batarya teknolojisindeki gelişmeler neticesinde yüksek enerji-güç ağırlık oranına sahip bataryalar elektrikli ve hibrit araçların yaygınlaşmasında ciddi katkıda bulunmuştur.

Lityum içerikli bataryaların popüler olmasından önce elektrikli tahrik sistemlerinin enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla çeşitli depolama yöntemleri üzerinde çalışılmıştır.

3.3.3.1. Volanlar

Volan sabit bir eksen üzerinde dönebilen nispeten fazla kütleli olan disk biçimli bir cisim anlamına gelir. Disk döndürülünce üzerinde kinetik enerji depolanır ve bu enerji ihtiyaç durumunda kullanılır. Enerji dönüşüm verimliliği %90 civarında ve enerji döngüsü sayısı da yüksektir. Volan yapısı, genelde anlık enerji depolama ve kullanım ihtiyacı olduğu uygulamalarda tercih edilir. Uzun süreli depolama amacıyla kullanılamazlar. Bu özellikleri nedeniyle bazı yarış araçlarında viraj girişlerindeki yavaşlamalardaki kaybedilen enerjinin bir kısmını depolar ve viraj çıkışında tekrar kullanıma sunar [19]. Şekil 3.13 'te volan yapısı görülebilir.



Şekil 3.13: Volan.

3.3.3.2. Süperkapasitörler

Superkapasitörler, elektronikte aşına olunan kapasitörlerden, çok daha yüksek kapasitans değerine sahip olmalarıyla ayrılırlar. Süperkapasitörlerin ana görevi, volanlar gibi yüksek güçlü enerji depolama ve sağlama ihtiyaçlarında mekanik yerine elektronik bir çözüm sunmasıdır. Elektrik enerjisini, dönüşüm yapmadan direkt olarak depoladığı için yüksek verimlidir. Geri kazanımlı frenleme gibi yüksek güçlü depolama ihtiyaçları için son derece uygundur. Olumsuz yanları ise, batarya gibi uzun süreli depolama yapılamaması, enerji yoğunluklarının düşük olması ve kapasitör üretiminde, yüksek kapasitans sağlamak için büyük yüzey alanı, büyük yüzey alanı da büyük hacim gerektirmesi nedeniyle yüksek kapasitanslara ulaşılmasının zor olmasıdır. Bunun yanında, düşük hacimlerde yüksek kapasitans değeri için kapasitör içinde izolasyonu sağlayan malzemeler azaltılır ve böylece hacim küçültülür. İzolasyon malzemesinin azaltılması ise çalışma geriliminde dramatik düşüşlere neden olur. Bundan ötürü genellikle düşük gerilimlerde üretilirler. Yüksek gerilimli tasarımlarda kullanıma uygun değildir.

3.3.3.3. Yakıt Hücreleri

Lityum tabanlı bataryaların araçlarda kullanımı için yeterince gelişmiş örneklerinin olmadığı dönemlerde, elektrikli araçlar için enerji depolama yöntemleri konusunda, basınçlı hidrojen gazı kullanımı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Hidrojen

gazı, yakıt hücresi denilen özel bir sistem sayesinde havadaki oksijen ile kontrollü şekilde tepkimeye sokularak, tepkime sonrası ortaya çıkan serbest elektronların yakalanması prensibi ile kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Yakıt hücresinde tepkime sonrası oluşan atık, hidrojenin oksijen ile tepkimeye girmesi sonucu oluşan saf sudur. Bu sayede kullanım esnasında çevreye herhangi bir zarar verecek atık madde yoktur. Bu sistemin yaygınlaşmasının önündeki en büyük engel ise hidrojenin depolanmasının zor ve yüksek basınç gerektirdiği için tehlikeli olmasıdır.

Hidrojen gazı, yapısı itibariyle çok yüksek basınçlar altında sıvılaştırılabilen bir özelliğe sahiptir. Depolama için yaklaşık 200-250 bar basınç gerektirir. Ayrıca bu seviyelerdeki basınçlarda dolun yapmakta enerji gerektirdiğinden ötürü toplam enerji verimliliği konusunda da düşük verimden bahsedilebilir. Yüksek basınçtan kurtulmak amacıyla, hidrojeni, sıvı/gaz olarak depolama yerine, kabul edilebilir, 15-20 bar basınç seviyelerinde, basınçla orantılı olarak hidrojen ile tepkimeye girebilen ve böylece katı depolama imkânı sunan metal bileşiklerle dolu tüpler geliştirilmiştir. Bu yöntem, yüksek performanslı Lityum tabanlı bataryalardan önce elektrikli araç enerji depolama konusunda en uygun yöntem olarak değerlendirilmekteydi. Fakat batarya teknolojisinin son yıllarda hızlı gelişimi, yakıt hücresi fikrinin geri planda kalmasına neden olmuştur [13].

3.3.3.4. Bataryalar

Bataryalar, elektrikli tahrik sistemi bulduran araçlar için en yaygın olarak kullanılan enerji depolama bileşenleridir. Teknolojinin gelişmesi neticesinde, yıllar içinde çeşitli kimyasal yapılara sahip bataryalar üretilmiştir. Bataryalar kimyasal yapıları itibariyle kendi aralarında avantajlara ve dezavantajlara sahiptirler. Mobil uygulamalar için batarya teknolojisinden beklenen özellikler düşünülecek olursa, diğer bölümlerde olduğu gibi ilk olarak, enerji, hacim-ağırlık oranları gündeme gelir. Daha sonra şarj-deşarj döngü sayısı, enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu ve verimlilik gibi özellikler gelir.

Çevremizde gördüğümüz elektrikli araçların birçoğunda en eski batarya kimyasal bileşenlerinden olan kurşun-asit bataryalar kullanılır. Bu batarya tipi uzun yıllardır kullanıldığı için güvenilirlik konusunda kendini kanıtlamıştır. Fakat verim ve

enerji ağırlık oranı konusunda başarılı değildir. Tablo 3.2 'de bazı batarya kimyasal bileşenlerin karşılaştırılması yapılmıştır.

Tablo 3.2: Elektrikli araç bataryalarının özellikleri.

| Batarya Türü | Enerji (Wh/kg) | Enerji Yoğunluğu (Wh/L) | Güç Yoğunluğu (W/kg) | Güç Yoğunluğu (W/kg) | Yaşam Süresi (Çevrim) | Çalışma Sıcaklığı (°C) |
|--------------------|----------------|-------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| Kurşun Asit | 30-50 | 60-100 | 200-400 | 70-90 | 2000-4500 | -20 - 60 |
| Nikel-Kadmiyum | 40-50 | 80-100 | 150-350 | 60-90 | 2000-3000 | 40 - 60 |
| Nikel-Metal Hidrit | 50-70 | 100-140 | 150-300 | 50-80 | 500-3000 | -40 - 50 |
| Nikel-Metal Hidrit | 60-75 | 60-70 | 90-110 | - | 300 | - |
| LityumPolimer | 155 | 200 | 315 | 70 | >1200 | -20-60 |
| Lityum-İyon | 120-140 | 240-280 | 200-300 | 70-85 | 1500-4500 | -20-60 |

Batarya teknolojisindeki gelişmeler, (özellikle Lityum tabanlı bataryaların gelişmesi) trafikte, karayolunda kullanılan elektrikli araçların yaygınlaşmasında ciddi katalizör etki göstermiştir. Lityum tabanlı bataryalar, kurşun asit bataryalar gibi kontrolsüz şekilde yüke bağlanıp enerji kaynağı olarak kullanılamazlar. Kimyaları gereği şarj deşarj performansı, döngü sayısı ve güvenilirlik konusundaki başarısının yanında, Lityum tabanlı batarya hücreleri belirli bir alt ve üst gerilim sınırı aşıldığında yapılarının bozulması neticesinde yanarak çevresine zarar verme durumundan ötürü, mutlaka kontrollü şekilde kullanılmaları gerekmektedir. Günümüzde batarya yönetim sistemleri (BYS) üzerinde yoğun çalışmalar yapılmaktadır.

Batarya yönetim sisteminin temel özelliği, bir veya birden fazla bir araya getirilmiş Lityum tabanlı hücrelerin şarj-deşarj döngüleri neticesinde, birbirleri arasında gerilim farkı oluşmasını önlemektir. Diğer görevleri ise, şarj-deşarj sırasında bataryaları gözleyerek, elektriksel ve termal sınırların içinde kalmasını sağlamak, genel güvenlik şartlarını izlemek, şarj-deşarj akımını kesmek, şarj miktarı ve batarya sağlığı gibi, batarya için izlenmesi gereken bilgiler üretmektir [22].

4. İNVERTÖR TASARIMI VE UYGULAMASI

Bu bölümde elektrikli ve hibrit araç tahrik sistemlerinde kullanılabilecek bir invertör tasarımı ve gerçekleştirilmesi yapılacaktır. Tasarım akışında ilk olarak, tahriği sağlanacak araç üzerinden mekanik gereksinimler tespit edilmeye çalışılacaktır. Elde edilen veriler ışığında, gerekli tahrik sisteminin gücü hesaplanacaktır. Sonrasında uygun bir çalışma gerilimi seçilerek, akım seviyesi belirlenecektir. Temel güç özellikleri belirlendikten sonra, çalışma gerilimi, dijital ve analog giriş çıkışlar gibi özellikler belirlenecektir. Tüm ihtiyaçlar belirlendikten sonra eleman seçimleri yapılacaktır. Ortaya çıkacak invertör, araçlarda kullanılacak nitelikte olduğundan ötürü gerekli güvenlik şartlarını sağlaması gerekmektedir. Bundan dolayı seçilecek elemanlar, otomotiv standardı olması gerekmektedir. Güç sistemlerinde, anahtarlama elemanının çalışma sınırlarına yakın, yüksek performanslı tasarımlar, mobil uygulamalardaki güç yoğunluğu, maliyet gibi faktörlerin önem arz ettiği bir tasarım yapılacaksa, soğutma sistemi ve güç devresinin istenmeyen parazitik değerleri kritik önem kazanmaktadır.

4.1. İhtiyaçların Belirlenmesi

Tez sonunda ortaya çıkacak invertör, binek araçlar için bir uygulama hedeflendiğinden, mekanik isterler, binek araç tahrik ihtiyaçları üzerinden ilerlemiştir. Bunun neticesinde piyasadaki bazı binek araçların tahrik sistemleri incelenerek performans verileri derlenmiştir. Tablo 4.1’de araç üzerinde kullanılan İYM ve EM moment, devir, yüklü azami ağırlık ve motor güçleri verilmiştir.

Tablo 4.1: Araçların karşılaştırılması.

| Araç | Yüklü Ağırlık [kg] | Azami Moment [Nm] | Nominal Devir [RPM] (Azami Tork) | Azami Motor Gücü [kW] |
|-----------------------|--------------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Nissan Leaf S | 1765 | 320 | 3271 | 109,6 |
| Nissan Pulsar (110ps) | 1785 | 260 | 2500 | 68,1 |
| Tesla Model X P90D | 2300 | 387 | 9522 | 385,9 |
| Chevrolet Bolt | 2112 | 360 | 3978 | 150,0 |

Tablo 4.1: Devam.

| | | | | |
|--|------|-----|------|-------|
| Ford Focus (2lt 160hp) | 1837 | 198 | 4450 | 92,3 |
| Honda Civic(benzinli, 158hp) | 1744 | 187 | 4200 | 82,2 |
| Hyundai i30(1.6 crdi, 100kW) | 1920 | 280 | 3000 | 88,0 |
| Kia Rio 1.25 lt 83 hp | 1560 | 122 | 4000 | 51,1 |
| Kia Soul (126hp) | 1940 | 260 | 2750 | 74,9 |
| Mercedes CLA | 1955 | 250 | 4000 | 104,7 |
| Mitsubishi imiev | 1450 | 196 | 1705 | 35,0 |
| Tesla Model S P100D | 2739 | 792 | 5000 | 414,7 |
| Toyota Yaris 1.4D-4D | 1545 | 205 | 2800 | 60,1 |
| Volvo S60 T3(152hp) | 2200 | 250 | 4000 | 104,7 |
| Volvo S90 D5 (235 hp) | 2360 | 480 | 2250 | 113,1 |
| Volvo V40 T3 (152 hp) | 2025 | 250 | 4000 | 104,7 |
| Volvo XC90 D5 (235 hp) | 3010 | 480 | 2250 | 113,1 |
| Alfa Romeo Giulietta (170 HP) | 1810 | 230 | 2500 | 60,2 |
| Chevrolet Spark | 1861 | 443 | 2249 | 104,4 |
| Chevrolet Volt Gen 2 111 kW (1.5 lt range extender, 75kW) | 2187 | 398 | 2839 | 118,3 |
| Ford Focus (1lt) | 1842 | 170 | 4500 | 80,1 |
| FordTransit Connect(Benzinli,1.6lt,178hp) | 2277 | 250 | 2500 | 65,4 |
| Honda accord | 1917 | 245 | 3900 | 100,2 |
| Hyundai IONIQ Electric | 1880 | 295 | 2800 | 86,5 |
| Renault Clio 4 (90hp dci) | 1651 | 220 | 1750 | 40,3 |
| Fiat 500(1.3 multijet,75hp) | 1420 | 145 | 1500 | 22,8 |
| Ford Kuga 1.5 EcoBoost (182 HP) | 2200 | 240 | 1500 | 37,7 |
| Kia Ceed(1.6 CRDI,94kW) | 1920 | 260 | 2750 | 74,9 |
| Kia Soul EV | 1972 | 285 | 2727 | 81,4 |
| Mazda 3 | 1740 | 144 | 3500 | 52,8 |
| Mazda 6 | 1920 | 196 | 4000 | 82,1 |
| Mercedes A180 (122hp) | 1935 | 200 | 4000 | 83,8 |
| Mercede B-Class Electric Drive | 2170 | 340 | 3600 | 128,2 |
| Opel Astra 1.6 CDTI (136 hp) automatic K | 1900 | 320 | 2250 | 75,4 |
| Renault Megane (1.5 dci 110hp) | 1813 | 260 | 1750 | 47,6 |
| Toyota Auris 1.4D-4D | 2300 | 205 | 2800 | 60,1 |
| Toyota Rav4 2.0-litre D-4D | 2135 | 320 | 2400 | 80,4 |
| VW e-Golf | 1960 | 270 | 3006 | 85,0 |
| BMW i3 | 1620 | 250 | 4774 | 125,0 |
| BMW i8 (IYM 1.5 lt 230 hp) | 1855 | 250 | 3667 | 96,0 |
| Opel Astra J (1.3 dizel) | 2065 | 190 | 3250 | 64,7 |

Tablo 4.1: Devam.

| | | | | |
|---|---------------|------------|-------------|-------------|
| Opel Astra J Limousine (Sedan) 136 hp | 2025 | 320 | 2000 | 67,0 |
| Peugeot 308 SW Allure 2.0 BlueHDi 2014 110kW | 2000 | 370 | 2000 | 77,5 |
| VW Golf 7(1.2tsi,110hp) | 1710 | 175 | 4000 | 73,3 |
| Citroen C4 (1.6 TDİ, 92hp) | 1790 | 230 | 1750 | 42,1 |
| Fiat 500 e | 1832 | 199 | 3976 | 82,9 |
| Ford Focus Electric | 2144 | 250 | 4087 | 107,0 |
| Nissan Leaf 80kW | 1927 | 280 | 3013 | 88,3 |
| Renault Zoe | 1943 | 250 | 2500 | 65,4 |
| Tesla Roadster | 2300 | 370 | 5807 | 225,0 |
| Chevrolet Volt Gen1 | 2087 | 370 | 2838 | 110,0 |
| Renault Fluence dCi 105 | 1777 | 240 | 2000 | 50,3 |
| BMW 1.18i | 1775 | 190 | 4250 | 84,6 |
| BMW 1.20i(170hp) | 1740 | 210 | 4250 | 93,5 |
| Toyota Prius 3rd gen in 2009THS II | 1920 | 207 | 2767 | 60,0 |
| Opel Corsa C (B hatchback) | 1540 | 170 | 1750 | 31,2 |
| Jeep Cherokee Limited 2.8 | 2520 | 360 | 1800 | 67,9 |
| Toyota Prius 2rd gen in 2001 THS | | 400 | 1194 | 50,0 |
| Toyota Prius 1rd gen in 1997 | | 350 | 900 | 33,0 |
| Daihatsu Feroza (Sportrak) 1.6i 16V SE Hard-top | 1650 | 128 | 4800 | 64,3 |
| Mazda Demio EV | 1680 | 150 | 2800 | 44,0 |
| Verilerin Ortalaması | 1948,4 | 273 | 3159 | 90,5 |

İlk sütunda araç ismi, üçüncü ve dördüncü sütunda motor tarafından aktarma organına sağlanan, azami moment ve anma devri, son sütunda ise güç verileri gözükmektedir. Toplanan veriler ışığında, listedeki araçların çeşitli sınıflarda olduğu ve ağırlıklı olarak B ve C sınıfı araçlardan oluştuğu görülmektedir. Tablo 4.1'deki en alt satırda ise yorum yapabilmek için verilerin ortalaması hesaplanmıştır.

Ortalama veriler ışığında, araçların yüklü ağırlığı 1948,4 kg, azami motor momenti 273 Nm, motor anma devri 3159 d/d ve ortalama güç 90.5kW olarak hesaplanmıştır. Listedeki araçların performanslarının genel manada kabul edilebilir olduğunu varsayarak, ilk bakışta tasarlanacak invertör gücünün 90kW civarında olması gerektiği yorumu yapılabilir. Fakat 90kW lık bir güç değeri, üst paket (A, B ve C sınıfı) araç beklentilerini kısmen sağlasa da D ve S sınıfı araçların üst paketleri için etkileyici bir performans beklentisi açısından yetersiz kalacaktır. Bundan ötürü verilerden çıkan ortalama güç değerinin yaklaşık %30-35 fazlası gibi bir güçte invertör

tasarımı, tüm sınıflar için tatmin edici olacaktır. Tasarlanacak invertör yapısı gereği, gücü sınırlanabilen özellikte olduğu için alt sınıf daha hafif araçlarda gücü sınırlandırılarak nispeten pahalı bir çözüm olarak kullanılabilir.

Tez sonunda ortaya çıkacak invertörün, hitap ettiği araç sınıfını biraz daha genişletmek amacıyla 90kW olarak bulunan güç, %33 fazlasıyla anma gücü 120kW ve hafif ticari araçları da kapsamı amacıyla azami 150kW güce sahip olması gerektiği öngörülmüştür.

Güç belirlendikten sonraki konu ise sistemin çalışma voltajını belirlemektir. Temel elektriksel eşitliklerden yola çıkarak, yüksek gerilimli düşük akımlı sistemlerin, düşük gerilimli yüksek akımlı sistemlere göre daha verimlidir. Mobil sistemlerde ise verim önemli olduğundan mümkün olabilecek en yüksek gerilimde çalışmak mantıklı gözükmektedir. Fakat gerilim seviyesini seçerken çeşitli sınırlayıcı faktörler vardır. İnvörtör içerisinde kullanılan güç elektroniği elamanlarının çalışma gerilimleri en büyük sınırlayıcı etken olarak karşımıza çıkar.

