

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN MOTOR SÜRÜCÜ DEVRESİNİN YÜKSEK  
ÇÖZÜNÜRLÜKTE VERİM ANALİZİ**

**FATİH ACAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. UĞUR SAVAŞ SELAMOĞULLARI**

**İSTANBUL, 2015**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN MOTOR SÜRÜCÜ DEVRESİNİN YÜKSEK  
ÇÖZÜNÜRLÜKTE VERİM ANALİZİ**

Fatih ACAR tarafından hazırlanan tez çalışması 20.11.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Uğur Savaş SELAMOĞULLARI  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Uğur Savaş SELAMOĞULLARI  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Doç. Dr. Bülent VURAL  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Yrd. Doç. Dr. Reşat MUTLU  
Namık Kemal Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2014-01-02-YL01 numaralı projesi ve 113M072 numaralı Tübitak 1003 projesi ile desteklenmiştir.

## ÖNSÖZ

Öncelikle tezin fikir ve uygulama altyapısının oluşturulmasından tezin ortaya çıkışına kadar olan tüm süreçte desteğini esirgemeyerek bu çalışmanın ortaya çıkmasını sağlayan danışman hocam Doç. Dr. Uğur Savaş Selamoğulları'na ve bu tezin uygulamalı bir tez olarak ortaya çıkmasında büyük pay sahibi olan ve zaman zaman karşılaştığım problemlerde tavsiye ve yönlendirmelerini esirgemeyerek sorunların üstesinden gelmeme yardımcı olan çalışma arkadaşlarım Araştırmacı Yakup Tavlaşoğlu'na, Araştırma Görevlileri Furkan Akar'a ve Sadık Özdemir'e en kalbî teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, beni yetiştiren, her türlü zorluğa rağmen benden sevgisini ve desteğini asla esirgemeyen aileme, özellikle annem Nezahat Acar'a ve babam Kamil Acar'a şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

Son olarak, eğitim hayatım boyunca hem en büyük destekçim hem de en büyük rakibim olan, bana olan inancını hiçbir zaman yitirmeyen sınıf arkadaşım, sıra arkadaşım, hayat arkadaşım Naziye Güneş Acar'a teşekkür ederim.

Kasım, 2015

Fatih ACAR

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER .....	v
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xi
ÖZET .....	xii
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1    Literatür Özeti .....	1
1.2    Tezin Amacı .....	5
1.3    Hipotez .....	6
BÖLÜM 2	
ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİ .....	7
2.1    Elektrikli Araçların (EA) Tarihçesi .....	8
2.2    Elektrikli Araç Sistemleri .....	12
2.3    Elektrikli ve Hibrit Elektrikli Araçların Alt Bileşenleri .....	16
BÖLÜM 3	
DC/AC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER .....	19
3.1    Kare Dalga İnverterler .....	20
3.1.1    Yarım Köprü Kare Dalga İnverterler.....	20

3.1.2	Tam Köprü Kare Dalga İnverterler .....	22
3.1.3	Üç Fazlı Kare Dalga İnverter.....	23
3.2	Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonlu (SPWM) İnverterler .....	24
<b>BÖLÜM 4</b>		
BENZETİM ÇALIŞMASI .....		28
<b>BÖLÜM 5</b>		
KONTROL ALGORİTMASI ve DSP PROGRAMLAMA .....		34
5.1	TMS320F28335 DSP Özellikleri .....	36
5.1.1	Dijital Giriş-Çıkış Birimi .....	36
5.1.2	Darbe Genişlik Modülasyonu Birimi (ePWM).....	36
5.1.3	Analog-Dijital Dönüştürücü Birimi .....	36
5.2	Kod Hazırlama İşlemi .....	37
5.3	Asenkron Motorda V/f Kontrolü .....	37
5.4	3 Fazlı İnverter Kontrolü için Geliştirilen Algoritma.....	40
<b>BÖLÜM 6</b>		
DENEYSEL ÇALIŞMA .....		44
6.1	Dinamometre Sistemini .....	45
6.2	DSP Ara yüz Kartı.....	46
6.3	BP7B IPM Ara yüz Kartı .....	47
6.4	Akım/Gerilim Sensör Devresi .....	48
6.5	DAQ Kartı Tabanlı Verim Ölçüm Sistemi .....	49
6.6	NI USB-6356 DAQ Kartı .....	49
6.7	Güç Analizörü ile Verim Ölçümü .....	53
<b>BÖLÜM 7</b>		
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....		55
KAYNAKLAR .....		58
ÖZGEÇMİŞ .....		60

## SİMGE LİSTESİ

---

V	Gerilim
$\emptyset$	Magnetik Akı
$f$	Frekans
d/d	Devir/dakika
C°	Santigrat Derece
A	Amper
$\frac{V}{f}$	Volt Başına Hertz Kontrolü
N	Devir Sayısı
s	Stator-Rotor Kayma Faktörü
T	Periyot
t <sub>on</sub>	Yarı iletken Anahtar İletim Süresi
t <sub>off</sub>	Yarı iletken Anahtar Kesim Süresi
P	Güç
W	Watt