Güç elektroniği yarı iletken teknolojisinde, yüksek gerilimler için belirli gerilim seviyelerinde üretim yapılmaktadır. Hedeflenen 120kW'lık gücü ve kontrol algoritmasının 10kHz frekansındaki DGM anahtarlama hızını karşılayan anahtarlama elemanı ise IGBT dir. IGBT üretiminde 600V, 750V, 1200V, 1700V, 2500V, 3300V, 4500V, 6500V gerilim seviyeleri bulunmaktadır. Gerilim seviyesi belirlenirken hedeflenen araç, güç ve dünya çapında kabul gören gerilim seviyeleri üzerinden karar vermek gerekir. Böylece DA-DA dönüştürücü, şarj cihazı batarya vb. diğer bileşenler ile birlikte kullanımı mümkün olabilir. Aksi takdirde ortaya çıkan invertör, diğer bileşenler ile farklı çalışma gerilimine sahip olursa, yüksek güç, gerilim gerektiren uygulamalar için yetersiz, düşük güç, gerilim uygulamaları için yüksek maliyetli olabileceğinden kullanım alanı ciddi şekilde sınırlanabilir.

Diğer ihtiyaç konusu ise invertörün dış ortam ile iletişim/bağlantı özellikleridir. CAN BUS, Flexray, RS232, RS485, I2C, USB, Ethernet vb, haberleşme protokolleri desteği, dijital ve analog giriş çıkış sayısı gibi uygulamaya yönelik gereksinimler belirlenmelidir.

Son olarak, mobil araçlarda kullanılan bileşenlerin hacim ve ağırlık özellikleri yüksek öneme sahip olduğundan ötürü, güç-ağırlık ve güç-hacim oranları gibi parametreler göz önüne alınarak invertörün fiziksel yapısı belirlenmelidir.

4.2. İnvörtörde Kullanılan Temel Elemanların Seçimi

Tasarımı yapılacak invörtörün, elektrikli ve hibrit araçlarda kullanılması hedeflendiğinden dolayı; bu araçların maruz kaldığı, çalışma ortamı sıcaklığı, sıcaklık değişimleri, nem, atmosferik basınç, titreşim, mekanik stres gibi fiziksel ortam ve koşullara dayanıklı olmalıdır. Nihai ürün olacak araç, hava sıcaklığının +50°C, -40°C olduğu ortamlarda, nem oranının %100 olduğu durumlarda ve yüksek titreşimli ortamlarda sorunsuz şekilde çalışabilmelidir. Bu sebeplerden ötürü, invörtör içinde kullanılan tüm elektronik bileşenler otomotiv standardı ürünler olmalıdır.

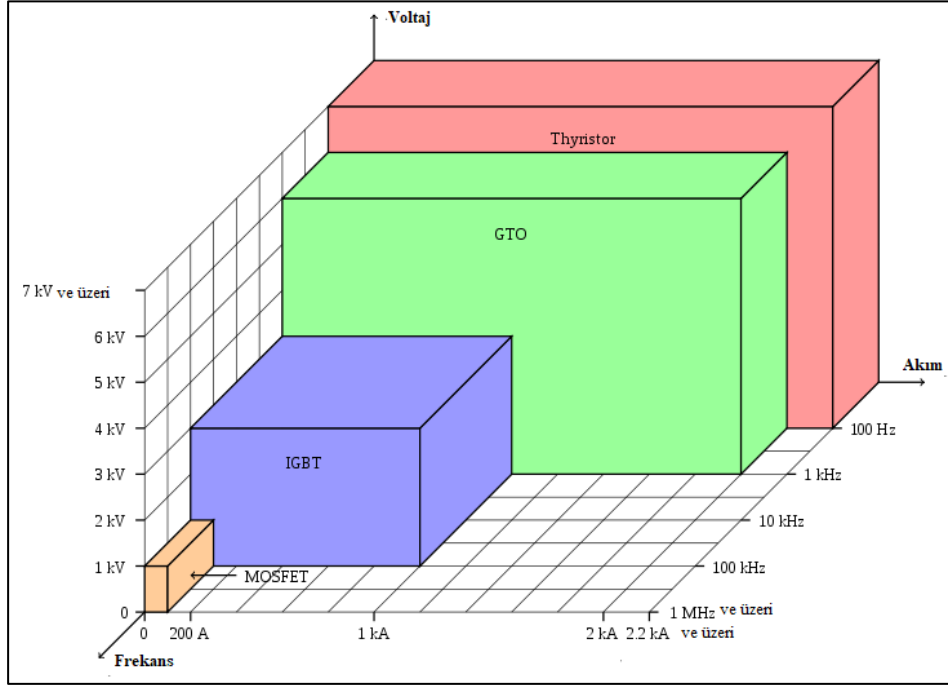
Bir önceki başlıkta belirlenen özellikler doğrultusunda, ilgili özellik başlığı altında üretimde olan ve belirli bir süre zarfında temin edilebilecek elamanlar liste haline getirilmekte ve fiyat, performans, temin edilebilirlik açısından içlerinden en uygun olan seçilmektedir.

Üretimi sonlanmış veya sonlanacak, temini zor olan bileşenlerin seçimi, tasarımın ilerleyen aşamalarında ve seri üretimde ilgili elemanın temin edilmesinin zor olması nedeniyle invörtör üretiminde ciddi problem olabilir.

4.2.1. Güç Yarıiletkeni

Güç yarıiletkeni veya anahtarlama elemanı, DA giriş geriliminin, elektrik motorunun çalışması için gereken AA gerilime dönüştürüldüğü, invörtörün en kritik parçası sayılabilecek bileşenidir. Elektrik motorunun çalışması için gereken enerji bu elaman üzerinden iletilir, bu nedenle yüksek voltajda, yüksek akımların anahtarlanması nedeniyle akım ve gerilimdeki hızlı değişimlerin parazit elemanlar üzerinde oluşturduğu elektrikselle streslere sürekli maruz kalmaktadır. Araç ömrü boyunca dış ortamda atmosfer şartlarına maruz kaldığından, sıcaklığın dalgalandığı ve titreşimli bir ortamda çalışmaktadır. Tüm bu yıpratıcı etkenlerin yanında araç tahriği gibi elektrik motorundan talep edilen yükün sabit olmadığı bir uygulama, bu elaman için zorlayıcı olmaktadır. Uygun elaman seçerken çalışma sınırlarına yaklaşımadan belirli bir güvenlik sınırları belirleyerek hareket etmek gerekmektedir.

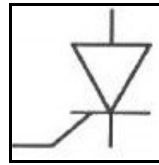
Tez konusu olan invörtör için performans kriteri olarak; sürekli 120kW güç, azami 500V DA giriş gerilimi ve nominal 300Arms faz voltajı belirlenmiştir. Aşağıda günümüzde ticari olarak ulaşılabilen invörtör uygulamalarında kullanılan anahtarlama elamanlarının karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 4.1: Tahrik invertörlerinde kullanılan yarıiletkenlerin karşılaştırılması.

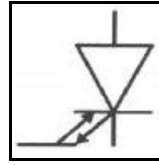
Şekil 4.1 'deki üç boyutlu koordinat düzlemine yerleştirilen dört farklı anahtarlama elemanının çalışma gerilimi, akımı ve kullanılabileceği frekans seviyeleri gösterilmiştir.

Tristör, güç elektroniğinde uzun yıllardır birçok tasarımda sıklıkla kullanılan elemandır. Diyodun kontrol edilebilir hali olarak düşünülebilir. Düşük frekanslarda (<100Hz), yüksek voltaj ve akımda anahtarlama yapabildiği için şebeke frekansındaki anahtarlama uygulamalarında sıklıkla kullanılır. İletim durumundaki iç direnci çok düşüktür. Bundan ötürü verimleri yüksektir. Tristörün dezavantajı ise bir kez ilettime geçirildikten sonra üzerinden geçen akım kesilmediği sürece iletimde kalmasıdır. Bundan ötürü tez konusu olan invertör için uygun değildir. Şekil 4.2 'de tristörün gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.2: Tristör gösterimi.

GTO, Tristörler ile benzer yapıda olup tristörlerin aksine iletimden çıkarılması da kontrol edilebilen yarı iletken anahtar türüdür. Tristörlere göre daha düşük gerilim, akım seviyesinde ama daha yüksek frekanslarda çalışabilirler. İletime geçmesi ve çıkması kontrol edilebildiğinden ötürü düşük frekanslı yüksek güçlü tren, metro vb, raylı sistem taşıtları için en fazla 1kHz DGM frekansında çalışan invertörlerde kullanılabilirler. Tez konusu olan invertör 10-20kHz arasında anahtarlama frekansı düşünüldüğünden uygun görülmemiştir. Şekil 4.3 'de GTO gösterimi verilmiştir.

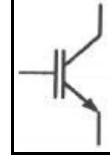


Şekil 4.3: GTO gösterimi.

MOSFET, yüksek anahtarlama hızlarının (<1Mhz) gerekli olduğu, düşük gerilim ve akımlı uygulamalar için geliştirilmiş bir üründür. IGBT lere benzer şekilde, düşük güçlü sürücü devreleri ile kontrol edilebilirler. Yarı iletken yapısı gereği içerisinde bulunan diyottan ötürü sadece tek yönlü gerilimi bloke edebilirler. Verimli, hızlı ve düşük maliyetli olmalarından dolayı günümüzde neredeyse tüm elektronik araç gerecin içerisinde MOSFET 'ler sıklıkla kullanılırlar.

IGBT, önceki bahsedilen iki anahtarlama elemanının yapısı gereği seçilen frekans (10-20Khz) seviyelerine uygun olmadığı için IGBT kullanımına karar verilmiştir. İlk iki eleman güç diyotlarından türetilmiş bir yapıya sahiptir. IGBT transistör yapısına sahip bir elemandır. Bundan ötürü yüksek frekanslarda çalışmaya uygundur.

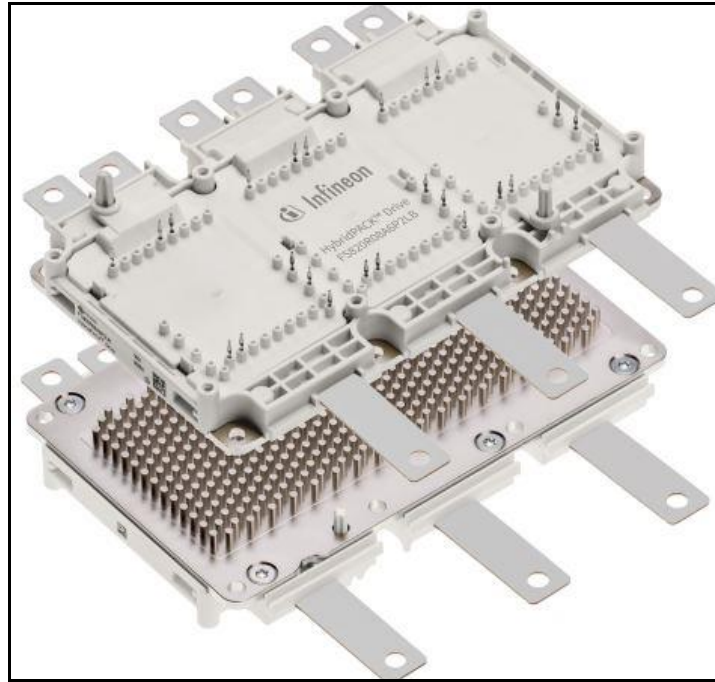
Tristör ve GTO gibi diyottan üretilmiş elamanları kontrol edebilmek için nispeten yüksek güçlü sürücü devreleri gerekmektedir. IGBT 'lerin iletim kontrolü için sadece gate bacaklarındaki kapasitansın şarj ve deşaj edilmesi yeterli olduğundan dolayı, kontrol etmek için düşük bir güç yeterli olmaktadır. Şekil 4.3 'de IGBT gösterimi verilmiştir.



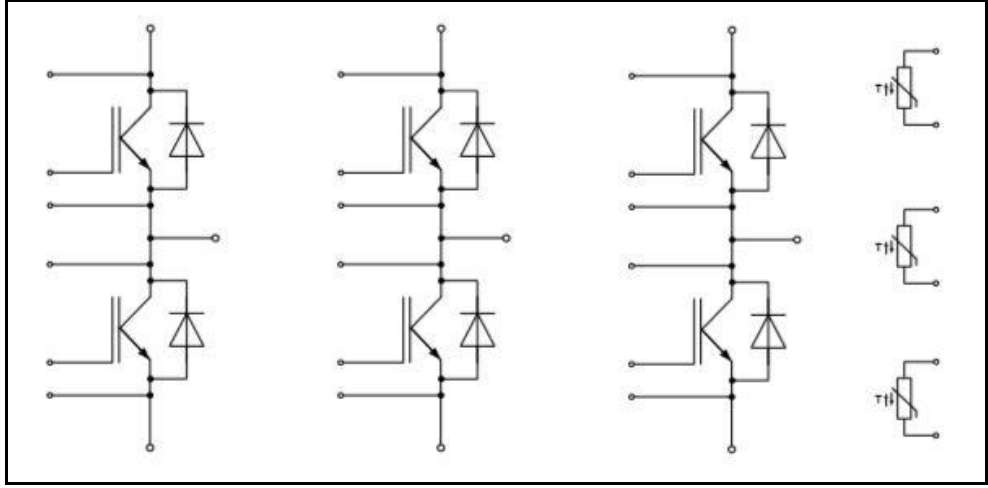
Şekil 4.4: IGBT gösterimi.

Piyasadaki ticari olarak ulaşılabılır ürünler arasındaki incelemeler sonucunda, sözü edilen, akım, gerilim ve standartlar göz önüne alındığında geriye sadece birkaç tane ürün kalmaktadır. Tek IGBT 'ler paralel bağlanarak istenilen güçlere ulaşma yöntemi, maliyet açısından üç faz tam köprü modüllere göre daha düşük maliyetli olmasına rağmen elektriksel ve mekanik tasarım zorluğu, güvenilirlik ve daha büyük hacim gibi nedenlerden ötürü tercih edilmemiştir.

İncelenen modüler aralarında Infineon firmasının ürettiği, kollektör emitör gerilim seviyesi 750V olan ve kollektör akımı sürekli 450A olan üç faz tam köprü otomotiv uygulamaları için üretilmiş, Şekil 4.5 'te görseli verilen, FS820R08A6P2LB modülü seçilmiştir [20]. Modülün devre şeması Şekil 4.6 'da verilmiştir.



Şekil 4.5: Infineon FS820R08A6PLB tam köprü IGBT modülü.



Şekil 4.6: Infineon FS820R08A6PLB tam köprü IGBT modülü içyapısı.

4.2.2. Mikrodenetleyici

Elektrik motorunun istenilen şekilde verimli olarak kontrol edilmesini sağlayan tüm matematiksel işlemlerin ve hesaplamaların yapıldığı, kontrol algoritmasının çalıştığı bileşendir. Bundan ötürü mikrodenetleyici performansı ve güvenilirliği tüm invertörün performansını ve güvenilirliğini belirleyen başlıca etkidir. Bu bileşenin seçiminde, otomotiv ve askeri ürünler gibi yüksek güvenlik gerektiren uygulamalar için geliştirilmiş bir işlemci tercih edilmiştir. Şekil 4.7 'de mikrodenetleyici görseli verilmiştir.



Şekil 4.7: TMS570 serisi mikrodenetleyici.

Yapılan incelemeler neticesinde Texas Instruments firmasının üretmiş olduğu çift çekirdekli ve AEC-Q100, otomotiv standartlarına uygun TMS570 serisi bir mikroişlemci tercih edilmiştir [21].

4.2.3. Akım Sensörü

Akım sensörünün ayrı başlık altında incelenmesinin nedeni, kontrol algoritmasının çalışabilmesi için, elektrik motorunun fazlarından geçen akımın yönüne ve şiddetine ihtiyacı bulunmasıdır.

Gelişmiş invertörlerde, motor fazlarından geçen akım elektriksel olarak izole şekilde ve akım yönü bilgisiyle birlikte ölçülmelidir. İzolasyon konusu mikrodenetleyici gibi düşük gerilimde çalışan hassas elemanların, IGBT modülde anahtarlanan yüksek akımların neden olduğu elektriksel gürültülere maruz kalmaması ve hatasız çalışması açısından çok önemlidir. Geleneksel akım ölçüm yöntemi, değeri bilinen bir direnç üzerinden akan akımın oluşturduğu gerilimin genliğini ve polaritesini ölçerek yapılmaktadır. Bu yöntemde elektriksel izolasyon sağlanmadığı için yüksek gerilimlerde çalışan invertörlerde tercih edilmezler.

Ticari olarak mevcut olan, elektriksel olarak tamamen izole şekilde, Rogowski Bobini yöntemiyle ölçüm yapabilen akım sensörlerinin kullanımı tez konusu olan invertör için uygundur.

LEM firmasının üretmiş olduğu, tek paket için tüm fazları ölçebilen ve seçilen IGBT modül üzerine mekanik olarak montaj kolaylığı sağlayan Tablo 4.2 'de elektriksel özellikleri verilen HAH3DR 800-S07/SP1 modeli bir sensör tercih edilmiştir [21]. Seçilen ürünün görseli Şekil 4.8 'de verilmiştir.



Şekil 4.8: LEM HAH3DR 800-S07/SP1 modeli akım sensörü.

Tablo 4.2: Akım sensörü özellikleri.

| Parametreler | Birim | Özellikler | | |
|--|------------|---|------------|------|
| | | Min | Tipik | Maks |
| Ölçüm Aralığı | A | -800 | | 800 |
| Besleme Voltajı | V | 4,75 | 5 | 5,75 |
| Çalışma Ortamı Sıcaklığı | °C | -40 | | 125 |
| Çıkış Voltajı | V | $V_{out} = (U_C/5) \times (V_o + G \times I_p)$ | | |
| Hassasiyet | mV/A | | 2,5 | |
| Ofset Voltajı | V | | 2,5 | |
| Akım Tüketimi | mA | | 45 | 60 |
| Yük Resistansı | k Ω | 10 | | |
| İç Çıkış Resistansı | Ω | | 1 | 10 |
| Hata Yüzdesi | % | | ± 0.5 | |
| Hassasiyet Hatası | % | | ± 0.6 | |
| Elektriksel Ofset Voltajı | mV | | ± 4 | |
| Manyetik Ofset Voltajı | mV | | ± 3 | |
| Çıkış Ortalama Sıcaklık Kat sayısı V_{OE} | mV/°C | | ± 0.05 | |
| Kazanç Ortalama Sıcaklık Katsayısı | %/°C | | ± 0.03 | |
| Doğrusallık Hatası | % | -1 | | 1 |
| Basamak tepkisi 90 % $I_{P Ni}$ | μs | | 2 | 6 |
| Frekans Band genişliği | KHz | 40 | | |
| Tepe den tepeye hata voltajı | mV | | | 20 |
| Başlama zamanı | μs | | | 800 |
| Faz Kayması | ° | -4 | | |

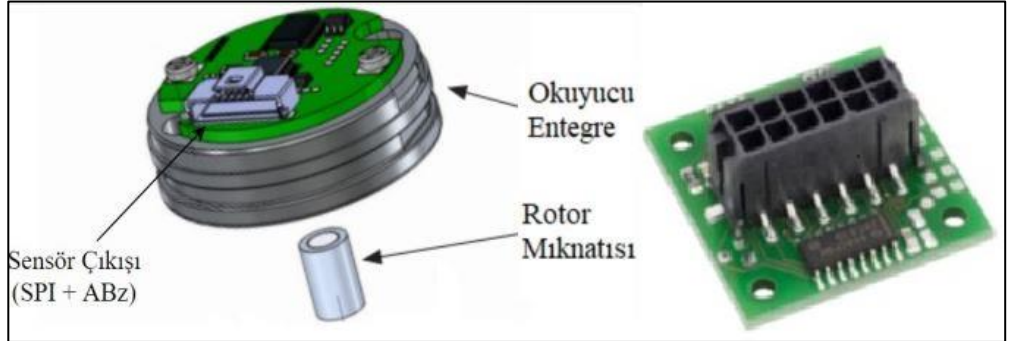
Akım sensörünün, birim amper başına ürettiği gerilimin hesabı Denklem 4.1 ile yapılmaktadır. Denklemde I_p sensörden geçen akımı, U_C besleme voltajını, V_{out} çıkış voltajını, V_o ofset voltajını, G ise hassasiyet hatasını göstermektedir.

$$I_p = \left(\frac{5}{U_C} * V_{out} - V_o \right) * \frac{1}{G} \quad (4.1)$$

4.2.4. Motor Pozisyon Sensörü Arayüzü

Elektrik motoru rotorunun, statordaki sarım oluk yapısına göre olan mekanik açısının, kontrol algoritması tarafından kesin olarak bilinmesi, yüksek verimli ve hassas kontrol için gereklidir. Ama kesin pozisyon bilgisine ihtiyaç olmadan da çalışabilen motor kontrol yöntemleri de vardır. Bu tarz yöntemler, pozisyon bilgisi gerektiren alan yönlendirmeli ve doğrudan moment kontrolü gibi hassas bir kontrol sunamazlar.

Elektrik motoru üreticileri, çeşitli sinyal çıkışlarına sahip farklı pozisyon sensörleri kullanabilmektedirler. Bundan ötürü invertörün birden fazla sensörü destekleyip kullanabilmesi, daha fazla uygulamada kullanılmasına imkân veren önemli bir özelliktir. Başlıca kullanılan pozisyon sensörleri, enkoder, resolver ve hall effect tipi sensörlerdir. Çalışma mantıkları ve ürettiği veriler sayesinde birbirlerinden ayrılırlar. Bu tez çalışmasında, mutlak açı bilgisi üreten ve seri olarak haberleşebilen RLS firmasının üretmiş olduğu RMF44SI serisi bir enkoder kullanılmıştır [23]. Şekil 4.9 'da sensör görseli ve Tablo 4.3 'te özellikleri verilmiştir.



Şekil 4.9: Motor pozisyon sensörü.

Tablo 4.3: Enkoder özellikleri.

| | |
|-------------------------------|---|
| Çıkış Kod Yapısı | Doğal Binary |
| Besleme | Vdd = 5 V \pm 5 % |
| Akım Tüketimi | Maks. 35 mA |
| Artırılmış Çıkışlar | A, B, Z, A-, B-, Z- (RS422) |
| Data Çıkışı | Seri data (RS422) |
| Data Girişi | Saat (RS422) |
| Doğruluk | Tipik. \pm 0,5° |
| Histerisiz | 0.18° |
| Çözünürlük | Her turda 80- 2,048 pals (320, 400, 500, 512, 800, 1,000, 1,024, 1,600, 2,000, 2,048, 4,096, 8,192 pals her turda) |
| Azami Hız | 30,000 d/d |
| Çalışma ve Depolama Sıcaklığı | -40 °C +125 °C -40 °C +105 °C (konnektörle) |

4.2.5. DC Bara Kapasitörü

İnvertörlerde anahtarlama elemanı ile birlikte DA bara kapasitörü en fazla strese maruz kalan elemandır. Anahtarlama nedeniyle kaynaktan çekilen değişken akımı, mümkün olduğu kadar sabit bir değerde tutmak amacıyla kullanılırlar. Kaynaktan çekilen akımın düzensiz olması invertörü besleyen kaynak için ciddi problem oluşturmaktadır. DA Bara kapasitörünün kullanılmadığı durumlarda, anlık akım ihtiyaçlarını sağlamak amacıyla invertörü besleyecek kaynağın gücünün, olması gerekenden daha yüksek ve çok kısa tepki süresine sahip olması gerekmektedir.

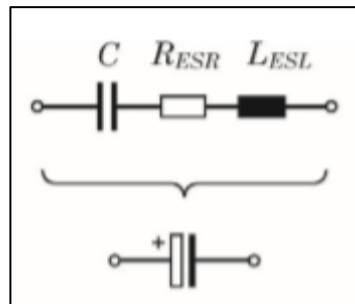
DC bara kapasitörü, yüksek güçlü invertörlerde en çok hacim kaplayan ve anahtarlama elemanı kadar maliyetli bileşenlerdir. Kapasitans, akım kapasitesi ve çalışma voltajı gibi değerlerin, diğer mekanik ihtiyaçlarda göz önünde bulundurularak uygun bir şekilde seçilmelidir. Ortaya çıkacak invertörün kutusunun hacmini büyük oranda DA bara kapasitörleri oluşturduğundan mümkün olan en az hacimde isterleri sağlayan ürünler tercih edilmelidir.

Kapasitörler elektronikte geniş bir alanda kullanıldığından, kullanım yerine ve şekline göre farklı yapılar da üretilirler ve kendi aralarında yapısal olarak ayrılırlar. Tablo 4.4 'te genel kapasitör tipleri ve performans özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.4: Farklı kapasitör yapılarının performans karşılaştırılması.

| Performans | Alüminyum | Film | Seramik |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Kapasitans | Yüksek | Orta | Düşük |
| Voltaj | Orta | Yüksek | Düşük |
| Akım Salınımı | Düşük | Yüksek | Orta |
| ESR | Düşük | Yüksek | Orta |
| Frekans | Düşük | Yüksek | Yüksek |
| Stabilite | Orta | Yüksek | Düşük |
| Voltaj Düşümü | Orta | Yüksek | Düşük |
| Sıcaklık Dayanımı | Orta | Düşük | Yüksek |
| Güvenilirlik | Düşük | Yüksek | Yüksek |
| Enerji Yoğunluğu | Yüksek | Düşük | Orta |
| Arıza Tipi | Açık Devre | Açık Devre | Kısa Devre |
| Arıza Nedeni | Sıcaklık Voltaj Akım | Sıcaklık Voltaj Nem | Sıcaklık Voltaj Titreşim |
| Maliyet | Yüksek | Orta | Düşük |

Her elemanda olduğu gibi kapasitörlerde de direnç ve endüktans gibi istenemeyen parazitik özellikler mevcuttur. Şekil 4.10 'da kapasitörün eşdeğer devresi verilmiştir [14].



Şekil 4.10: Kapasitör simgesi ve eşdeğer devresi.

Devreden de anlaşılacağı gibi kapasitansa seri olan direnç ve endüktör kapasitörün performansını olumsuz etkileyen parametrelerdir. İnvörtör için seçim yapılırken ihtiyaç duyulan rms akım değeri, çalışma gerilimi ve kapasitans değerini sağlaması, parazit parametrelerinin ve maliyetinin düşük olması gibi birtakım faktörlere özen gösterilmelidir. Tez konusu invörtörde seçilen IGBT modüle uyumlu kapasitör mevcuttur fakat temin edilmesinin zor ve maliyetli olması nedeniyle farklı

ürünler seçilmiştir. Yapılan çalışmalar sonunda hesaplanan verileri sağlayan kapasitörlerin düşük performanslı elektrolitik tip olduğu ve film tipindekilerin de ulaşılabilir olmadığı görülmüştür. Bundan ötürü Cornell Dubilier firmasının üretmiş olduğu Şekil 4.11’de görseli verilen 944U221K801ACI ürünü, uygun bir DA bara yapısı ile dört adet 220uF lık film kapasitörün paralel kullanılması hem maliyet hem de performans açısından uygun görülmüştür.



Şekil 4.11: DC bara kapasitörü.

4.2.6. Dijital ve Analog Giriş Çıkışlar

İnvertörün, kontrol edilebilmesi ve dış ortam ile haberleşebilmesi için dijital ve analog giriş çıkış yapılarına sahip olması gerekmektedir. Bu yapılar aynı zamanda elektriksel olarak korumalı ve invertör içindeki hassas devrelerin beslemelerinden izole olmalıdır. Böylece bu giriş çıkışlardaki limitlerin üzerindeki elektriksel sinyaller ve gürültülere karşı koruma sağlanmalıdır. Rakip ürün incelemelerine göre, giriş çıkış sayısı ve özellikleri belirlenmiştir. Tablo 4.5 ve 4.6’da kontrol ve güç kartında bulunan giriş çıkışların çalıştığı gerilim referans bölgeleri verilmiştir.

Tablo 4.5: Kontrol kartı giriş-çıkışları izole gerilim referansları.

| Kontrol Kartı | | |
|-----------------------------|------|-------------------------------|
| Giriş Çıkış İsmi | Adet | Çalıştığı 0V Referans Bölgesi |
| + 12V Besleme | 1 | GND-V |
| Gaz Pedalı | 1 | GND-V |
| İleri-Geri-Başlatma ve Fren | 1 | GND-V |
| Röle Sürücüler | 4 | GND-V |
| CAN BUS | 2 | GND-C |
| Seri Haberleşme (Enkoder) | 1 | GND-C |
| Resolver | 1 | GND-M |
| Analog Giriş (Sıcaklık) | 7 | GND-M |
| Analog Giriş (Akım) | 4 | GND-M |
| Analog Giriş (Voltaj) | 4 | GND-M |
| PWM Çıkışı | 6 | GND-M |
| Reset Çıkışı | 1 | GND-M |
| Hata Girişi | 6 | GND-M |
| Yedek | 1 | GND-M |

Tablo 4.6: Güç kartı izole gerilim referansları.

| Güç Kartı | | |
|-------------------------|------|-------------------------------|
| Giriş Çıkış İsmi | Adet | Çalıştığı 0V Referans Bölgesi |
| + 12V Besleme | 1 | GND-V |
| Analog Çıkış (VDC BUS) | 1 | GND-V |
| Analog Çıkış (Sıcaklık) | 3 | GND-M |
| + 5V Besleme | 1 | GND-M |
| Hata Çıkışı | 6 | GND-M |

GND-M Mikroişlemci, GND-C Haberleşme, GND-V araç ground referans seviyesini göstermektedir.

4.3. İnvörtör Tasarımı

Bu bölümün ilk başlığı, piyasada ticari olarak ulaşılabilen örneklerinin kullanıldığı araçların incelenmesini içermektedir. Hedef invörtörün tasarımında yol haritası oluşturmak amacıyla, yerini alacağı içten yanmalı tahrik sistemlerinin kabiliyetleri/özellikleri'nden başlanarak, ihtiyaçların sınırları belirlenmeye çalışılmıştır. Belirlenen ihtiyaçlar Tablo 4.7 'de verilmiştir.

Tablo 4.7: İnvörtör özellikleri.

| | |
|----------------------------------|----------|
| Azami Güç | 150 kW |
| Nominal Güç | 120 kW |
| Nominal Faz Akımı | 300 Arms |
| Azami DA Giriş Gerilimi | 500 Vdc |
| Kontrol Devresi Besleme Gerilimi | 12 Vdc |
| Dijital giriş-çıkış | 4 |
| Analog giriş | 1 |
| CAN haberleşme | 2 |
| Seri haberleşme | 1 |
| Sıcaklık sensörü girişi | 3 |
| Röle sürücü | 4 |

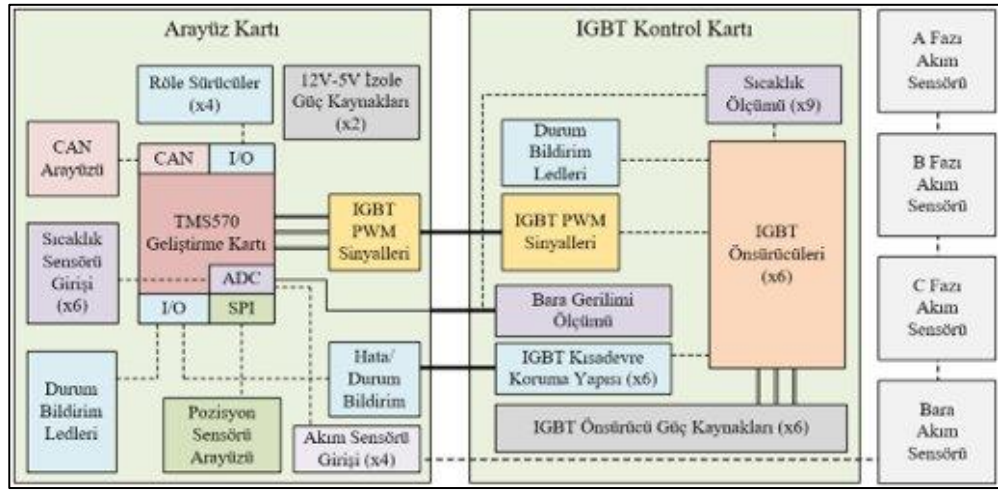
İnvörtördeki elamanların çalışma gerilimleri ile temel bir gruplandırma yapılmıştır. Yüksek gerilimlerde çalışan elemanlar ile düşük gerilimde çalışan elemanlar, elektriksel gürültü, izolasyon gibi konularda, dayanıklı bir tasarım olması nedeniyle iki ayrı PCB üzerine yerleştirilmiştir.

Düşük gerilimde çalışan elemanların bulunduğu PCB çoğunlukla kontrol elemanlarını içerdiğinden ötürü, kontrol kartı olarak isimlendirilmiştir. Kontrol kartında, mikrodenetleyici, haberleşme yapıları, düşük gerilimde çalışan diğer dijital ve analog devreler toplanmıştır.

Yüksek gerilim ile bağlantısı olan, IGBT ön sürücü, anahtarlamalı izole güç kaynağı, DA bara gerilimi ölçümü gibi yüksek voltaj ile bağlantılı devreler ise güç kartı adı verilen diğer bir PCB üzerinde toplanmıştır.

İki ana PCB üzerinden kurgulanan tasarım sonraki geliştirmeler için kolaylık sağlamaktadır. Örnek olarak daha yüksek güçlü bir invörtör ihtiyacı olduğunda kontrol yapısı değişmediğinden ötürü sadece güç kartında değişiklik yapılarak çözüm elde edilebilir. Kontrol kartında, haberleşme, giriş çıkış vb. kontrol kartına özgü bir özellikte değişim gerektiğinde ise sadece kontrol kartında yapılacak değişiklik ile

istenilene ulaşmak mümkün olacaktır. Şekil 4.12’de invertörün genel blok diyagramı görülmektedir.



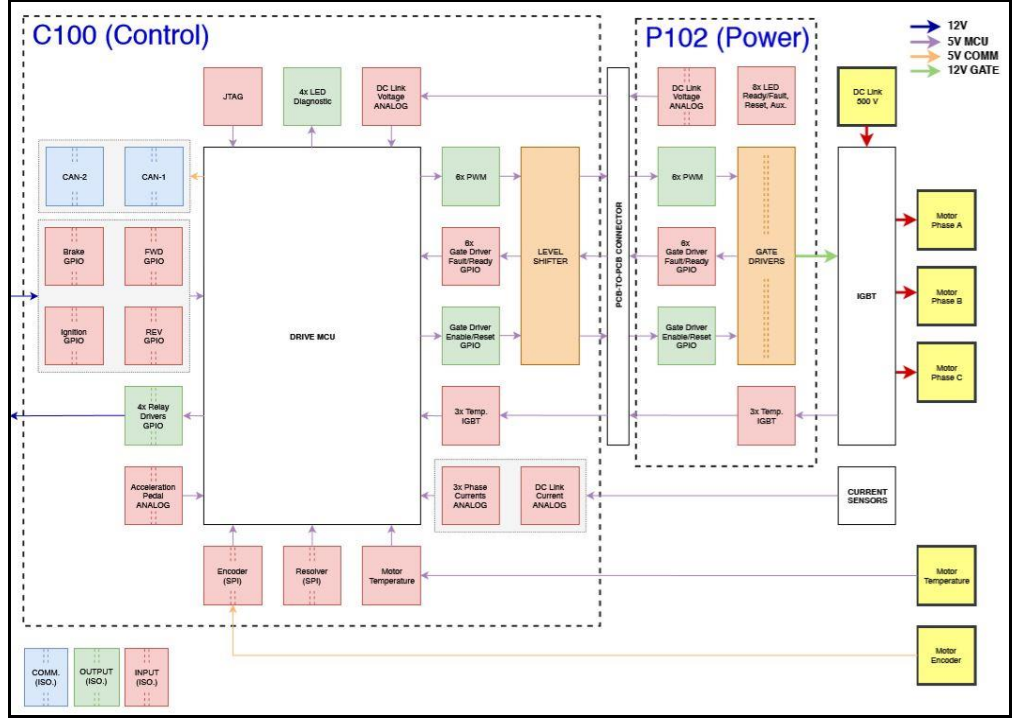
Şekil 4.12: V0 invertör blok diyagramı.

4.3.1. Kontrol Kartı Tasarımı

Düşük güçte çalışan, kontrol ağırlıklı görevleri olan devrelerin, yüksek güçte çalışan elamanların oluşturduğu gürültülerden etkilenmesini önlemek, servis kolaylığı ve invertör üzerinde daha sonra geliştirmeye imkân vermesi amacıyla genel invertör yapısı kontrol ve güç kartı olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu bölümde kontrol kartı tasarımı hakkında bilgi verilecektir.

Ürün hedefli her PCB tasarımında, ortaya çıkacak nihai PCB nin, ürünün mekanik ölçülerine göre ortaya çıkan sınırlı bir alana sığabilmesi gerekir. Araç tasarımında kullanılan bileşenlerin en düşük hacim ve ağırlıkta, yüksek kapasitede/özelliğe olması ana tercih sebebi olmaktadır. Buradan yola çıkarak, rakip ürünler de incelenerek invertörün geometrik sınırları öngörülmüştür. Bu öngörülen sınırlar ve planlanmış elektriksel özellikleri sağlayacak devrelerin yerleştirilmesi için gereken alan da göz önüne alınarak genel ölçüler taslak olarak belirlenmiştir.