## KISALTMA LİSTESİ

---

AC	Alternatif Akım
ADC	Analog Dijital Çevirici (Analog to Digital Converter)
BAE	Bataryalı Elektrikli Araç
CCS	Code Composer Studio
DC	Doğru Akım
EA	Elektrik Araç
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT	Insulated gate controlled thyristor
İYM	İçten Yanmalı Motor
HEA	Hibrit Elektrikli Araç
MCT	Mos Controlled tThyristor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 1894 Electrobats [3].....	9
Şekil 2. 2 London Electrical Cab Company aracı[3] .....	9
Şekil 2. 3 1967 Ford Comuta [3].....	11
Şekil 2. 4 Tam elektrikli araç .....	13
Şekil 2. 5 Seri Hibrit Konfigürasyonu.....	14
Şekil 2. 6 Paralel Hibrit Konfigürasyonu.....	15
Şekil 3. 1 İnverter devresinin blok diyagramı.....	19
Şekil 3. 2 Yarım köprü kare dalga inverter .....	20
Şekil 3. 3 Yarım köprü inverter anahtarlama, çıkış akımı ve gerilimi sinyalleri.....	21
Şekil 3. 4 Tam köprü kare dalga inverter .....	22
Şekil 3. 5 Tam köprü kare dalga inverter anahtarlama, çıkış akımı ve gerilimi sinyalleri .....	22
Şekil 3. 6 Üç fazlı kare dalga inverter .....	23
Şekil 3. 7 Tam köprü kare dalga inverter anahtarlama, çıkış akımı ve gerilimi sinyalleri .....	24
Şekil 3. 8 Referans sinyal ve taşıyıcı sinyalin karşılaştırılması .....	26
Şekil 4. 1 $V_{ce(sat)}-I_c$ grafiği.....	29
Şekil 4. 2 $E_{on}-I_c$ grafiği.....	30
Şekil 4. 3 $E_{off}-I_c$ grafiği .....	30
Şekil 4. 4 $V_d-I_f$ grafiği.....	31
Şekil 4. 5 IGBT anahtarı ile kurulmuş 3 fazlı inverter simülasyonu.....	32
Şekil 4. 6 İnverter verim grafiği .....	33
Şekil 5. 1 TMS320F28335 blok diyagramı[25].....	35
Şekil 5. 2 TMS320F28335 kontrol kartı [25].....	35
Şekil 5. 3 Matlab/Simulink üzerinden DSP için kod üreten akış diyagramı [26] .....	37
Şekil 5. 4 Stator gerilimi ve asenkron motor hız - tork değişim grafiği.....	39
Şekil 5. 5 (a) Modülasyon indeksi ve eksen ötelenmesi (b) İnverter devresi için SPWM üreten bloklar.....	40
Şekil 5. 6 (a) Simulink ADC bloğu (b) ADC gerçek değerlere dönüştürme işlemi .....	51
Şekil 5. 7 Programsal aşırı akım koruması.....	42
Şekil 5. 8 Kontrol algoritması genel görünüm.....	42
Şekil 6. 1 Deneyisel çalışma için kurulan sistem .....	45
Şekil 6. 2 Akuple motor jeneratör sistemi .....	46

Şekil 6. 3	Rejeneratif sürücü sistemi .....	46
Şekil 6. 4	DSP ara yüz kartı .....	47
Şekil 6. 5	BP7B ara yüz kartı .....	48
Şekil 6. 6	Akım/Gerilim Sensör Devresi.....	48
Şekil 6. 7	Veri toplama geçiş kartı .....	49
Şekil 6. 8	(a) Labview Kullanıcı Ara Yüzü (b) Labview Blok Diyagramı [27] .....	51
Şekil 6. 9	5kW'lık yüklenme durumu için DAQ kartı ile elde edilen $V_a$ , $V_b$ , $V_c$ ve $V_{dc}$ dalga şekilleri.....	52
Şekil 6. 10	DC bara, üç faz çıkış gerilimi .....	52
Şekil 6. 11	DAQ kartı tabanlı verim ölçüm sistemiyle elde edilen verim eğrisi .....	53
Şekil 6. 12	Yokogawa WT500 güç analizörü ile güç-verim grafiği.....	54
Şekil 7. 1	Güç-verim eğrileri .....	55

## ÇİZELGE LİSTESİ

---

	Sayfa
Çizelge 1 NI USB-6356 DAQ kartı özellikleri.....	50
Çizelge 2 DAQ kartı tabanlı verim ölçüm sistemi ile yaygın olarak kullanılan güç analizörlerinin maliyet tablosu.....	56

# ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN MOTOR SÜRÜCÜ DEVRESİNİN YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKTE VERİM ANALİZİ

Fatih ACAR

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Uğur Savaş SELAMOĞULLARI

Günümüzde enerjiye olan talebin giderek artması ve enerji üretilen kaynakların sınırlı olmasından dolayı enerji verimliliği konusunda yapılan çalışmalar artmıştır. Ulaşım sektöründe de bu gelişmelere kayıtsız kalınmamıştır. Verimlilik esas alınarak yapılan çalışmalarda, elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorlarının veriminin içten yanmalı motorlardan çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Buna paralel olarak elektrikli araçlar giderek yaygınlaşmaktadır. Bir elektrikli araç temel olarak batarya, inverter devresi ve elektrik motorundan oluşmaktadır. Elektrikli araçlarda motor, DC-AC (inverter) dönüştürücü tarafından kontrol edilmektedir. Tez çalışmasında Tübitak 1003 projesi kapsamında elektrikli araçlarda kullanılan 3-fazlı asenkron motoru kontrol etmek üzere bir inverter devresi kurulmuş ve bu inverter devresinin verim analizi yapılmıştır.