Belirlenen elektriksel özellikler neticesinde ilk olarak invertör blok diyagramı olarak tasarlanmış ve parçalara bölünmüştür. Şekil 4.13’te invertörün blok diyagramı görülmektedir.



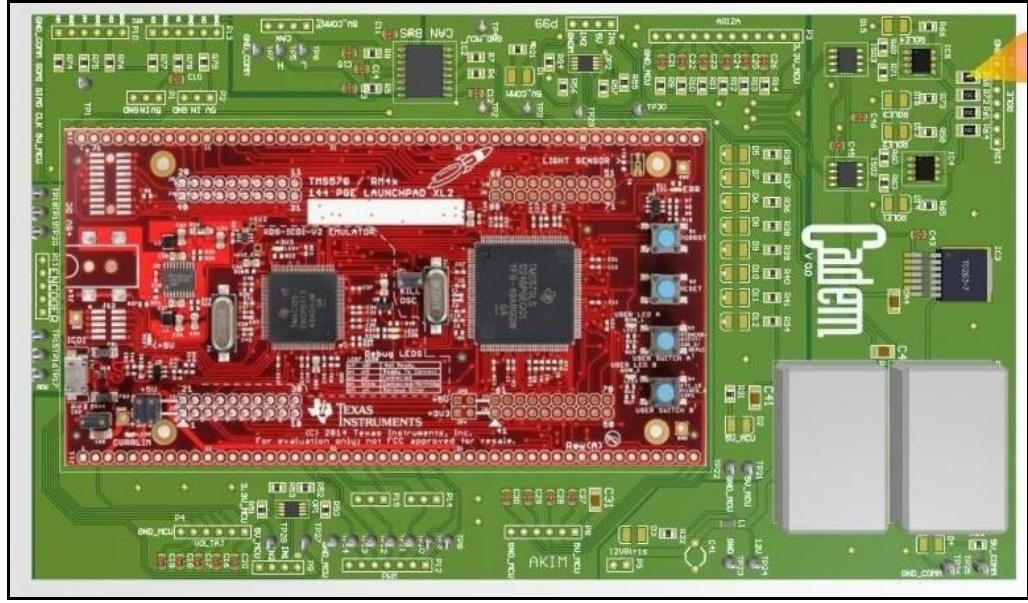
Şekil 4.13: İnvörtör donanımı blok diyagramı.

Şekil 4.13'ün içindeki kutucuklar oluşturulurken, belirli bir görevi içeren en küçük bütünsel bir devreyi ifade edecek şekilde bölünmüştür. Örnek olarak CAN-1 kutucuğu mikrodenetleyici CAN1 donanımının kullanımı için gerekli aktif ve pasif elamanları ifade etmektedir. Başka bir örnek olarak; Enkoder SPI kutucuğu seri haberleşme ile enkoder ile mikrodenetleyicinin haberleşmesini sağlayan aktif ve pasif elamanları ifade etmektedir.

Bu mantıkla tüm kutular belirlendikten sonra uygun komponent araştırmasına başlanmıştır. Tez hedefi olan invertör, araçlarda kullanılacağından ötürü seçilen komponentlerde, AEC Q100-Q101 standardına sahip ürünler tercih edilmiştir.

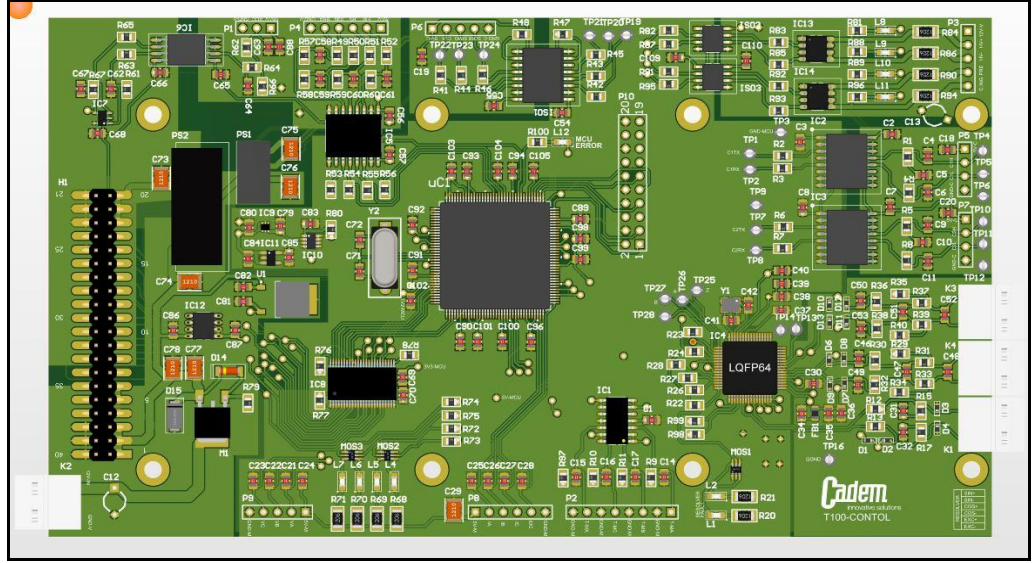
Tercih edilen ürünler belirlendikten ve şematik tasarım için gerekli olan uygulama notu gibi yardımcı dokümanlar da incelendikten sonra şematik tasarıma geçilmiştir.

İlk olarak V0 sayılabilecek mikrodenetleyicili PCB yi üretmek yerine, kutucuklardaki yapıların bulunduğu ve seçilen mikrodenetleyicinin hazır bir geliştirme kartının bulunduğu ve V0 sürücü için yapılan şematiklerin uygulanabileceği bir PCB hazırlanmıştır. Böylece kontrol kartı için belirlenen komponentlerin müstakil testleri ve birlikte çalışma performans testleri yapılmıştır. V0 sürücü ile test edilip doğrulanan devrelerin nihai kontrol kartında kullanımı kesinleştirilmiştir.

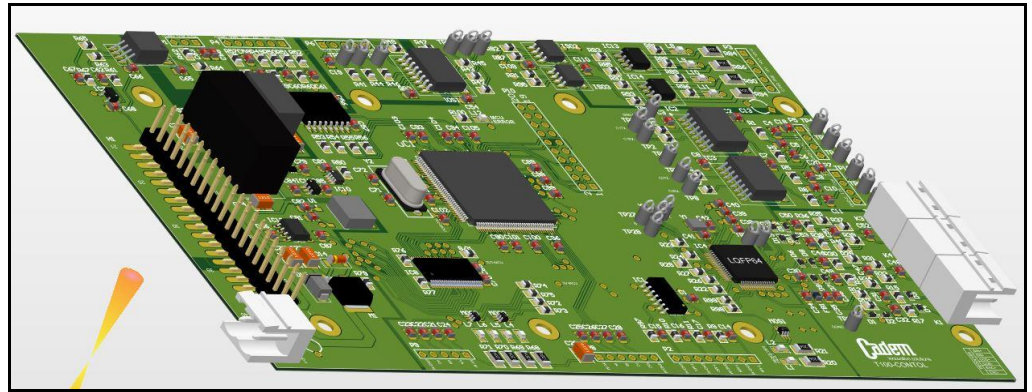


Şekil 4.14: V0 kontrol kartı tasarımı.

V0 kontrol kartı, testler sırasında çıkacak problemlerin kolay çözümü amaçlanarak geometrik sınırlar dikkate alınmadan tasarlanmıştır. Nihai olacak kontrol kartı ise tasarımında gürültülere karşı dayanıklı termal ve kullanılabilirlik ekseninde bir tasarım bakış açısı ile, geometrik sınırlar ve mekanik etkenler doğrultusunda şekillendirilmiştir. V0 sürücüsündeki iki PCB, mikroişlemcinin de diğer elemanlarla birlikte tek kartta birleştirilmesi neticesinde tek PCB olacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece nihai sürücüsündeki kontrol kartına ulaşılmıştır.



Şekil 4.15: Kontrol kartı tasarımı (önden görünüşü).



Şekil 4.16: Kontrol kartı tasarımı (yandan görünüşü).

4.3.2. Güç Kartı Tasarımı

İnvertör içindeki iki ana PCB 'den biri olan güç kartının tasarımı invertör tasarımının zorlayıcı kısmı olmuştur. Kontrol kartı ve IGBT modül arasına yerleştirilecek olması, yerleşeceği alanın sınırlı olması, üzerinde yüksek gerilimin dolaşması ve izolasyon gibi konular tasarım süresinin uzamasına neden olmuştur. Kontrol kartı tasarımında olduğu gibi kutucuklar ile bölümlere ayrıştırılmış ve parçalar halinde ele alınmıştır.

Diğer bir konu olarak, kart üzerinde 5V seviyesinde kontrol ve güç kartı ile ortak olan sinyallerin, IGBT tarafından oluşan anahtarlama gürültüsünden etkilenip, gürültünün kontrol kartına sirayet etmesini en aza indirecek şekilde bir tasarım

yapılmıştır. Kontrol kartından gelen DGM sinyalleri, IGBT önsürücü girişlerine en yakın noktada alçak geçirgen filtreden geçirilerek, önsürücü girişine gelecek gürültüler engellenmeye çalışılmıştır.

İnvertör gibi elektriksel güç işleyen sistemlerde, en çok yıpranan elamanların başında anahtarlama elemanı gelmektedir. Yüksek güçlü sistemlerde anahtarın akım atında aniden devre dışı kalması, özellikle uç noktalarda çalışırken, modülün hasar görmesine neden olur.

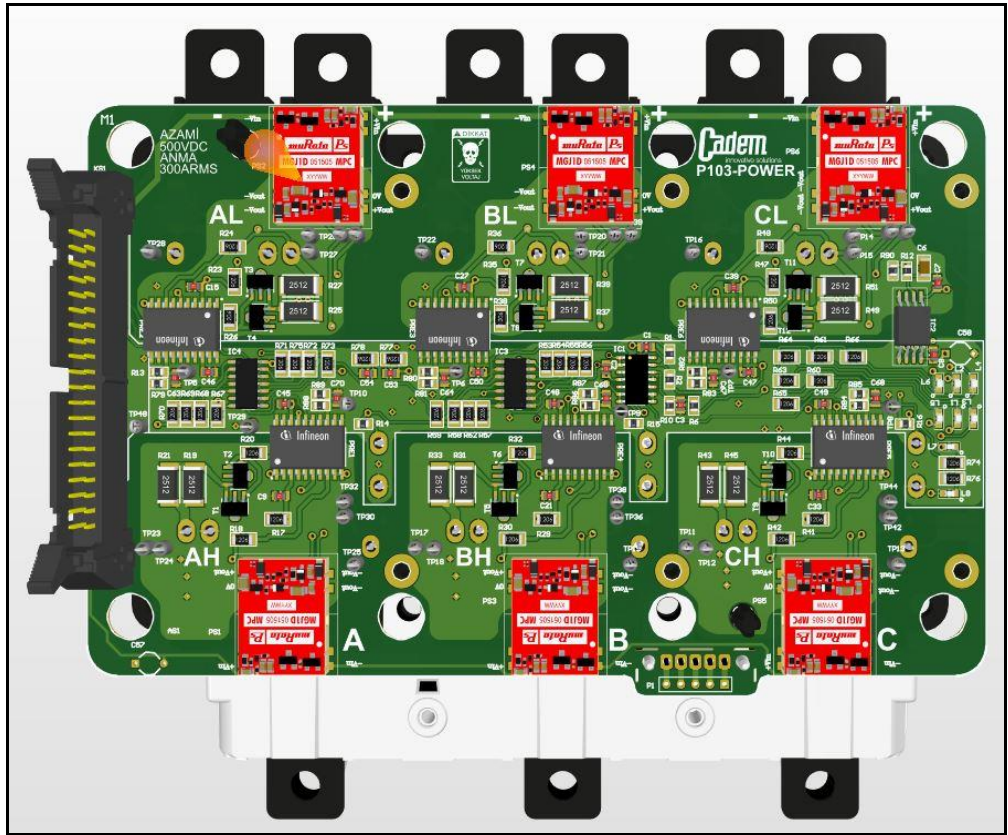
Güç kartının ana özelliği, modül içindeki anahtarların sağlıklı çalışması için gerekenleri sağlamasıdır. Bu nitelikler;

- Anahtar üzerinde oluşabilecek aşırı akım durumunda anahtarlamaı kapatmak ve durum hakkında bilgi üretmek
- Anahtarlama için gereken besleme voltajının seviyesini ölçmek ve nominal durumun dışında anahtarlamaı durdurmak ve durum hakkında bilgi üretmek.
- Miller kapasitans nedeni ile istenmeyen anahtarlamaı önleme devresine sahip olmak.
- IGBT lerin kapanmasını negatif voltaj ile gerçekleştirerek diğer anahtarların oluşturduğu gürültüler nedeniyle ortaya çıkabilecek istenmeyen anahtarlamaı önlemek.
- Anahtarlama kayıpları neticesinde oluşan sıcaklığı ölçmek ve mikrodenetleyici ile ölçülebilir hale getirmek.
- DC bara gerilimini izole şekilde ölçüp mikroişlemci tarafından okunabilir hale getirmek.

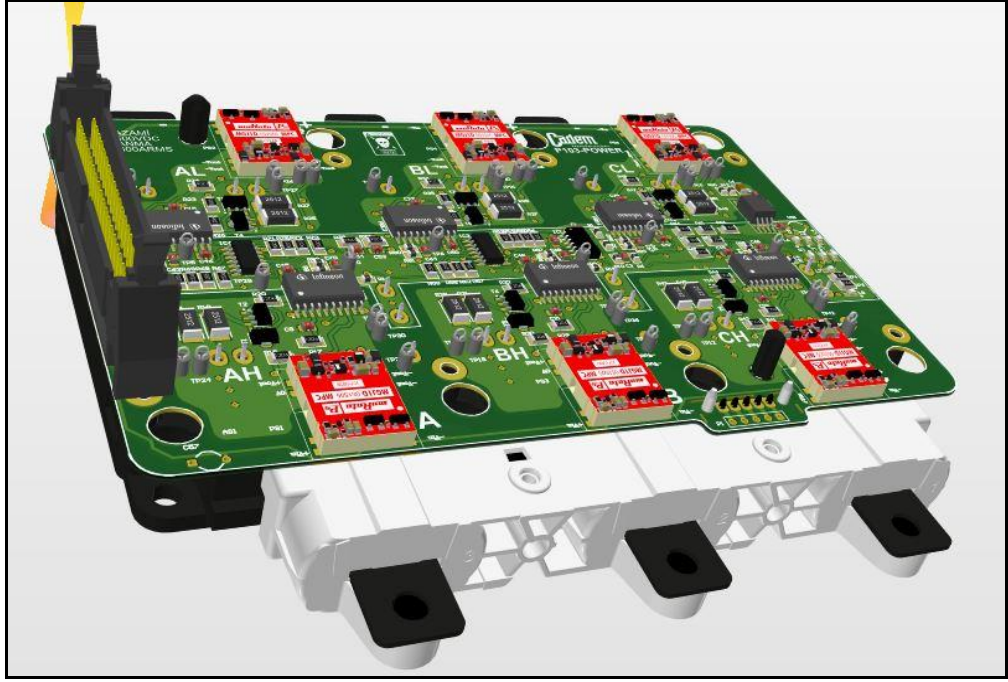
Yukarıdaki ilk dört madde, seçilen önsürücü entegresi ile sağlanmıştır. Önsürücü entegresi, aşırı akım durumunda ve izole güç kaynakları voltajlarının nominal sınırların dışına çıkması durumunda IGBT'leri uygun şekilde kapalı hale getirerek zarar görmesini engelleyip tek bitlik hata bilgisi üretmektedir. Böylece IGBT modül hakkında kontrol algoritmasına sürekli bir geri besleme yapılarak sistemin durumu hakkında bilgi verilmesi ve olumsuz durumlara karşı önlem alması sağlanmıştır. Önsürücü entegresinin giriş ve çıkış sinyalleri arasında izolasyon özelliği olduğu için harici bir izolasyon devresine ihtiyaç kalmamıştır.

IGBT 'nin çok hızlı ilettime geçmesi ve aşırı akım durumuna çok hızlı bir şekilde iletimden çıkması aşırı voltaj zıplamalarına neden olur. Aynı zamanda çok hızlı değişen akım di/dt ve gerilim dv/dt seviyesi elektromanyetik gürültüye de neden olur. Sağlıklı bir ilettime geçme hızı, sistemin yüksek akım geçen bölgelerindeki parazitik elemanlar göz önüne alınarak düşünülmelidir. Yeterince hızlı olmayan ilettime geçme hızı ise IGBT'lerin liner bölgede, tam ilettime geçmeden daha uzun süre kalmasına neden olur. Tam iletimde olmayan anahtar, geçirdiği akım nedeniyle üzerinde ısı üretir. Böylece verim düşüklüğü ve yüksek IGBT sıcaklığı görülür. Ayrıca IGBT'ler, transistörler gibi liner bölgede oransal olarak çalışmak için tasarlanmadığından dolayı, yavaş açma ve kapama süresi yarıiletkenin erken yaşlanmasına neden olur.

İletime geçme ve iletimden çıkma hızı IGBT için önemli olduğundan ötürü seçilen önsürücü entegresi, IGBT 'yi sürmek için yeterli akım kapasitesine sahip olmalıdır. Seçilen öncürücü entegresinin akım kapasitesi, istenilen hızlarda anahtarlama için yetersiz kaldığından ötürü iki tansistör çifti ile güçlendirilmiştir. Şekil 4.17 ve 4.18'de güç kartının tasarımı görülmektedir.



Şekil 4.17: Güç kartı tasarımı (önden görünüşü).



Şekil 4.18: Güç kartı tasarımı (yandan görünüşü).

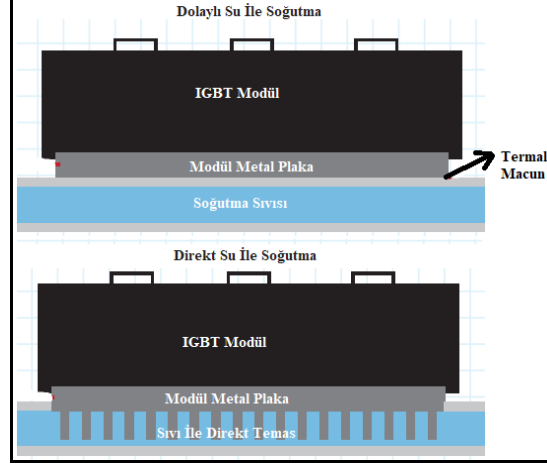
4.4. Soğutma Sistemi

Çoğu güç elektroniği tasarımlarında, ilk bakışta öngörülemeyen voltaj ve akımdaki anlık yükselmelerin, zamanla yarıiletkene verdiği zarar neticesinde arızalar meydana gelmektedir. Buna benzer diğer bir konu ise zaman içerisinde çalışma şartlarına bağlı olarak, anahtarlama elemanın maruz kaldığı anlık yüksek sıcaklık nedeniyle anahtarın zaman içerisinde yıpranmasıdır.

Uygun tasarlanan soğutma sistemi, anahtarın, kapasite olarak sınır bölgelerinde çalışırken üretebileceği ısı enerjisini sürekli olarak atabilecek kapasitede olmalıdır. Kullanım şartlarına bağlı olarak aşırı akım durumlarında da anahtarın üzerindeki ısıyı hızlıca alabilmelidir.

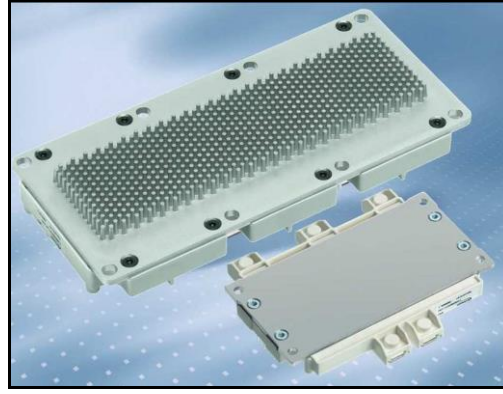
Tercih edilen IGBT modül, alışılmış örneklerinden (dolaylı sıvı soğutma) farklı bir soğutma yapısı ile üretilmiştir. Genellikle kullanılan yöntem, IGBT yarıiletken malzemenin altına izolasyon malzemesi ve onun altına da ısıl iletkenliği yüksek bir metal plaka ve ısının bu metal plaka ile dış ortama atılması şeklindedir. Bu yöntemin avantajı ise anlık sıcaklık yükselmelerine karşı başarılı bir koruma sağlamasıdır. IGBT modül altındaki plaka, metal bir kütleyle mekanik olarak montajlı olduğundan, soğutma sistemindeki sıvının arıza nedeni ile akışının durması veya

tamamen tükenmesi gibi durumlarda, metal kütle nedeniyle oluşan ısıl sığa nedeniyle ani sıcaklık değişimlerini engeller. Böylece kontrol devresi, sıcaklıktaki problemi fark edip tepki göstermesi için yeterli zamanı bulabilmektedir [15].



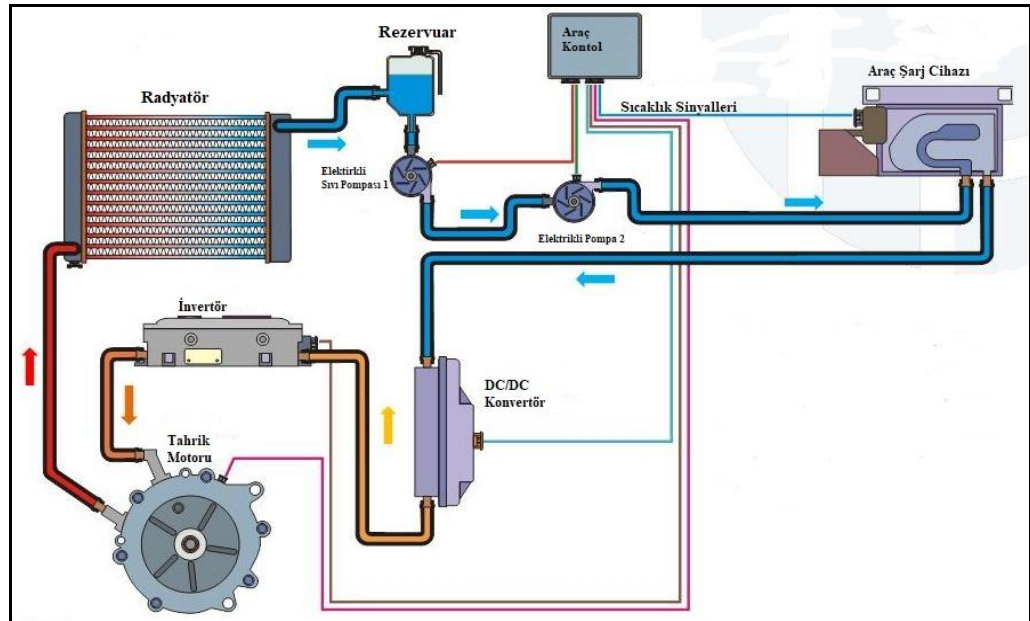
Şekil 4.19: Dolaylı ve direkt su ile soğutma yapısı.

Şekil 4.19’da dolaylı ve direkt olarak sıvı soğutma yöntemi gösterilmiştir. İnvörtör için seçilen IGBT modülde ise direkt sıvı soğutma yapısı mevcuttur. Direkt soğutma sisteminde yarı iletken altındaki metal plaka, su ile direkt olarak temas edecek ve sıvı-metal temas yüzey alanının artırılması amacıyla, pin şeklinde çıkıntılara sahip olacak şekilde üretilmiştir. Bu yapı, yarı iletken ile soğutma sıvısı arasındaki termal direnç etkisi gösteren yüzey sayısını azaltarak, daha etkin bir soğutma performansı sağlamaktadır. Bu sistemin dezavantajı ise, soğutma sıvısının arıza nedeniyle boşalması durumunda, dolaylı soğutma sistemindekine göre modüle mekanik olarak daha az kütlede metal montajlı olması neticesinde, daha düşük termal sığaya sahip olmasıdır. Düşük termal sığa nedeniyle de ani sıcaklık yükselmesi söz konusu olabilmektedir. Bu yükselme hızlı olduğundan, kontrol sisteminin hızlı davranıp anahtarlamayı kapatması nispeten daha zor olmaktadır. Şekil 4.20 ‘de direkt sıvı soğutma ve dolaylı soğutma arasındaki mekanik fark verilmiştir [16].



Şekil 4.20: Dolaylı ve direkt su ile soğutma yapısı görünümü.

Tahrik sistemi; invertör, elektrik motoru ve aktarma organları olarak üç ana unsurdan oluşmaktadır. Soğutma sistemi ise kaybın fazla olduğu bileşenlerdeki oluşan ısıyı başarılı şekilde atmak üzerine kurgulanmalıdır [17].



Şekil 4.21: Elektrikli tahrik sistemi genel soğutma sistemi.

Şekil 4.21’de elektrikli araç üzerinde olabilecek soğutma sistemine ihtiyaç duyulan bileşenler gözükmemektedir. En fazla ısı üreten bileşenler, az üretenleri gereksiz ısıtmaması için sıvı hattının en sonlarına doğru yerleştirilmiştir. Sıvı hattının sonuna doğru tahrik sisteminden toplanan ısı, radyatör ile atmosfere atılır [9].

5. TESTLER

Testler iki kısma ayrılmıştır. İlk kısım donanım tasarımı aşamasında, sinyal mertebesinde yapılan ve osiloskop, multimetre, vb. ölçüm aletleri ile gerçekleştirilen testler, ikinci kısım ise sistem bazında, verim, güç, dalga şekilleri ile ilgili olan testlerdir.

Kontrol kartı donanımsal testleri;

- Mikro işlemci çalışma performansı değerlendirmesi,
- İzole güç kaynakları gerilim ve termal durumların gözlenmesi,
- Analog ve dijital izolasyon entegrelerinin fonksiyonu,
- Seri haberleşme entegresi fonksiyonu,
- CAN BUS entegresi fonksiyonu,
- Liner voltaj regülatörlerinin gerilim ve termal durumları gözlemi,
- DGM sinyalleri,
- Röle sürücü devrenin fonksiyon ve termal gözlemi,
- Lojik gerilim seviyesi dönüştürücü entegresi fonksiyonu,

Anahtarlama yokken ve anahtarlama varken incelenip, anahtarlama neticesinde oluşan elektriksel gürültüden nasıl etkilendiği gözlenmiştir.

Güç kartı donanımsal testleri;

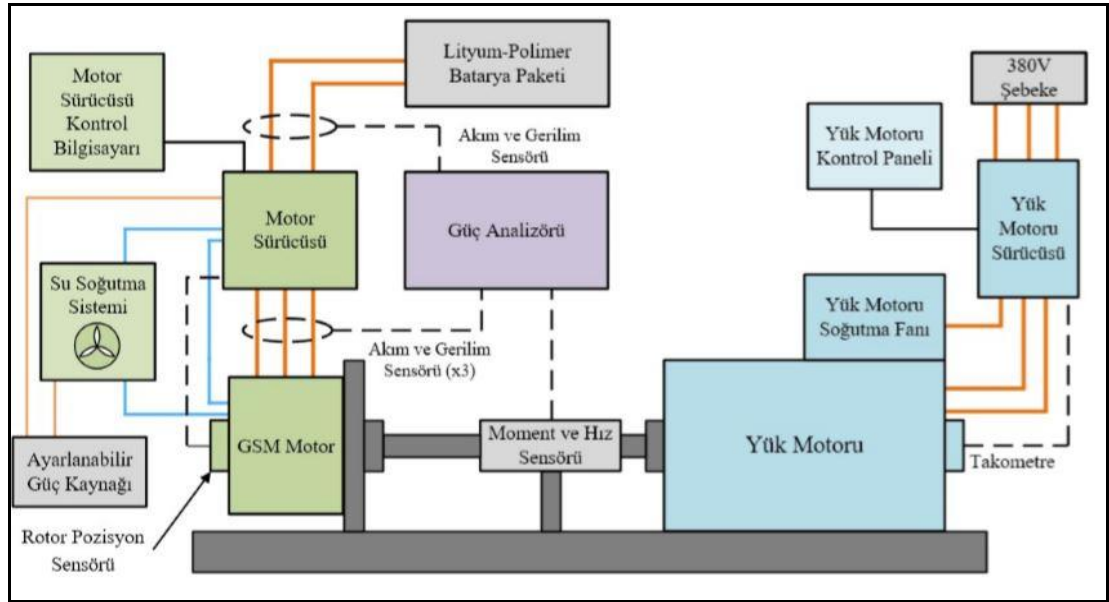
- İzole anahtarlama güç kaynakları gerilim, gürültü ve termal gözlemi,
- DA bara izole ölçüm devresi fonksiyon testi,
- Diagnostik devresi fonksiyonu ve gürültüden etkilenme gözlemi,
- Önsürücü entegresi fonksiyonu,
- Önsürücü entegresi akım çıkış güçlendiricisi fonksiyonu,
- IGBT anahtarlama performansı ölçümü,
- Güç kartı genel termal gözlemi,

Güç kartı için olan testler de kontrol kartına benzer şekilde, anahtarlama yokken, anahtarlama yapılırken ve elektrik motoru çalışırken gerçekleştirilmiştir.

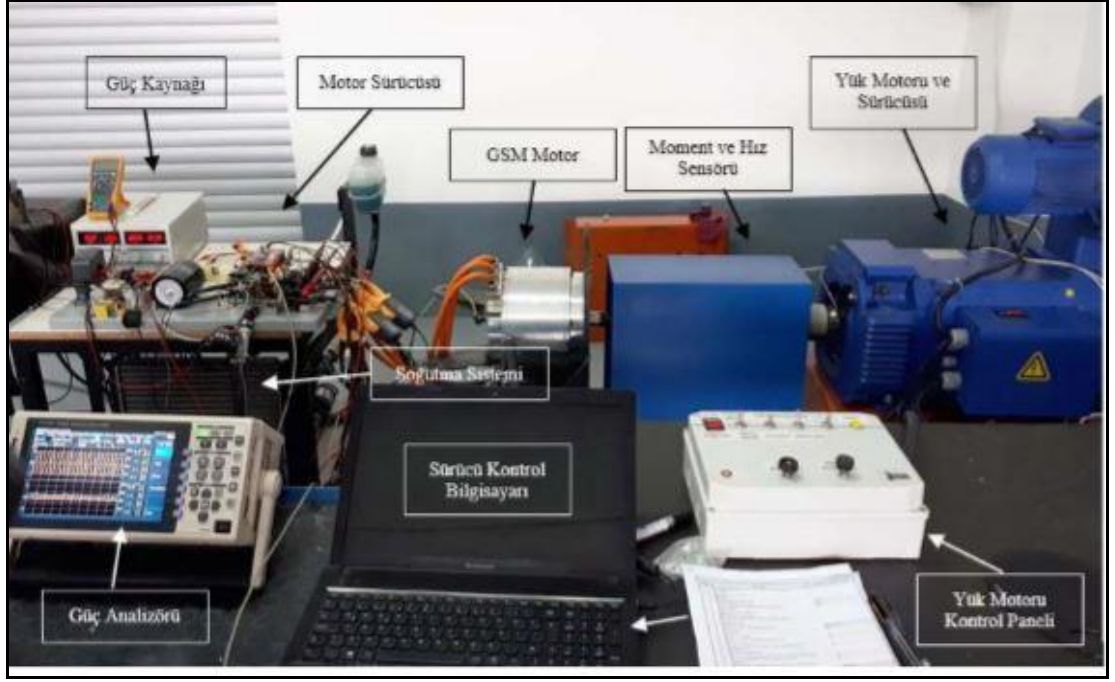
İkinci kısım testlerinde ise, ortaya çıkan tasarımlar birleştirilip, invertör ortaya çıkarılıp, testler Cadem A.Ş. bünyesinde bulunan ölçüm aletleri ve test düzeneği üzerinde, test düzeneğinin sınırları içerisinde belirli bir seviyeye kadar yapılmıştır. Test düzeneği oluşturulurken, araç üzerindeki koşullara yakınsamak amacıyla, düzenekte, ortalama bir elektrikli araç üzerinde bulunan soğutma sistemi (fan, pompa, radyatör, vb.) elemanları kullanılmıştır.

İnvertör DA besleme kaynağı olarak 0-300 V, 45 A DA güç kaynağı, firma bünyesinde prototip olarak üretilen 300 V seviyesinde Li-Po batarya paketi ve hazır olarak satın alınan 450 V NMC lityum tabanlı batarya paketi kullanılmıştır. İlk fonksiyonellik testleri, DC güç kaynağı ile düşük gerilim (30-50 V) seviyelerinde yapılmış daha sonra testler ilerledikçe, akım, gerilim ve güç seviyesi yükseltilmiştir.

İnvertör testlerinde kullanılan EM, Cadem A.Ş. bünyesinde elektrikli ve hibrit araçlarda kullanılacak nitelikte tasarlanan ve prototip olarak üretilen 45 kW gücündeki içten mıknatıslı senkron elektrik motoru ile yapılmıştır. Şekil 5.1'de test düzeneğinin blok diyagramı, Şekil 5.2 'de test düzeneğinin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 5.1: Test düzeneğinin blok diyagramı.



Şekil 5.2: Test düzeneği.

Tablo 5.1: Test düzeneği bileşenleri özellikleri.

| | |
|--------------------------|---|
| Yük Motoru | 75 kW çıkış gücüne, 358 Nm çıkış momentine, maksimum 5000 rpm dönüş hızına sahip fırçalı DA motor |
| Yük Motoru Sürücüsü | 75 kW, dört bölge çalışabilen DA motor sürücüsü |
| Güç Analizörü | 4 adet akım, 4 adet gerilim, 1 adet moment ve 1 adet hız sensörü giriş kanalına sahip güç analizörü |
| Güç Analizörü Sensörleri | 200 Arms alternatif akım (3 adet), 500 A doğru akım (1 adet) sensörü, 4 adet 0-1000 V gerilim sensörü |
| Moment sensörü | 0-1000 Nm ölçüm aralığına sahip moment sensörü |
| Batarya paketi 1 | 22 kWh, 296 V anma gerilimine sahip Lityum-Polimer batarya paketi |
| Batarya paketi 2 | 39 kWh, 444V anma gerilimine sahip Lityum-Polimer (NMC) batarya paketi |
| Güç kaynağı 1 | 30 V/6 A ayarlanabilir güç kaynağı |
| Güç kaynağı 2 | 300 V/45 A ayarlanabilir güç kaynağı |
| Soğutma sistemi | 0.3 bar basınçta 15 lt/dk debiye sahip sulu soğutma sistemi |

Test düzeneği üzerinde bulunan yük motoru, her iki yöne dönebilme ve moment uygulama, dört bölge çalışabilme özelliğine sahiptir. Böylece gerçek şartlarda yolda ilerleyen bir aracın tahrik sisteminin karşılaştığı durumlar büyük ölçüde test düzeneği üzerinde yapay olarak oluşturulabilmektedir. Güç analizörü sayesinde, invertörün DC

giriş gerilim ve akımı, motor fazlarında oluşturduğu gerilim ve akımın genliği ve dalga şekilleri ölçülüp üzerinde, güç, verim ve harmonik analizleri yapılabilmektedir. Daha sonra güç analizörünün kayıt özelliği ile test süresince toplanan veriler bilgisayar ortamında işlenebilmektedir. Tablo 5.1’de test düzeneği bileşenlerinin özellikleri verilmiştir.

Sistem testleri;

- Belirli gerilim ve akımlardaki faz çıkışları gerilim şekilleri,
- Motor pozisyon sensörü okuma fonksiyon testi,
- Anahtarlama varken CAN BUS haberleşme testi,
- İnvvertör verimi gözlemi,
- Elektrik motoru ve invertörün, araçtaki gibi aynı soğutma hattına seri olarak bağlanması sonucundaki soğutma performansı gözlemi,

İnvvertörün ürün olarak ele alındığı, sistemsel bazda testler yapılmıştır.

5.1. Kontrol Kartı Testleri

Fonksiyonellik testlerine başlayabilmek için kontrol kartı üzerine gömülen mikrodenetleyicinin içine program yüklenmelidir. V0 invetör üzerinde kullanılan geliştirme kartı, kolay kullanım amacı ile üzerinde bulundurduğu USB bağlantı donanımı sayesinde kolay şekilde bilgisayara bağlanıp programlanabilme özelliğine sahiptir. Seri üretim hedefli bir tasarımda hazır alınan geliştirme kartının kullanılması, üzerinde bulundurduğu gereksiz donanımlar nedeniyle fazla yer işgal etmesi ve yüksek maliyete sahip olmasından ötürü tercih edilmemelidir. Kontrol kartına gömülen mikroişlemcinin tek başına bilgisayara bağlanma özelliği olmadığından ötürü uygun bacakları (JTAG) bir soket ile programlayıcı ile bağlanabilir hale getirilmelidir.

Kontrol kartına enerji verilerek, ilk olarak JTAG bağlantısı test edilmiş ve mikroişlemci programlanabilmiştir. Yapılan testler neticesinde belirli bir DA gerilim seviyesine kadar invertör, JTAG bağlantısı üzerinden kontrol edilebilmiştir. DA besleme geriliminin 250 V üzerine çıktığı testlerde anahtarlama nedeniyle oluşan gürültülerin bağlantıda kopmalara neden olduğu görülmüştür. JTAG bağlantısının ana amacının

mikroişlemciyi programlamak oluğu düşünülürse, programlama testi başarılı olmuştur.