İnverter devresi IGBT (Insulated gate bipolar transistor), MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor) gibi yarı iletken anahtarların kullanıldığı, doğru akımı (DC) alternatif akıma(AC) çeviren elektriksel bir güç dönüştürücü devresidir. Kullanılan yarı iletken anahtarların genellikle yüksek frekanslı darbe genişlik modülasyonu kullanılarak kontrol edilmesi ile inverterin çıkışında istenilen genlik ve frekansta AC gerilim oluşturulabilmektedir. İnverter devresinde kullanılan yarı iletken anahtarlar ideal olmadıklarından, anahtarların iletim ve anahtarlama anlarında kayıplar ortaya çıkmaktadır. İletim ve anahtarlama kayıplarının yanı sıra PWM inverterlerde ek olarak, PWM çalışmaya bağlı olarak akım ve gerilim bileşenleri üzerinde geniş bir

frekans bandında sinyaller ortaya çıkmaktadır. Bu da inverter devresinin verim ölçümünde zorluklar oluşturmaktadır.

Güç elektroniği devrelerinde verim ölçümü elektriksel giriş-çıkış yöntemi, güç analizörleri ve kalorimetrik sistemler kullanarak yapılmaktadır. Hata oranı çok düşük bir ölçüm yapılması için gereken güç analizörleri çok pahalıdırlar. Kalorimetrik sistemler ise pahalı olmasının yanı sıra geniş yer kaplarlar. Aynı zamanda kalorimetrik sistemlerin ölçüm süreleri uzundur. Tez çalışmasında yüksek örnekleme hızına sahip veri toplama kartı kullanılarak dijital bir verim ölçüm sistemi kurulmuştur. Kurulan verim ölçüm sistemi ile yüksek hızda örneklenen (anahtarlama frekansının yaklaşık 125 katı) akım ve gerilim bileşenlerindeki oluşan bütün değişimler algılanabilmekte ve böylece verim ölçümü hassas bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Önerilen ölçüm sistemi ve güç analizörü ile yapılan ölçümler karşılaştırıldığında, önerilen sistemin daha iyi bir performans gösterdiği görülmüştür. Yapılan maliyet analizinde ise önerilen sistemin en uygun maliyeti sunduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** İnverter, verim analizi, veri toplama kartı, elektrikli araç

**EFFICIENCY ANALYSIS OF ELECTRIC VEHICLE DRIVE CIRCUIT WITH HIGH  
RESOLUTION**

Fatih ACAR

Department of Electric Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Uğur Savaş SELAMOĞULLARI

Ever increasing demand for energy along with the scarcity of energy resources has given an impetus to studies focusing on energy efficiency in various areas including transportation sector. It is known that the electric motors exhibit significantly higher efficiencies than the internal combustion engines. In parallel with this fact, the electric vehicles have started to draw wide attention. An electric vehicle is mainly composed of a battery pack and an electric motor which is powered and controlled by a DC-AC converter (inverter). In this thesis, conducted within the context of TUBITAK 1003 project, an inverter circuit is designed to control three-phase induction machine. Moreover, the efficiency analysis of the designed inverter circuit is also carried out.

Inverter, in which semiconductor switches such as IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors) and MOSFETs (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors) are used, is a power electronic circuit that transforms the direct current (DC) into the alternating current (AC). Semiconductor switches are commonly controlled by high frequency pulse width modulation technique which allows obtaining an AC voltage with the desired amplitude and frequency. Since semiconductor switches used in inverters are not ideal, inevitable losses take place during the conduction and switching instants in case of hard switching. In addition to switching losses, challenges arise from the wide frequency spectrum of the output current and voltage waveforms as a result of pulse width modulation. Therefore, accurate measurement of the inverter efficiency becomes a major problem in such inverter circuits.

In power electronic systems, efficiency measurements are performed by using electrical input-output method, power analyzer and calorimeter system. Power analyzers that are capable of measuring the efficiency with minimum error rate are very expensive. On the other hand, calorimeter systems are costly and occupy large space; furthermore, they result in extended measurement duration. In this study, a digital system for efficiency measurement is established by using a DAQ card with high sampling frequency. The established measurement system is capable of obtaining the efficiency of the inverter accurately by measuring the sampled current and voltage components with high frequency (approximately 125 times of switching frequency). According to the test results and cost analysis given in this thesis, it can be stated that the proposed system presents several superiorities such as higher sampling rate and more sensitive measurement compared to power analyzer use and offers a more cost-effective solution.

**Keywords:** Inverter, efficiency analysis, data acquisition card, electric vehicle

#### 1.1 Literatür Özeti

Dünyada enerji kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu enerji ihtiyacının büyük bir kısmı, kolay erişilebilen ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan fosil yakıtlarla karşılanmaktadır. Fosil yakıtların kullanımı ile oluşan zararlı gaz salınımları, günümüz dünyasında insanlığın karşılaştığı en büyük tehditlerden biri olan küresel ısınmanın en önemli faktördür. Ayrıca fosil yakıtların tükenebilir bir enerji kaynağı olması araştırmacıları alternatif kaynak arayışına yönlendirmektedir. Tükenebilir kaynaklar ilerleyen zamanlarda sosyoekonomik pek çok sıkıntıyı beraberinde getirecektir [1], [2], [3].