İnvertörün dış dünya ile haberleşmesini sağlayan donanımları arasına dört adet dijital giriş çıkış eklenmiştir. İnvertör kutusu dışı ile elektriksel bağlantısı olan donanımların, olumsuz bir durumla karşılaştığında mikrodenetleyici gibi invertör için kritik öneme sahip elamanlara zarar vermesini önlemek amacıyla elektriksel olarak birbirilerinden izoleli olmalıdırlar. İnvertör çalışırken yapılan testler neticesinde ground referansları arasında yapılan gerilim ölçümleriyle izolasyon fonksiyonellik testleri başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Yeni nesil araçlarda, araç üzerinde kullanılan bileşenlerin birbirleri arasındaki iletişimi CAN üzerinden yapılmaktadır. İnvertöre eklenen CAN haberleşme donanımının osiloskop ile donanımsal testleri gerçekleştirilip, fonksiyonellik testleri de JTAG bağlantısının, elektriksel gürültü nedeniyle, invertör kontrolü için kullanılmadığı gerilim seviyelerinde, invertör kontrolü CAN üzerinden gerçekleştirilerek yapılmıştır.

EM rotorunun pozisyon bilgisini sağlamak amacıyla seçilen enkoderin, mikrodenetleyici ile izole şekilde haberleşmesini sağlayan donanımın testi de, motor çalışırken gerçekleştirilip, sorunsuz şekilde pozisyon bilgisinin mikrodenetleyici tarafından okunduğu doğrulanmıştır.

Kontrol algoritması tarafında hesaplanan DGM sinyalleri tercih edilen mikroişlemcinin donanımsal özelliğinden ötürü 3,3 V gerilim seviyesinde üretilmektedir. 3.3V 'luk seviye, kullanılan önsürücü entegresi 5 V'luk DGM sinyallerini kabul ettiğinden ötürü mikroişlemci ve önsürücü arasına gerilim yükseltici bir entegre devre eklenmiştir. Eklenen bu devrenin giriş ve çıkış ölçümleri yapıp DGM sinyallerinin sorunsuz şekilde 3,3V seviyesinden 5V seviyesine dönüştürüldüğü gözlenmiştir.

Kontrol kartı üzerinde bulunan tüm aktif elemanların, kullanıldığı izole gerilim referansı bölgesine ve kendi yapısına uygun şekilde enerji ihtiyaçları, izole SMPS ve doğrusal regülatörler ile sağlanmıştır. Tablo 5.2'deki "test sonucu" başlıklı sütundaki başarılı ifadesi, gerilim seviyelerinin sistem çalışırken düşmediğini ve termal olarak sınırların dışına çıkmadığını ifade etmektedir. Kısmen başarılı ifadesi ise regülatörlerin gerilim seviyelerinin normal seviyede olduğunu ama çalışırken ısındığı için termal tasarım konusunda tasarım değişikliğine ihtiyaç duyulduğunu ifade etmektedir.

Tablo 5.2: Kontrol kartı güç kaynakları testi.

| Kaynak Türü | Referans Bölgesi | Gerilimi | Test Sonucu |
|-----------------|------------------|----------|-----------------|
| SMPS | GND-MCU | 5V | Başarılı |
| SMPS | GND-COM | 5V | Başarılı |
| Liner Regülatör | GND-MCU | 3,3V | Kısmen başarılı |
| Liner Regülatör | GND-MCU | 1,2V | Kısmen başarılı |

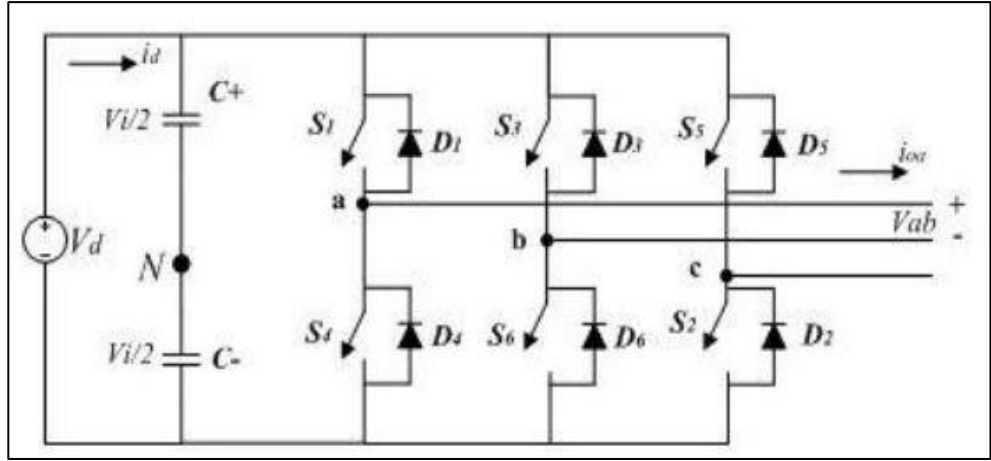
Dijital girişlerle birlikte dış ortam ile haberleşmesini sağlayan dört adet izole giriş çıkışın yanında, dış ortamdan da analog ölçümler yapabilecek bir devre eklenmiştir. Bu devrenin asıl amacı, GND-V referans seviyesinde 10 V gerilimde bir potansiyometre (gaz pedalı) besleyerek orta noktasındaki gerilimi ölçüp mikrodenetleyiciye sunmaktır. Yapılan testler neticesinde bu devrenin görevini yerine getirdiği görülmüştür. Potansiyometre bağlanarak invertöre moment referansı sağlanmıştır.

GND-V referansında çalışan dört adet röleyi sürebilecek sayıda ve güvenlik açısından GND-M referansından izole şekilde tasarlanan, opto-mosfet yapıları endüktif yük sürmeye uygun, devrenin de testleri invertör beslenirken kullanılan DA kaynağı besleme hattı rölesini, sorunsuz şekilde sürmüştür.

5.2. Güç Kartı Testleri

Testler başlığı altında belirlenen sıraya göre güç kartı testleri gerçekleştirilmiştir. İzole anahtarlama güç kaynakları, gerilim, gürültü ve termal gözlemi konusunda;

Üç fazlı invertör topolojisi gereği, 6 adet anahtarlama elemanına ihtiyaç vardır. Bu elemanların kapı sürme devresinde kullanılan besleme kaynaklarının, ilgili anahtarın, tam köprü devresinde bulunduğu yere göre kendi aralarında izole olması gerekmektedir. Aksi takdirde fazlar ve negatif DA bara arasında kısa devreler meydana gelebilmektedir.



Şekil 5.3: Üç fazlı invertör topolojisi.

Şekil 5.3 'te verilen devreye göre, S4, S6 ve S2 anahtarları için emitor ucu negatif DA bara seviyesindedir. Bu üç anahtar ortak gerilim referansına göre çalıştığından ötürü tek bir kaynak tarafından beslenebilir. S1, S3 ve S5 anahtarlarında ise durum farklıdır. Emitör uçları sırasıyla a, b ve c fazlarında olduğundan ötürü, gerilim referansları faz voltajıyla birlikte IGBT'lerin açık-kapalı durumlarına göre faz voltajları ile birlikte sürekli değişkendir. Bu nedenle ortak bir kaynak tarafından beslenmeleri mümkün değildir.

Yüksek akım ve gerilimde anahtarlama yapılan tüm uygulamalarda, anahtarlamanın ürettiği elektriksel gürültü üzerinde özellikle durulmalıdır. Mümkün olduğunca düşük empedanslı bağlantılar ve elektriksel olarak izole devreler tercih edilmelidir. Buradan yola çıkarak daha sağlıklı ve güvenli bir anahtarlama kontrolü için her IGBT besleme kaynaklarının birbirlerinden izole olmaları gereklidir. Yapılan ölçümler neticesinde seçilen 10 kHz anahtarlama frekansında, kullanılan +15 V, +5 V çıkış gerilimine sahip SPMS'lerin motor sürülürken alınan ölçümler neticesinde, gerilim seviyesinin olması gerektiği seviyede sabit ve gürültü seviyelerinin uygun olduğu gözlenmiştir.

DA bara izole ölçüm devresi fonksiyon testi;

İnvertörün besleme kaynağının voltajını ölçebilmesi ve bu ölçüm neticesinde değerlendirme yapıp aksiyon alması güvenlik ve performans konuları için gereken bir özelliktir. Normal seviyeler dışındaki giriş voltajını algılaması ve kendini kilitlemesi güvenlik açısından önemli bir yetenektir. Bu kazanımlardan ötürü güç kartına, +DA ile -DA baralarının gerilimlerini bir direnç bölücü üzerinden uygun bir seviyeye

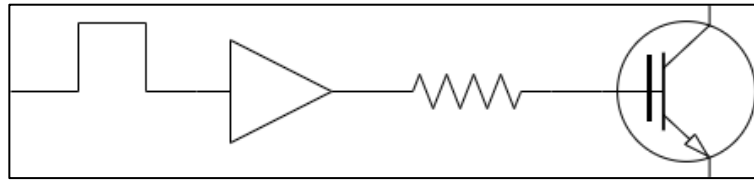
dönüştürüp izole şekilde ölçebileceğ devre eklenmiştir. Motor sürülürken devrenin gürültüden etkilenmeden istikrarlı şekilde çalıştığı gözlenmiştir.

Diagnostik devresi fonksiyonu ve gürültüden etkilenme gözlemi;

İnvertör, elektrikli ve hibrit araçlara yönelik bir hedefi olduğundan ötürü, hızlı servis ve arıza tespiti için diagnostik özelliğine sahip olmalıdır. Bu özelliği sağlamak amacıyla, otomotiv standardına uygun, IGBT aşırı akım ve ilgili anahtar beslemesinin gerilim seviyesinin kontrolü gibi özellikleri olan, bir önsürücü entegresi seçilmiştir. Her IGBT'ye ait önsürücü entegrenin ürettiği hata ve hazır sinyallerin, anahtarlama sırasında oluşan gürültülerden etkilenmemesi için filtreli olarak karşılaştırıcı ve yükseltici bir entegre devre ile mikroişlemciye gönderilmiştir. Diagnostik özelliğini test etmek için devreye kasıtlı olarak müdahale edilerek, aşırı akım ve izole güç kaynağının voltajları nominal değerlerin dışına çıktığında, yapının görevini yerine getirdiği ve algoritmanın invertörü güvenli şekilde kapattığı gözlenmiştir.

Önsürücü entegresi fonksiyonu;

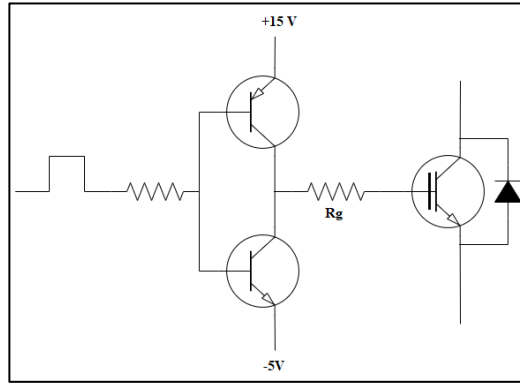
En temel IGBT anahtarlama işlemi, IGBT'nin kontrol ucuna belirli bir eşik değerin üzerinde voltaj uygulandığında, üzerinden akımın geçmeye başlaması olarak tanımlanabilir. Çoğu geleneksel invertörde, herhangi bir izolasyon entegresi veya izolasyon sağlayan bir yapıdan sonra, IGBT gate kapasitansını istenilen hızda şarj edebilecek akım seviyesine sahip, düşük güçlü, Şekil 5.4 'te gösterilen anahtar/yükseltici kullanılarak gerçekleştirilir.



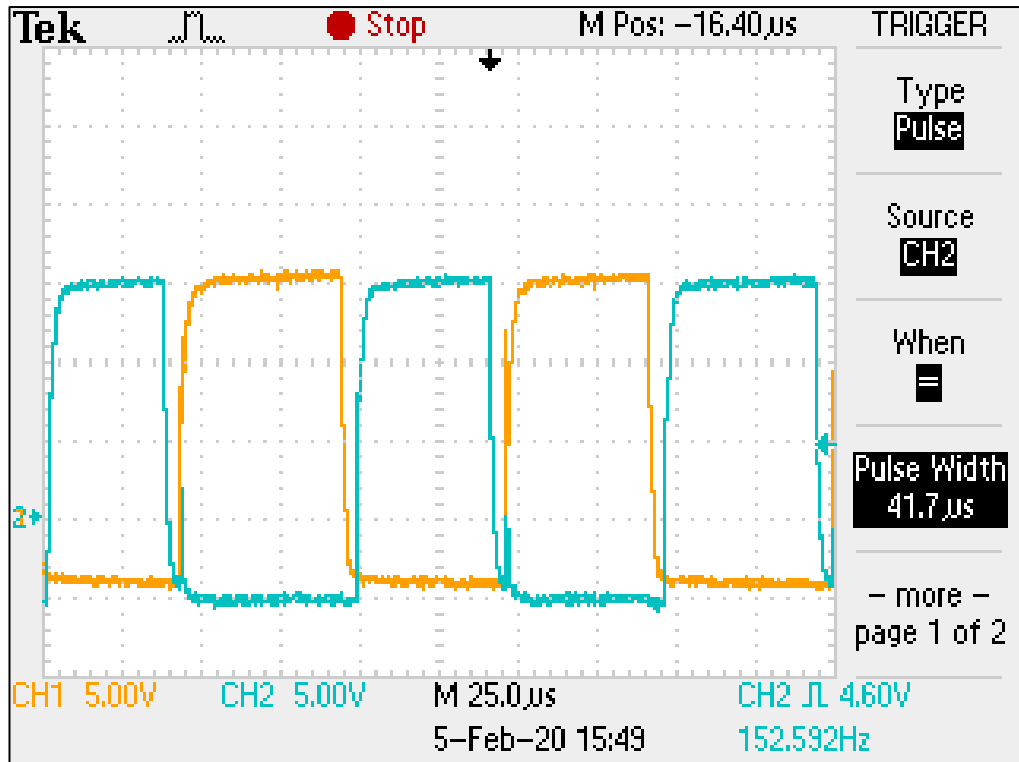
Şekil 5.4: Temel IGBT anahtarlama devresi.

Bu tarz basit bir devre temel anahtarlama işlemleri için yeterli olabilir. Fakat invertör gibi yüksek güçlerde endüktif yükler ile karşılaştığında yetersiz kalırlar. Tez konusu olan invertörde ise IGBT pozitif ve negatif gerilimde anahtarlama yapabilen, aşırı akım, düşük besleme voltajı gibi olumsuz durumlara karşı korumalı, bu tarz durumlar oluştuğunda bilgi üretebilen ve invertör gibi topolojilerde oluşan olumsuz durumlara karşı koruma özellikleri olan bir önsürücü entegresi seçilmiştir. Seçilen önsürücü entegresinin çıkış akımının istenilen hızda anahtarlama hızı için yetersiz

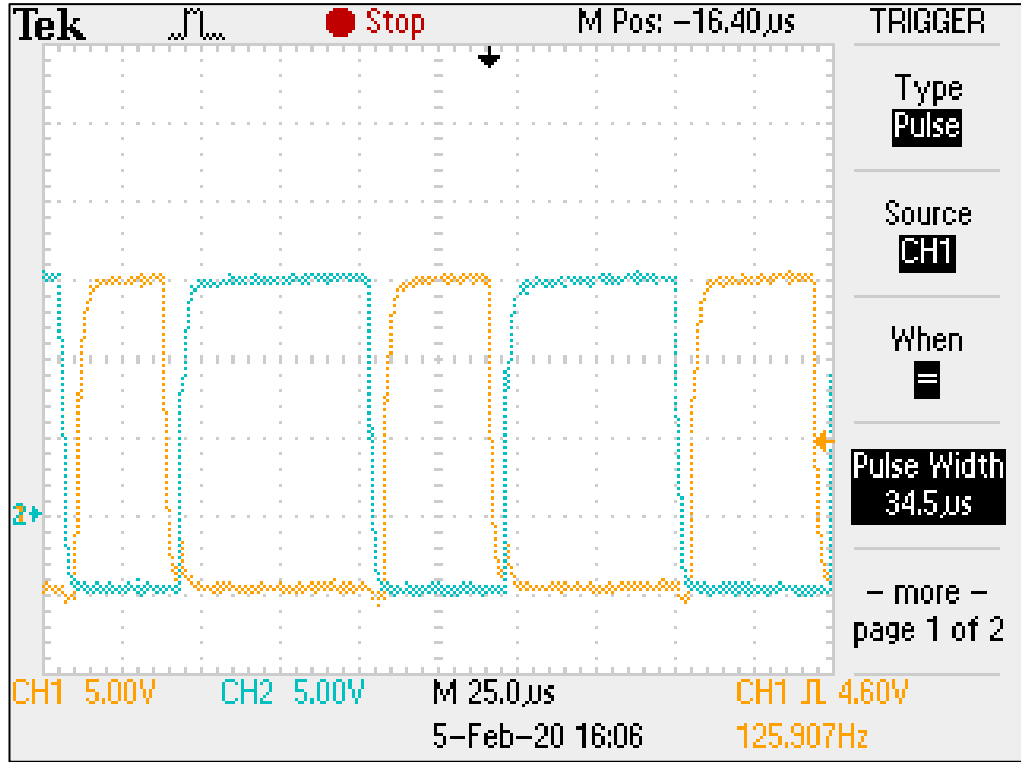
kalmasından ötürü, Şekil 5.5 'ta devresi gösterilen NPN ve PNP iki adet transistör çifti ile güçlendirme yapılmıştır. Sistem üzerinde test edilip istenilen 5 μ s sürede şarj edebildiği doğrulanmıştır. Şekil 5.6-10 'da gate şarj gerilimleri gösterilmiştir. AL, BL ve CL sırasıyla A, B ve C fazlarının negatif baradaki IGBT'leri, AH, BH ve CH ise pozitif baradaki IGBT'leri ifade etmektedir.



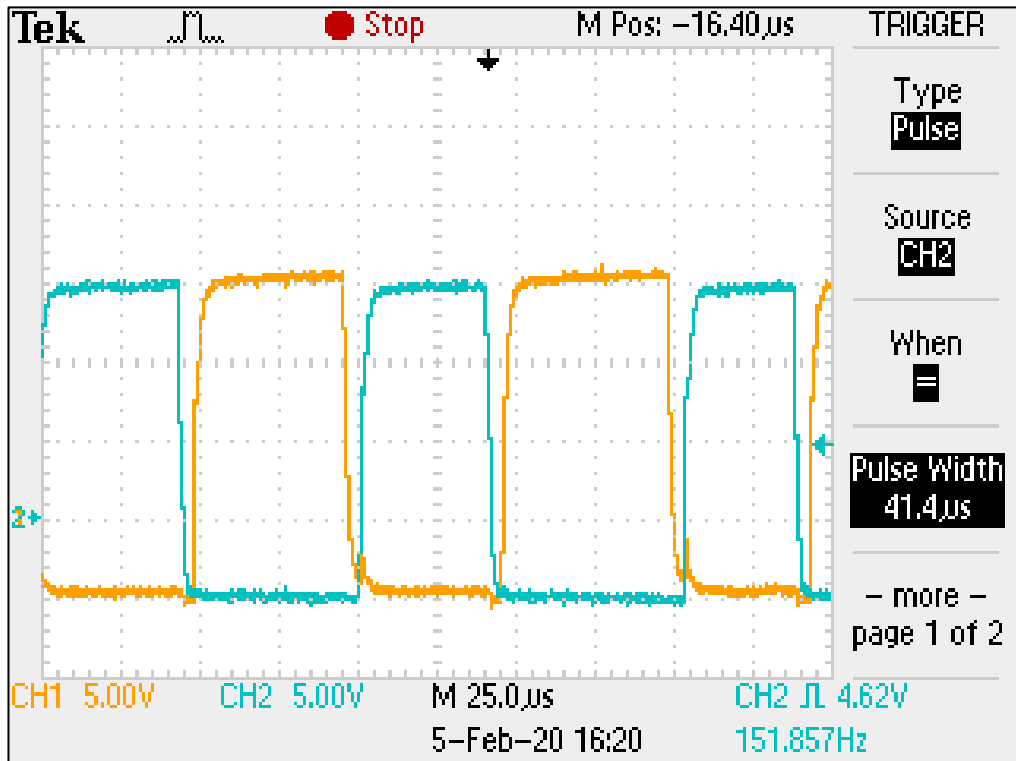
Şekil 5.5: İnverter IGBT anahtarlama devresi.



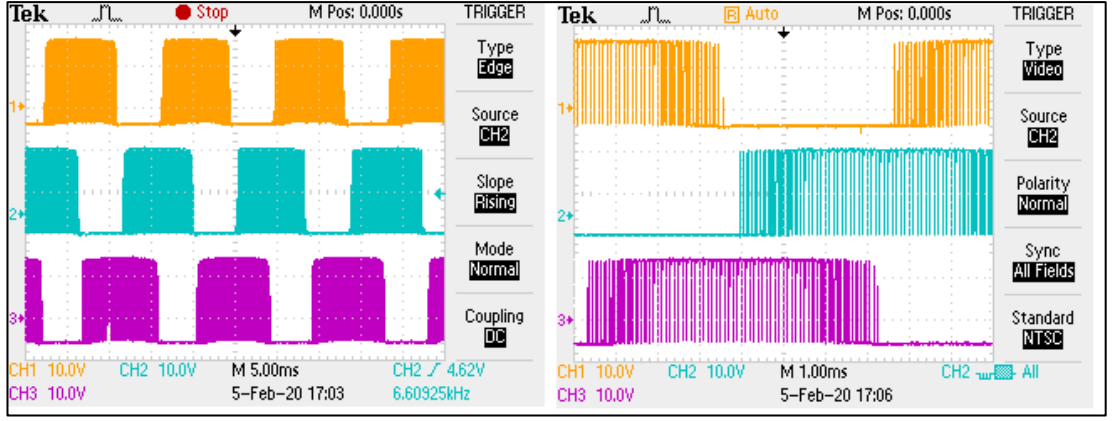
Şekil 5.6: A fazı IGBT'lerin gate şarj gerilimleri (CH1 AH, CH2 AL).



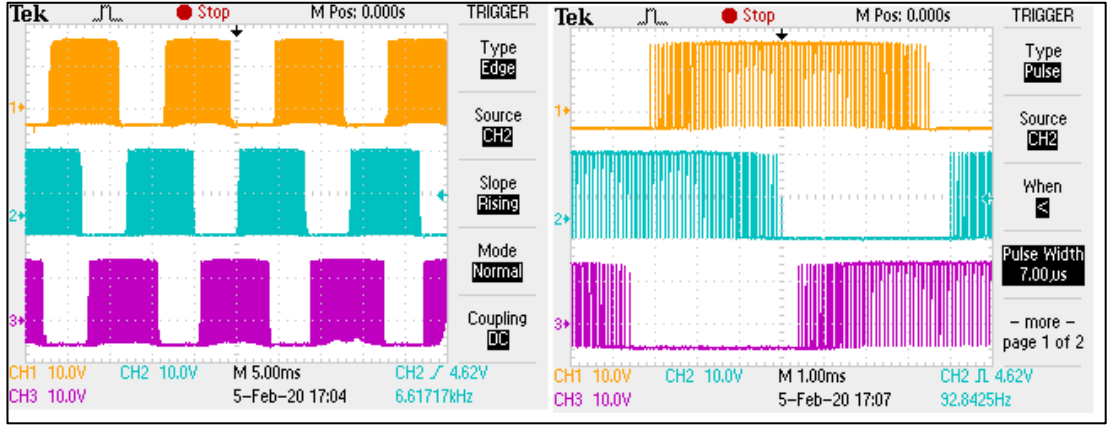
Şekil 5.7: B fazı IGBT'lerin gate şarj gerilimleri (CH1 BH, CH2 BL).



Şekil 5.8: C fazı IGBT'lerinin gate şarj gerilimleri (CH1 CH, CH2 CL).



Şekil 5.9: -DA bara IGBT gate şarj gerilimleri.



Şekil 5.10: +DA bara gate şarj gerilimleri.

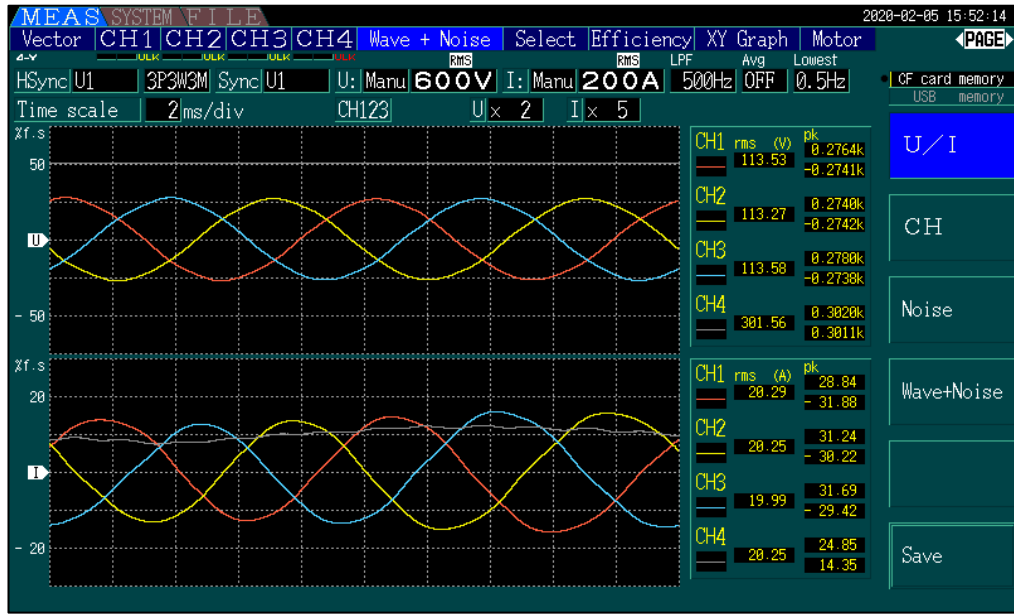
IGBT anahtarlama performansı ölçümü,

Kontrol algoritması tarafından üretilen DGM sinyalleri algoritma tarafından 10 kHz frekansına sahiptir. Her faz için üretilen ve birbirinin tersi olan anahtarlama sinyalleri, tek fazda bulunan IGBT'lerin aynı anda iletimde olmamasını kesin olarak sağlamalıdır. Bu amaçla iki DGM sinyali arasında uygun bir gecikme süresi olmalıdır. Bu süre hesaplanırken, istenmeyen çok küçük açıklık süresine sahip DGM sinyalleri de oluşur. Sağlıklı ve verimli bir anahtarlama için IGBT ve gate şarj devresinin tepki veremeyeceği kadar düşük süreli DGM sinyalleri önsürücü entegresine gönderilmeden önce algoritma tarafından elenmelidir. Şekil 5.9-5.10'da anahtarlama arasındaki sabit voltaj bölgeleri algoritma tarafından elenen çok küçük süreli DGM sinyallerinin olduğu yerlerdir.

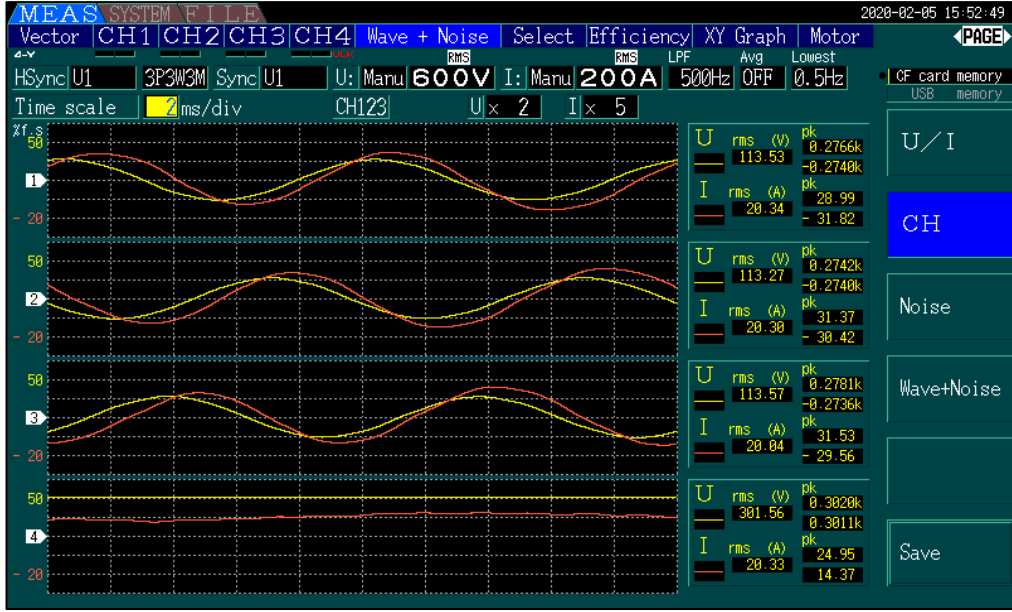
5.3. İnvörtör Testleri

Bu bölümde güç analizörü kullanılarak invörtörün ürün bazında sistemsel testleri yapılmıştır. DA giriş ve faz çıkışları ölçülerek invörtörün sinüs faz gerilimi oluşturma kabiliyeti ile birlikte akım dalga şekilleri ve verim testleri yapılmıştır. Bu testler ilk aşamada 296 V anma gerilimli LiPo batarya ile daha sonra 444 V anma gerilimli (NMC) Li batarya ile yapılmıştır.

300 V gerilimli batarya kullanılarak 20 A faz akımında ölçümler alınmıştır. Şekil 5.11’de faz gerilimleri ve akım dalga şekilleri gözükmektedir. Faz gerilimlerini sinüs olarak incelemek amacıyla güç analizöründen 500 Hz alçak geçiren filtre uygulanmıştır. Şekil 5.12’ de her faz için ayrı şekilde akım ve gerilim şekilleri 500 hz alçak geçiren filtreden geçirilmiş olarak görülmektedir.

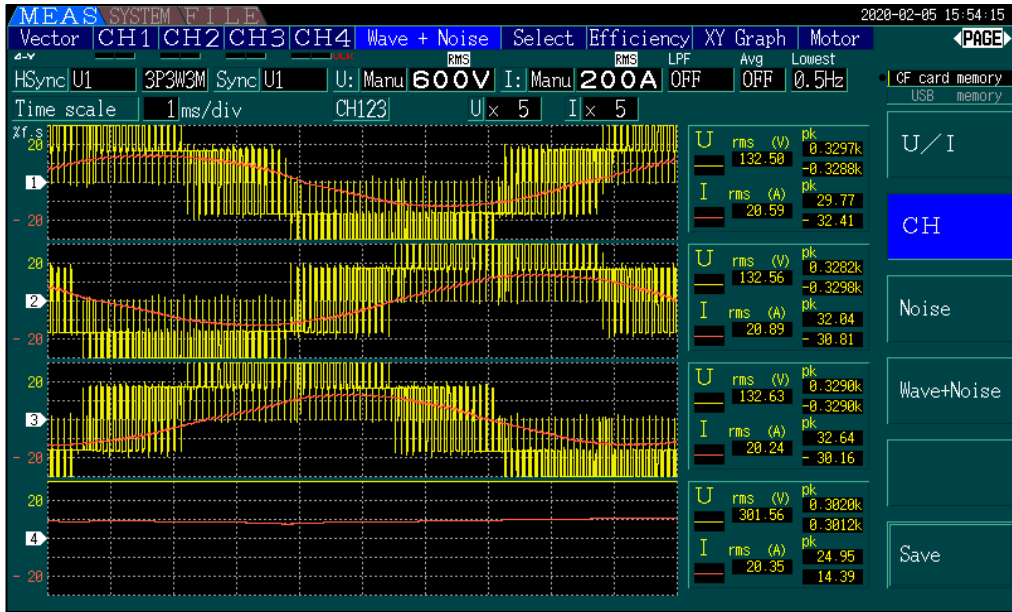


Şekil 5.11: 300 V DA giriş, 20 A rms faz akımı dalga şekilleri.



Şekil 5.12: 300 V DA giriş, 20 A rms faz akımı dalga şekilleri (ayrı fazlar).

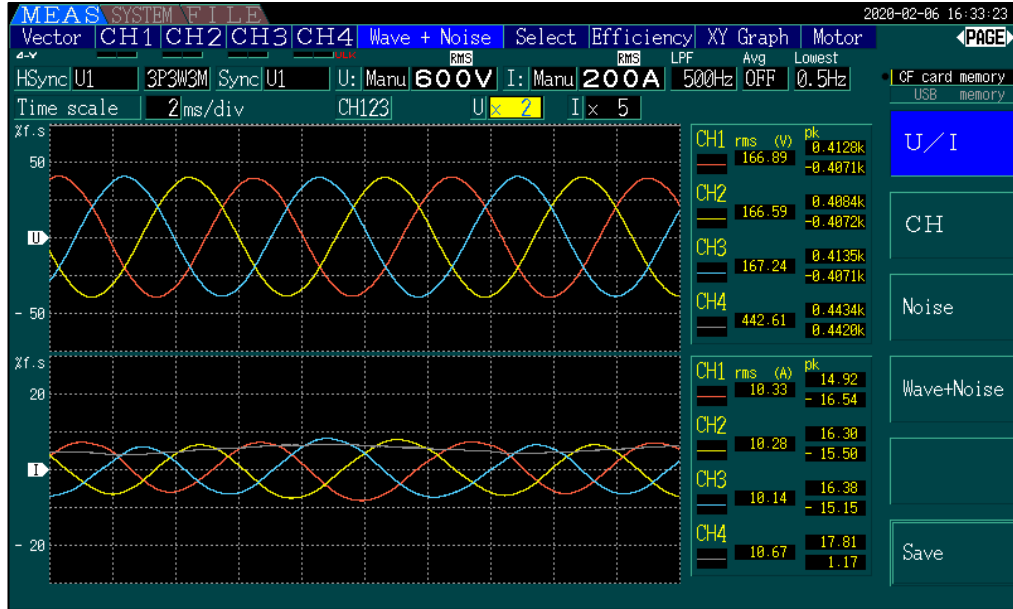
Şekil 5.13'te alçak geçiren filtre kapatılarak, DGM ile üretilen faz akımı ve gerilimleri görülmektedir.



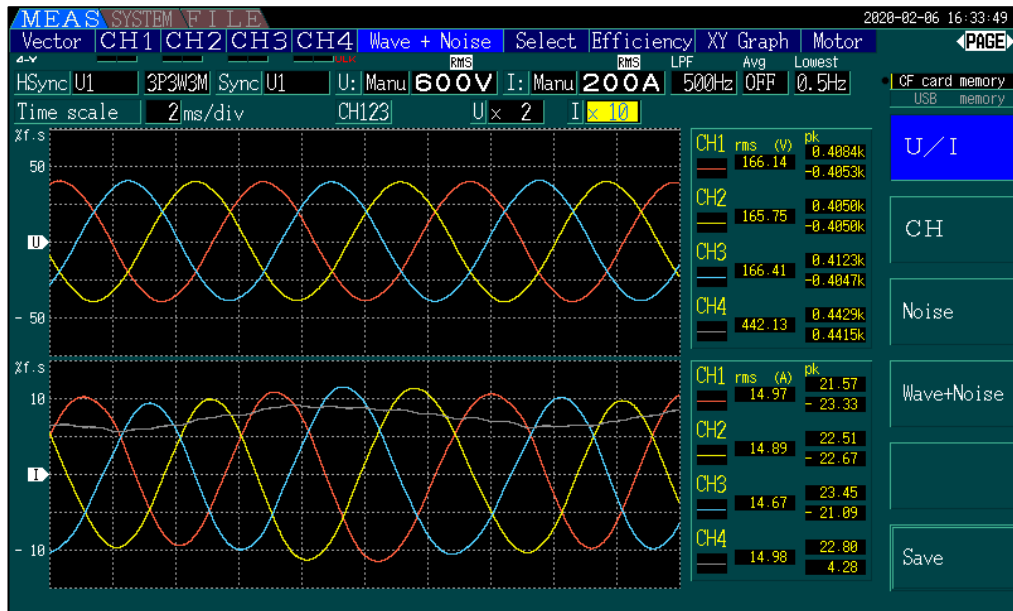
Şekil 5.13: 300 V DA giriş, 20 A rms faz akımı dalga şekilleri (filtre kapalı).