Petrol ürünleri fosil yakıt türlerinden en fazla kullanılanlarıdır. Petrol ürünleri kullanımının sektörel dağılımına baktığımızda, kullanımın %62'lik kısmı ulaşım sektöründe gerçekleşmektedir. Petrol tüketiminin büyük bir kısmının ulaşım sektöründe olması, sera gazı salınımında petrol ürünlerinin etkisini göstermektedir. Toplam sera gazı salınımının beşte birinden fazlası ulaşım sektöründen kaynaklanmaktadır [4]. Tüm bu veriler göze alındığında ulaşım sektöründe gerçekleştirilecek yeniliklerin yakıt tüketiminin azaltılması ve çevresel zararların en aza indirilmesi konusunda etkili olacağı kuşkusuzdur. Bu bağlamda araçlarda yakıt kullanımının verimi artırılarak, salınımı en aza indirecek çalışmalar devam etmektedir. Son yıllarda, tüm otomotiv endüstrisi artan bir ivme ile rotasını elektrikli ve hibrit araçlar üzerine şekillendirmiştir. Otomotiv endüstrisini bu araçlara iten faktör daha çevreci olmalarıdır [5].



Elektrikli araçlar genel olarak hibrit elektrikli araç (HEA), şarj edilebilen HEA ve tümü BEA (bataryalı elektrikli araç) olmak üzere üç sınıfta incelenmektedir. Bir elektrikli araç temel olarak batarya, inverter devresi ve elektrik motorundan oluşmaktadır. Elektrikli araçlarda motor, DC-AC dönüştürücü (inverter) tarafından beslenmekte ve kontrol edilmektedir [6], [7], [8].

Inverter, doğru akımı (DC) alternatif akıma(AC) çeviren elektriksel bir güç çeviricisidir. Inverter devresinde kullanılan yarı iletken anahtarlar ideal olmadıkları için iletim ve anahtarlama anlarında kayıplar oluşmaktadır. Güç çeviricilerinde ideal sinüzoidal çıkış elde edebilmek için anahtarlama frekansı artırılmalıdır. Bu amaca yönelik olarak güç elektroniği dönüştürücülerinde genellikle darbe genişlik modülasyonu (PWM) kullanılmaktadır. PWM ile sürülen inverterlerde PWM tekniğinin etkisinden dolayı geniş frekans bandında bozunumlar meydana gelmektedir. Bu bozunumlar inverter devresinin verim hesabını zorlaştırmaktadır [9].

Literatürde inverter devrelerinin verim analizi kalorimetrik sistem ve elektriksel giriş-çıkış yöntemi olmak üzere iki yöntemle yapılmaktadır. Lassi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, 250 kW gücünde şebekeye bağlı bir solar inverter sisteminin %5-%100 yüklenme aralığında verim analizi aynı model iki güç analizörü ve kalorimetrik sistem kullanılarak yapılmıştır. Yapılan çalışma iki ölçüm yönteminin sonuçları arasında fark olduğunu ortaya koymuştur. Bu farkların sebebi olarak verim ölçümünde ölçümde kullanılan şönt dirençler ve akım sensörlerin hata oranı olduğu sonucuna varılmıştır [10]. Valtteri tarafından yapılan çalışmada ise üç fazlı aktif doğrultucu sistemin girişindeki LCL filtresindeki kayıp güç analizörü ve kalorimetrik sistem ile analiz edilmiştir. Ölçümler sonucunda kalorimetrik sistemin hata oranının güç analizörünün hata oranından çok düşük olduğu tespit edilmiştir. Güç analizöründeki hata oranının yüksekliğinin güç analizörünün geniş spektrumdaki değişimleri algılayamaması ve kullanılan şönt dirençlerden dolayı olduğunu belirtmiştir [11]. Xin ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise hibrit elektrikli aracın inverter devresinin Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) sürüş profili boyunca kayıpları incelenmiştir. Kayıp analizi, yakıt pili çıkışındaki yükseltici dönüştürücü ve inverterde kullanılan bileşenlerin katalog bilgilerinden yararlanılarak benzetim ortamında yapılmıştır. Bulunan değerler üretici firmanın katalog bilgilerindeki verim değerleri ile

kıyaslanmıştır [12]. Subhrankar ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada 40 kW gücünde bir inverterin verimi akım- akım-gerilim sensörleri kullanarak ölçülmüştür. Akım ve gerilim bilgisi osiloskop yardımıyla 200 kS/s örneklemeyle kaydedilmiştir. Elde edilen verilerden verim analizi yapılmış hata oranı %1 olarak hesaplanmış ve güç analizörlerinden daha hassas verim ölçümü yapıldığı öne sürülmüştür. Hesaplanan hata oranında üst limiti sensörlerin belirlediği, örnekleme frekansındaki artışın ise hata oranını düşüreceği vurgulanmıştır [13]. Pengwei ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada elektrikli araçlar için tasarlanan 55kW gücünde hibrit anahtarlı inverter devresi yardımcı IGBT anahtarları sayesinde yumuşak anahtarlanarak sürülmüştür. Yumuşak anahtarlama yapılarak anahtarlama ve iletim anlarında kayıpların azalması amaçlanmıştır. Öne sürülen inverter üç fazlı endüktif yük ve dinamometre sistemi ile yüklenmiştir. İnverter devresinin verimi güç analizörü ile ölçülerek maksimum %99 civarında bulunmuştur. İnverterin 25°C ve 90°C arasında davranışı incelenmiş ve sıcaklığa bağlı olarak verimin düştüğü gözlenmiştir. Ayrıca dinamometre sistemi ile alınan ölçümlerde inverterin motor hızına bağlı olarak davranışı da incelenmiş ve düşük hızlarda verimin düştüğü belirtilmiştir. Güç analizörü ile yapılan bu ölçümlerin teyit edilmesi için iki hazneli kalorimetrik sistemle verim analizi tekrarlanmıştır. Kalorimetrik sistemle tekrarlanan ölçümlerde de verim %99 ve üzerinde ölçülmüştür. Güç analizörünün doğruluk oranı %0,1 civarında bulunmuştur [14].

İnverter verim ölçümlerinde genel olarak kullanılan güç analizörleri üretici firmanın tercihi göre tasarlanmaktadır. Akım ve gerilim örnekleme hızı şönt dirençlerle yapılabildiği gibi sıfır-akı sensörleri (akım-gerilim sensörleri) ile de yapılabilmektedir. Analizörlerde kullanılan işlemcinin örnekleme hızı ve kullanılan şönt dirençler ve sensörlerin hassasiyeti ölçümde büyük rol almaktadır. Hassasiyetin ve örnekleme hızının artırılması yapılan ölçümün kalitesini de artırmaktadır.

Kalorimetrik verim ölçüm sistemi verim ölçümü için anahtarların iletim ve anahtarlama anlarında oluşan kayıplarından dolayı açığa çıkan ısıнын kalorimetrik sistemin haznesinde oluşturduğu sıcaklık değişimini kullanmaktadır. Kalorimetrik sistemde kullanılan tamamen sıcaklık farkına odaklı ölçüm mantığı inverter devresinin verim hesabını akım ve gerilim bileşenlerinden bağımsız hale getirmekte ve güç analizörlerine göre büyük avantaj sağlamaktadır. Fakat kalorimetrik sistemler geniş hacim

kaplamakta ve aynı zamanda ölçüm zamanı çok uzamaktadır. Ayrıca, kalorimetrik ölçüm sistemi kurulumu ciddi bir maliyete getirmektedir [15], [16], [17].

Bilgisayarların yaygın kullanımıyla ölçüm tekniklerinde yeni gelişmeler ortaya çıkmıştır. Yüksek örnekleme oranına sahip veri toplama kartlarının kullanılması ile anahtarlamalı güç kaynakları ve güç çeviricilerin verim analizi, akım gerilim sinyallerinin kaydedilmesi, harmonik analizi, aktif güç ölçümü, reaktif güç ölçümü kolaylıkla ve hassas bir şekilde yapılabilmektedir. Marek ve arkadaşları National Instruments firmasınca üretilen cRIO platformu kullanılarak bilgisayar tabanlı bir ölçüm sistemi kurmuştur. Gerçek zamanlı kontrol sağlayan cRIO platformu FPGA (Field Programmable Gate Array – Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri) kullanarak temel işlemleri 25ns zamanlama ile yapabilmektedir. Gerilim ölçümü, NI 9225 birimi ile doğrudan yapılmıştır. Akım ölçümü NI 9239 birimi ile analog değerler olarak alınmıştır. Bütün girişler anlık olarak 50kS/s örnekleme hızında alınmış ve grafiksel programlama dili LabVIEW™ ile işlenmiştir. LabVIEW™ ortamında bütün girişler anlık olarak grafiksel olarak takip edilmiş ve bilgisayar ortamında kayıt altına alınmıştır. Hazırlanan ölçüm sistemi FLUKE 6100A kalibratörü ile kalibre edilerek %0,2 maksimum hata oranı ile bilgisayar tabanlı güç analizörü tamamlanmıştır [18]. Benzer bir çalışma Devdutt ve arkadaşları tarafından tek fazlı şebekeden beslenen lineer ve lineer olmayan yükler için güç kalitesini ölçmek için tasarlanmıştır. Ölçüm sisteminde National Instruments firmasının NI 9239 DAQ (veri toplama kartı) ve LEM marka akım-gerilim sensörleri kullanılmıştır. Güç kalitesi ölçümü için omik yük olarak 3 ampül ( $3 \times 150W$ ), non-lineer yük olarak ise bir tane dizüstü bilgisayar (65W) tek fazdan beslenmiştir. Akım ve gerilim sensörlerinden alınan veriler LabVIEW™ ortamına DAQ kartı ile alınarak aktif güç, reaktif güç, anlık güç, güç faktörü, toplam harmonik bozunum, işaret-gürültü ve bozunum oranı grafiksel olarak gösterilmiştir. Öne sürülen ölçüm sistemi iki farklı güç analizörü ile kıyaslanmıştır. Sunulan ölçüm sistemi ve YOKOGAWA marka güç analizörü 50 kS/s örnekleme olarak ölçüm yapmaktadır. FLUKE marka güç analizörü ise 10 kS/s örnekleme oranıyla ölçüm yapmaktadır. Omik yükte üç ölçüm sonucu benzer olmasına karşın omik endüktif yükte özellikle akımın toplam harmonik bozunumunda Fluke marka güç analizörünün sonucu %40 civarında farklılık göstermiştir. Bu farkın FLUKE marka güç analizörünün örnekleme oranının düşüklüğünden kaynaklandığı belirtilmiştir [19]. Bilgisayar tabanlı güç