444 V gerilimli batarya kullanılarak çeşitli faz akımı seviyesinde testler yapılmıştır. Şekil 5.14'te 10 A faz akımında, faz akımlarının ve gerilimlerinin filtreli olarak dalga şekilleri görülmektedir. Şekil 5.15'te 15 A faz akımdaki ekran görüntüsü

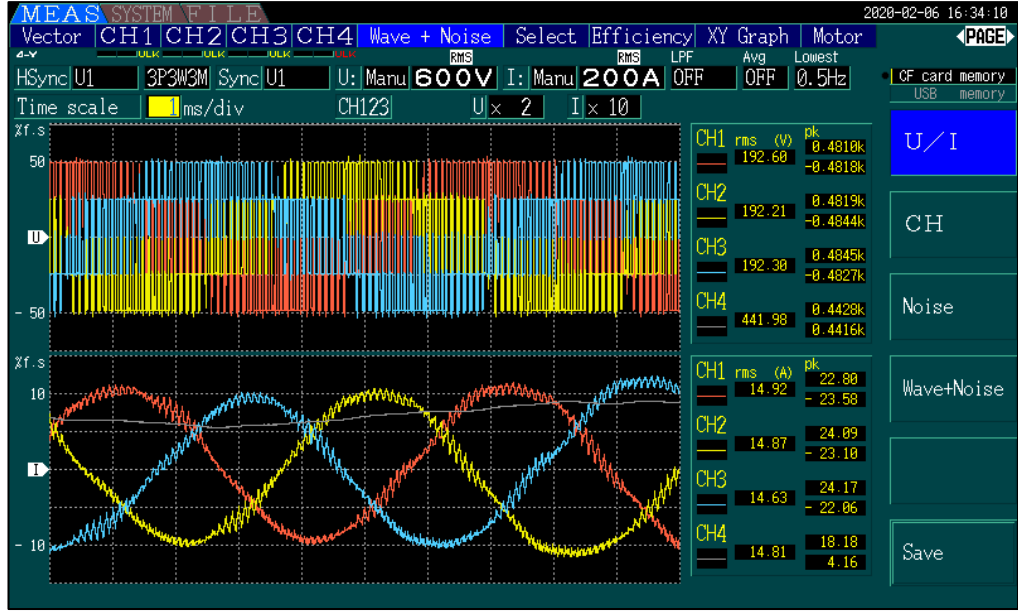
görülmektedir. Şekil 5.16’da ise DGM sinyalleri IGBT tepkisinin net olarak görebilmek amacıyla filtresiz şekilde ölçüm yapılmıştır. Şekil 5.17 ve 5.18’de ise her faz için ayrı ayrı filtresiz ve toplu dalga şekilleri gözükmemektedir.



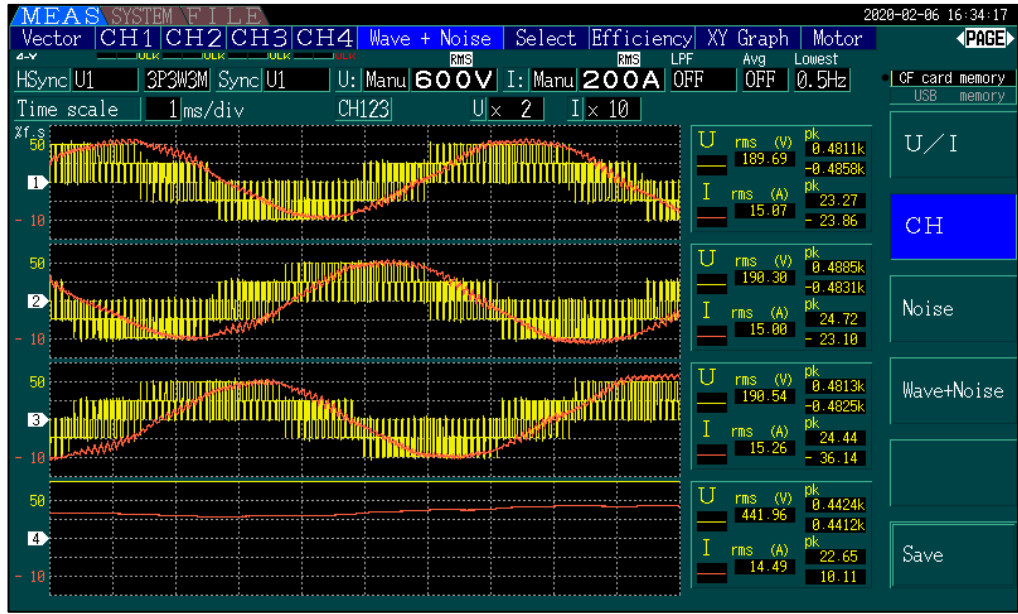
Şekil 5.14: 442 V DA giriş, 10 A rms faz akımı dalga şekilleri.



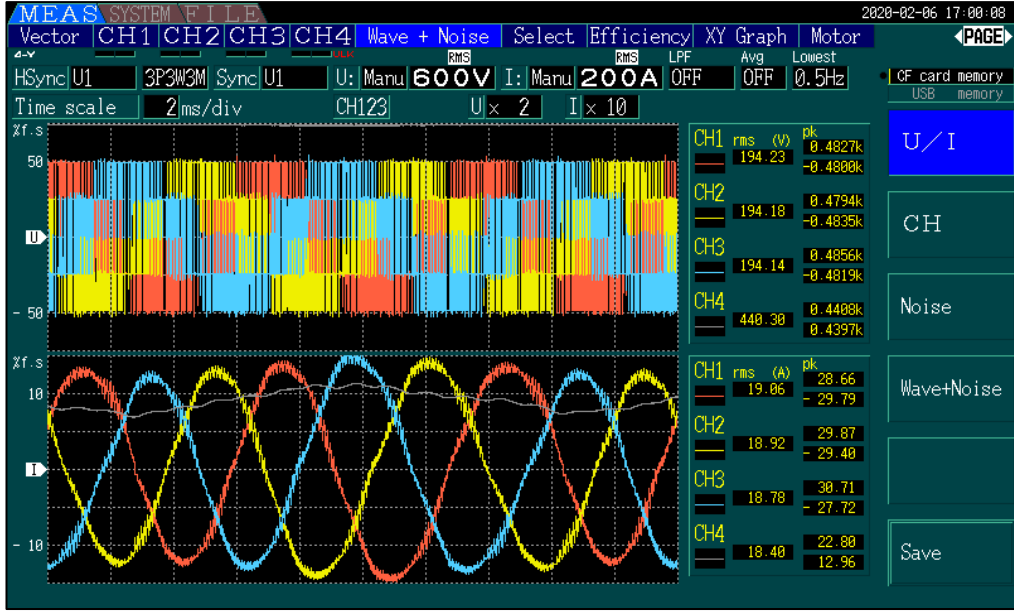
Şekil 5.15: 442 V DA giriş, 15 A rms faz akımı dalga şekilleri.



Şekil 5.16: 442 V DA giriş, 15 A rms faz akımı dalga şekilleri (filtre kapalı).

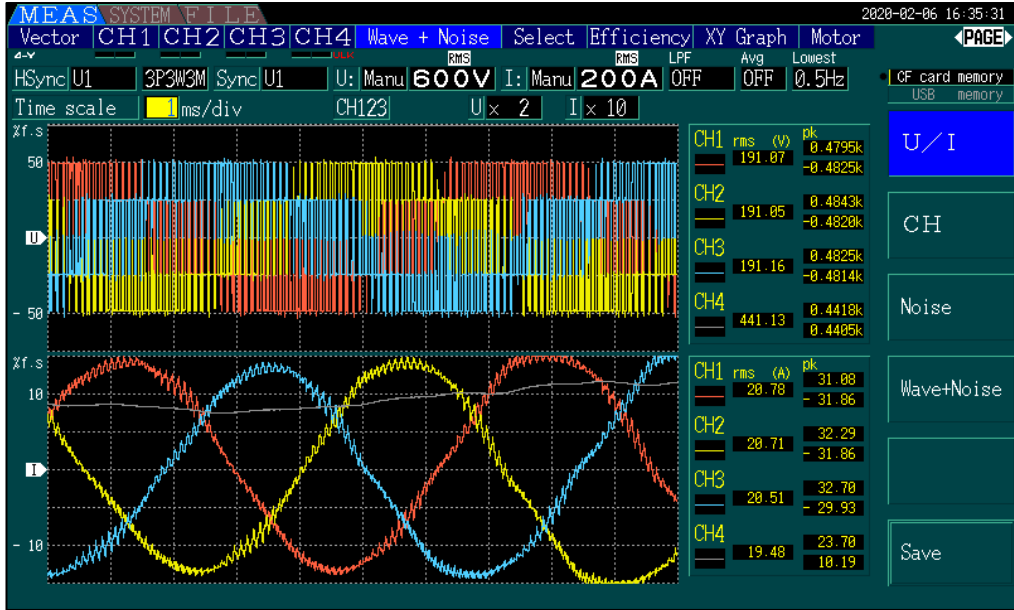


Şekil 5.17: 442 V DA giriş, 15 A rms faz akımı dalga şekilleri (filtre kapalı).

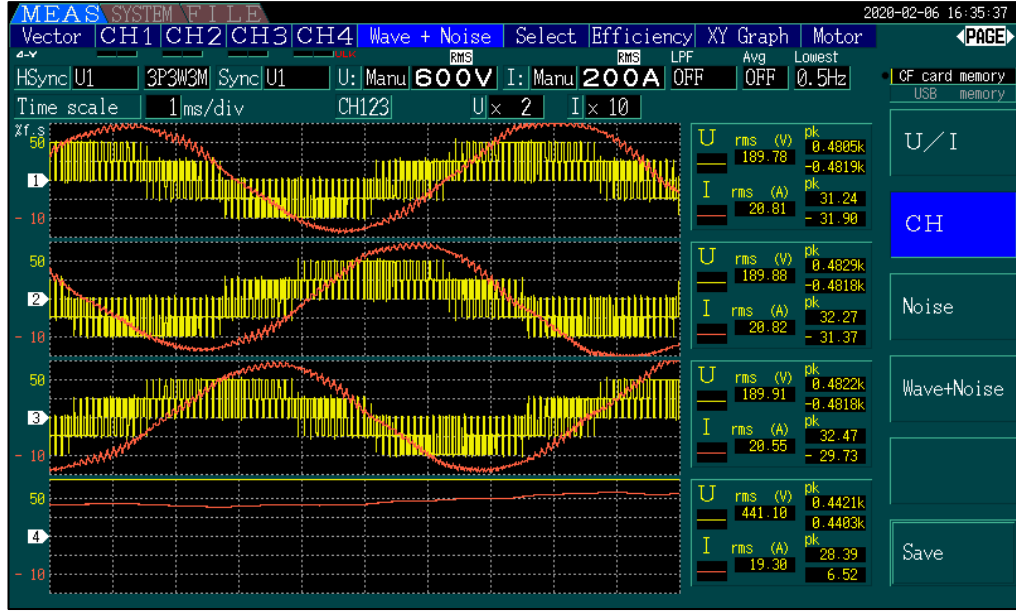


Şekil 5.18: 442 V DA giriş, 18 A rms faz akımı dalga şekilleri (filtre kapalı).

Şekil 5.19'da 20 A faz akımında, akım ve gerilimin toplu olarak, Şekil 4.20'de ise ayrı olarak filtersiz dalga şekilleri gözükmektedir.



Şekil 5.19: 442 V DA giriş, 20 A rms faz akımı dalga şekilleri (filtre kapalı).



Şekil 5.20: 442V D A giriş, 20 A rms faz akımı dalga şekilleri (filtre kapalı).

Şekil 5.21’de verim güç analizörünün verimler ekranı görüntüsü verilmiştir. η_1 invertör verimini, η_2 motor verimini, η_3 sistem verimini göstermektedir. İnvörtör verimi hesaplanırken düşük gerilimli kontrol grubunun ihtiyacı olan (azami 10 W) güç ihmal edilmiştir. %98,82 verim, güç analizörü tarafından DA enerjinin fazlardan çıkan enerjiye oranı ile hesaplanmıştır. Motor verimi ise motor fazlarından giren elektriksel gücün, motor şaftındaki moment ve devrin çarpılması sonucu elde edilen mekanik güce oranı olarak hesaplanmıştır. Sistem verimi ise İnvörtöre giren DA güç ile motor şaftından çıkan mekanik gücün oranıdır. Şekil 5.22-23’te ise test altındaki invertöre ait görüntümler verilmiştir.



Şekil 5.21: İnvörtör, motor ve sistem verimi.



Şekil 5.22: Test altındaki invörtör görünümüleri.



Şekil 5.23: İvertör kutusu.

6. SONUÇLAR

Bu tezde, elektrikli ve hibrit araçlar için motor sürücü invertörü tasarımı yapılmıştır. İlk bölümlerde araç tahriği konusu işlenmiş, elektrik motoru bulunduran tahrik sistemleri anlatılmıştır. Tahrik sistemleri ile ilgili genel bilgiler, alt yapı oluşturulduktan sonra tahrik sistemi bileşenleri anlatılmıştır. Bu bileşenler, kendi aralarında karşılaştırılarak anlatılmıştır. İnvörtör başlığı altında tez konusu olan invertör topolojisinin nasıl belirlendiği anlatılmıştır. Popüler motor kontrol yöntemleri anlatılmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Tasarımda dikkat edilmesi gereken noktalar tez anlatımı içerisinde tez geneline yayılarak ilgili başlıklar içerisinde yeri geldikçe anlatılmıştır. İnvörtör tasarımı kısmında tez konusu invertörün özellikleri, ticari olarak piyasada bulunan gerek içten yanmalı gerek elektrikli ve hibrit tahrik sistemine sahip 61 adet aracın tahrik özellikleri incelenerek ortalama yüklü araç ağırlığı, azami motor moment, nominal motor devri ve azami motor gücü hesaplanmıştır. Bu verilerden yola çıkılarak tasarımı yapılacak invertörün hedef gücü ve DA giriş gerilim seviyesi belirlenmiştir. Giriş gerilim seviyesinden ve diğer özellikler ile ilgili ihtiyaçlardan yola çıkılarak kullanılacak temel elemanların seçimi yapıp özellikleri verilmiştir.

Tasarım kısmında ise invertörde kullanılacak PCB'lerin nasıl bir tasarım yaklaşımı ile tasarlanması hakkında önermelerde bulunulup, elemanların iki PCB de toplanmasına karar verilmiştir. Otaya çıkan PCB lerin tasarım görüntüleri verilmiştir.

Soğutma sistemi başlığı altında IGBT modülün tercih edilmesindeki diğer bir sebep olan yüksek performanslı soğutma yapısına sahip olması, klasik soğutma yapısına sahip olan modüller ile karşılaştırılarak anlatılmış ve soğutma performansının önemi vurgulanmış ve örnek bir soğutma sisteminin şeması verilmiştir.

Testler bölümünde genel hatlarıyla test düzeneğinin yapısı ve invertörün donanım ve sistem bazında testleri verilmiştir. Ortaya çıkan invertörün verimi %98 olarak ölçülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Evren G., DüNDAR S., (2016), “Demiryolu“, 3.Baskı, Birsen Yayınevi.
- [2] Kerem, A., (2014), “Elektrikli araç teknolojisinin gelişimi ve gelecek beklentileri.”, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5(1).
- [3] Web 1, (2020),), <https://homepages.abdn.ac.uk/npmuseum/Scitour/Davidson.pdf>, (Erişim Tarihi: 01/01/2020).
- [4] Web 2, (2020),), <http://www.scot-rail.co.uk/photo/scaled/20572/>, (Erişim Tarihi: 01/01/2020).
- [5] Web 3, (2020),), <http://www.kcstudio.com/electrobat.html>, (Erişim Tarihi: 01/01/2020).
- [6] Web 4, (2019),), https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2014/april/Voltage_Classes_for_Electric_Mobility/Voltage_Classes_for_Electric_Mobility.pdf, (Erişim Tarihi: 14/12/2019).
- [7] Mashadi B., Crolla D.A., (2012), “Vehicle powertrain systems.”, 1st Edition, London Wiley.
- [8] Aydoğan F., (2019), “Elektrikli Araç Tahrik Sistemlerinde Kullanılan SMSM’nin Minimum Kayıp Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [9] Akgül L., Kurnaz Araz H., Erçin M., Aydoğan F., (2018), “Elektrik Motorlarında Sargıdan Soğutma Gövdesine Isı Transferini Artıran Bir Yöntem”, Otekon, 296-303, Bursa, Türkiye, 7-8 Mayıs.
- [10] Web 4, (2019),), http://www.emo.org.tr/ekler/c0cac8b259c5a9a_ek.pdf, (Erişim Tarihi: 10/12/2019).
- [11] Web 4, (2019),), <https://www.enerjiportali.com/invertor-inverternedir-nerelerde-kullanilir/>, (Erişim Tarihi: 14/12/2019).
- [12] İmat H., (2011), “Asenkron Motorun Alan Yönlendirmeli Kontrolü İçin Geliştirilmiş Methodun DSP ile Karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi
- [13] Web 5, (2019),), <https://www.hydrogenics.com/technology-resources/hydrogen-technology/fuel-cells/>, (Erişim Tarihi: 14/12/2019).

- [14] Wang H., Blaabjerg F., (2014), “Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters—An overview”. IEEE Transactions on Industry Applications, 50(5), 3569-3578
- [15] Web 5, (2019),), <https://chargedevs.com/features/advancing-inverters/>, (Erişim Tarihi: 15/01/2020).
- [16] Christmann A., (2010), “Facing High Thermal Loads on Power Moduled in Hybrid Electrical Vehicles”, PCIM 2010, 4 – 6 May 2010, Nuremberg, Germany.
- [17] Web6, (2019),), <http://slideplayer.com/slide/4769878/15/images/51High+vo ltage+cooling+ system.jpg>, (Erişim Tarihi: 15/01/2020).
- [18] Web 6,(2019),), https://www.sager.com/_resources/images/product/26_944U_insert_DSL.jpg, (Erişim Tarihi: 15/01/2020).
- [19] Web 7, (2019),), <https://www.muhendisbeyinler.net/wp-content/uploads/2018/09/volan.jpg>, (15/01/2020).
- [20] Web 7, (2019),), https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FS_820R08A_6P2B-DataSheet-v03_01-EN.pdf?fileId=5546d4625fe36784015fe7bf8e872948, (Erişim Tarihi: 10/12/2019).
- [21] Web 8, (2019),), <http://www.ti.com/microcontrollers/hercules-safety-mcus/overview.html>, (Erişim Tarihi: 10/11/2019).
- [22] Hannan M.A., Hoque M.M., Hussain A., Yusof Y., Ker P.J., (2018). “State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle.
- [23] Web 9, (2019),), <http://media.zenfs.com/en-US/blogs/compass/Bersey1.png>, (Erişim Tarihi: 10/11/2019).
- [24] Web 10, (2019),), <http://tesid.org.tr/elektrikli-tasit-firsat-mi-tehdit-mi>, (Erişim Tarihi: 10/11/2019).
- [25] Web 11, (2019),), <https://www.engineering.com/ DesignerEdge/DesignerEdgeArticles/ArticleID/19907/A-120-Year-Old-Porsche-Could-Inspire-The-Future-of-Electric-Vehicles.aspx>, (Erişim Tarihi: 10/11/2019).

ÖZGEÇMİŞ

Mahmut Ersin ERÇİN 1990 yılında Gaziantep’te doğdu. İlk ve orta öğrenimini Gaziantep ’te tamamladıktan sonra, 2014 yılında Gaziantep Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Cadem A.Ş. şirketinde Ar-Ge mühendisi olarak taşıt tahrik motorları, sürücülerini tasarım ve üretim projelerinde çalışmalarına başladı. 2016 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.