analizörü üzerine benzer bir çalışma Chow ve Jade tarafından yürütülmüştür. 130 kW biogaz dönüşüm çiftliği ve 1MW solar panellerin harmonik bozunumları, güç bileşenleri ve verimleri ölçülmüştür. Ölçümlerin teyit edilmesi için YOKOGAWA, FLUKE ve CHAUVIN marka güç analizörleri kullanılarak ortalama doğruluk oranı belirlenmiştir. Akım ve gerilim sinyalleri sensörler yardımıyla 400kS/s örnekleme oranına sahip NI USB 6212 DAQ kartına girilmiştir. LabVIEW™ ortamında sistemlerin aktif, reaktif, görünen güç, verim ve harmonik bozunumları hesaplanmıştır. DAQ kartı örnekleme oranı olarak 50 kS/s olarak kullanılmıştır. Ölçüm sisteminin doğruluk oranı ortalama %2 belirlenmiştir [20].

Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorunun kontrolü DC kaynaktan beslenen inverter üzerinden yapılmaktadır. İnverterlerde ideal sinüzoidal çıkış elde edilmesi için anahtarlama frekansı artırılmalıdır. Artan anahtarlama frekansı ile güç ve verim hesabı karmaşık hale gelmektedir. Verim ölçümü için hata oranı en düşük olan yöntem kalorimetrik sistemdir. Güç analizörleri ise örnekleme oranının artırılmasıyla kalorimetrik sistem hassasiyetine yaklaşabilmektedir. Buna karşın kalorimetrik sistemler fiyat, hacim ve süre olarak büyük dezavantaja sahiptir. Örnekleme oranı yüksek güç analizörleri ise oldukça pahalıdır. Bu tez çalışmasında kalorimetrik sistemin ve güç analizörlerin dezavantajlarını ortadan kaldırmaya yönelik elektrikli araçlar için motor sürücü devresinin yüksek çözünürlükte verim analizi yapabilmek amacıyla DAQ kartı tabanlı bir verim ölçüm sistemi sunulmuştur.

## **1.2 Tezin Amacı**

Güç elektroniğinin temel devrelerinden olan inverterler, DC kaynaktan aldığı gerilimi işleyerek, sabit veya değişken genlik ve frekanslı AC gerilim elde etmek için kullanılan devrelerdir. İnverter devresinde kullanılan yarı iletken anahtarlar ideal olmadıklarından anahtarlar iletimde iken ve anahtarlama anlarında kayıplar oluşmaktadır. İnverterler genellikle PWM tekniği ile kontrol edilmektedir. PWM çalışmanın inverterler üzerindeki doğal etkisinden dolayı akım ve gerilim bileşenleri üzerinde geniş bir frekans bandında bozunumlar meydana gelmektedir. Bozunumların etkisi verim hesabının yapılmasını zorlaştırmaktadır. Güç elektroniğinde verim analizi elektriksel giriş-çıkış yöntemi, güç analizörleri ve kalorimetrik sistem ile yapılmaktadır. Hata oranı çok düşük bir ölçüm

yapılabilmesi için gereken güç analizörleri çok pahalıdır. Kalorimetrik sistemler ise pahalı olmasının yanı sıra hantal yapısıyla geniş yer kaplar. Aynı zamanda kalorimetrik sistemlerin ölçüm süreleri uzundur. Tez çalışmasında elektrikli araçlarda kullanılan motor sürücü devresinin verim ölçümüne yönelik yüksek çözünürlüklü DAQ kartı kullanılan ölçüm sistemi sunulacaktır. Tez çalışmasında verim ölçüm sistemi olarak yüksek örnekleme hızına (1,25 MS/s) sahip veri toplama kartı kullanılmış ve yüksek hızda örneklenen akım ve gerilim bileşenleri (yaklaşık anahtarlama frekansının 125 katı) kullanılarak verim analizi yapılmıştır. Böylece pahalı güç analizörleri ve gerçeğe en yakın ölçüm yapan kalorimetrik sistemlerle yapılan ölçüm kalitesine çıkılması amaçlanmaktadır.

### **1.3 Hipotez**

Bilgisayarların yaygın olarak kullanılması ve veri toplama kartlarının örnekleme oranlarının yüksek seviyelere çıkması veri toplama kartlarının verim ölçümünde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Maliyet açısından bakıldığında veri toplama kartlarının eşit örnekleme oranına sahip güç analizörlerine göre oldukça düşük maliyete sahip olduğu görülecektir. Bu bilgilerden yola çıkarak elektrikli araç motor sürücü devresinin verim ölçümünde kullanılacak yüksek örnekleme oranına sahip veri toplama kartı tabanlı verim ölçüm sistemi kurulacaktır. Kurulan sistem ile verim ölçümünde yaygın olarak kullanılan güç analizörlerinden daha hassas ve düşük maliyetli verim ölçümü yapılabilecektir.

### ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİ

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde ulaşım yoğunluğunun giderek artması çevre kirliliğini paralelinde getirmektedir. Ulaşımda kullanılan araçların içten yanmalı motor salınımları (azot oksitler- $\text{NO}_x$ , karbon monoksit- $\text{CO}_x$ , parçacıklar, uçucu organik bileşikler vb.) küresel seviyede çevresel felaketlere ve insan sağlığına tehdit olarak karşımıza çıkmaktadır. Büyük şehirlerin çoğunda trafik salınımlarından kaynaklanan  $\text{NO}_x$  ve  $\text{CO}_x$  oranlarının standartların üzerine çıktığı görülmüştür. İçten yanmalı motorların hepsi yüksek miktarda parçacık salınımına yol açarken dizel motorların LPG'li (sıvılaştırılmış petrol gazı) motorlara ya da benzinli motorlara göre daha fazla parçacık açığa çıkardığı görülmüştür. Katalitik dönüştürücülerin kullanılması ile salınım oranı azaltılmış fakat trafiğin artmasıyla salınım yoğunluğunun artması engellenememiştir [1].

Mevcut petrol rezervlerinin azalması ve çevresel kaygılar, alternatif enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmaların ivme kazanmasına katkıda bulunmuştur. Dünya çapında birçok araştırmacı çalışmalarını petrol türevlerinin oransal olarak en fazla kullanıldığı ulaşım teknolojileri üzerine yoğunlaştırmıştır. Ulaşım sektörü kaynaklı petrol tüketiminin ve zararlı salınımların azaltılmasının amaçlandığı bu çalışmalarda, yüksek verimli ve çevre dostu elektrikli araç teknolojileri kısa vadeli ve kolay bir çözüm yolu olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrikli araçların yaygın kullanımına en büyük engel ise araçların kısa menzili ve yüksek maliyetidir. Maliyet probleminin elektrikli araçların seri üretime girmesiyle, menzil probleminin ise batarya teknolojisindeki gelişmeler ile aşılacağı öngörülmektedir [1], [2]. Son zamanlarda elektrikli araç teknolojilerinde en büyük atılım A.B.D tarafından yapılmış ve elektrikli araçlar fosil yakıt tüketen araçlara

alternatif olarak tanımlanmıştır. Yine A.B.D tarafından 2015 yılına dek 1 milyon elektrikli aracın trafikte yerini alması hedeflenmiş fakat 325 bin adet elektrikli araç satılmıştır. Obama hükümeti elektrikli araçların yaygınlaşması için çeşitli destekler vermektedir ve gelişmiş ülkelerde de buna paralel gelişmelerin yaşanmasıyla her geçen gün elektrikli araçlara olan ilgi artmıştır. Hibrit elektrikli ve elektrikli araçlara olan teşviklerin artması, zararlı salınımların önemli oranda azalması ve yüksek verimlilikleri sayesinde petrol kullanımının azalması vb. avantajlarından kaynaklanmaktadır [1].

Yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı elektrikli ve hibrit elektrikli araçlara ilgi artmaya başlamıştır. Elektrikli araç teknolojisi 1800'lü yıllardan beri mevcuttur. Elektrikli araçların tercih edilmemesinin sebebi içten yanmalı motorların (İYM) güç yoğunluğunun elektrik motorlarından yüksek olması ve yakıt olarak kullanılan petrol ürünlerinin enerji yoğunluğunun yüksek olmasının yanı sıra kolay bulunabilmesiydi. Batarya problemleri de elektrikli araçların 1970'lere kadar geri planda kalmasına sebep olmuştur. 1970'lerde ortaya çıkan petrol krizi ve petrole olan bağlılığın artmasıyla birlikte yeni teknoloji arayışları ile elektrikli araçlar yeniden gündeme gelmiştir [1].

## **2.1 Elektrikli Araçların (EA) Tarihçesi**

1835 yılında Profesör Stratingh ilk EA modelini Hollanda'da geliştirmiştir. 1834-1836 yılları arasında Thomas Davenport, ABD'de elektrikli aracın geliştirilmesini ve uygulamasını tamamlamıştır. Geliştirilen araç üç tekerlekli olmakla beraber şarj edilemeyen bataryalarla tahrik edilmiştir. Bu gelişmelerden 4 yıl sonra Robert Davidson elektrikli lokomotif geliştirmiştir. Bu dönemde kurşun-asit bataryalar geliştirilmiş ve şarj edilemeyen bataryaların yerini almıştır [2].

Elektrikli araçlarda gelişmeler hız kazanarak devam ederken içten yanmalı motorlar yavaş kalmıştır. 19. Yüzyılın sonlarına doğru İngiltere, Fransa ve Amerika'da pek çok şirket elektrikli araç üretmeye başlamıştır. Bu üreticilerin en önemlisi Electric Carriage and Wagon Company şirkettir. Morris ve Salomon'un sahip olduğu şirket iki koltuğa sahip Electrobats isimli elektrikli aracı geliştirmiştir.

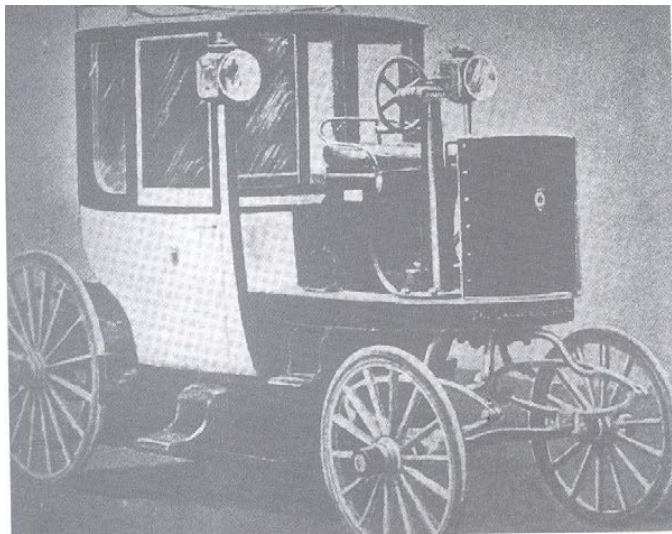
Almanya'da Karl Benz tarafından tanıtılan Motor Wagen isimli İYM teknolojisine sahip araç üretilmiş ve İYM ve elektrikli araçlar bu dönemden sonra yaygın olarak satılmaya

başlanmıştır. İçten yanmalı motorların ilk zamanlarda aşırı gürültülü çalışmaları, kötü koku yaymaları ve krank koluyla başlatılması gibi hafife alınmayacak zorlukları vardı. Elektrikli araçların en büyük problemleri ise bataryaların ağırlığı sebebiyle yavaş olmaları ve menzil problemleriydi [2].



Şekil 2. 1 1894 Electrobats [3]

Elektrikli araçlarda gelişmeler devam ederken 1900 yılında Amerika’da üretilen araçların 1684 tanesi buhar tahrikli, 1575 tanesinin elektrik tahrikli ve 963 tanesinin de İYM’li olduğu bilinmektedir. Amerika’da bu gelişmeler devam ederken, 1897 yılında İngiltere’de “Londra Elektrikli Taksi Şirket (London Electrical Cab Company)” tarafından 15 adet elektrikli araç taksi olarak kullanıma alınmıştır [2], [3].



Şekil 2. 2 London Electrical Cab Company aracı[3]



1900'lü yıllarda elektrikli araçlar oldukça yaygınlaşmıştır. 1912 yılında satışlar en üst seviyesine ulaşmış, 1918 yılında Amerika'daki elektrikli araç sayısı 50,000 adede ulaşmıştır. Yılların ilerlemesiyle ve şehirlerarası yolların gelişmeye başlamasıyla elektrikli araçların menzil problemi etkisini göstermiş ve menzil talebini karşılayan içten yanmalı motora sahip araçlara olan talep artmıştır. Bu soruna cevap olarak ilk kez benzin-elektrik hibrit araç fikri ortaya atılmıştır ve Ferdinand Porsche benzin ve elektrik motorunun iyi yanlarını kullanarak ilk hibrit aracı Paris fuarında sergilemiştir. Başlarda olumlu karşılanan hibrit araç, sisteminin karmaşık yapısı nedeniyle varlık gösterememiştir [2], [3].

Elektrikli araç konusunda gelişmeler olmasına karşın menzil probleminin aşılabilmesi ve sunulan düşük beygir gücü elektrikli araçların yollardan erken yok olmasına sebep olmuştur. Ayrıca, petrol ürünlerine kolay erişim ve petrol rezervlerinin bulunması, içten yanmalı motor teknolojisindeki gelişmeyi ivmelendirmiştir. 1897 yılında susturucunun icat edilmesi ile motor gürültüsü azaltılmış ve 1912'de marş motorunun icadı ise krank kolu gereksinimini ortadan kaldırmıştır. Kısa menzil, düşük hız ve yüksek üretim maliyeti, elektrikli araçlarda teknolojik ilerlemeler olmasına rağmen aşılabilen problemler olarak kalmıştır. İçten yanmalı motorların seri üretime geçmesi ve maliyetlerinin düşük olması, elektrikli aracın üretiminin ötelenmesine yol açmıştır [2].

İçten yanmalı motorların çevreye olan zararları 1960'larda tekrar elektrikli araçlara geçiş fikrinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Konvansiyonel araçların elektrikli hale dönüştürülmesi fikriyle Renault Dauphine Eureka aracı Williams şirketi tarafından elektrikli versiyona dönüştürülmüştür. Dönüşüm bazı firmalar tarafından yapılırken baştan sona elektrikli araç tasarımını amaçlamıştır. Ford Motor firması Comuta adlı prototip elektrikli aracı tasarlamıştır. Comuta her bir ön tekeri tahrik eden iki adet DC motora sahiptir. Aracın gücü dört adet kurşun asit batarya ile sağlanmıştır. Araç 40km/saat hız ve 64 km menzile sahip olup; azami hızı 64 km/saattir [3].



Şekil 2. 3 1967 Ford Comuta [3]

1968 yılında General Electric GE Delta aracın uygulamasını yapmıştır. Nikel-demir bataryaların kullanıldığı bu araç 64 km menzile ve azami 89 km/saat hıza sahiptir. Ford E-Car protopini nikel-kadmiyum batarya teknolojisi kullanılarak geliştirmiştir. 1970'lerin sonunda siyasi kaynaklı ortaya çıkan petrol krizi elektrikli araçlar üzerine yapılan çalışmalara hız kazandırmıştır. Bu dönemde Amerika, İngiltere, Fransa, Almanya, İtalya ve Japonya araştırmalara hız veren ülkelere örnek olarak verilebilir. Bu dönemde Fiat X1/X23 isimli elektrikli aracı geliştirilmiştir. Almanya'da Daimler Benz ve Volkswagen deneysel EA'lar geliştirmiştir [3]. Japonya hükümetinin destekleriyle bu dönemde Toyota, Daihatsu, Mazda ve Mitsubishi birlikte EA'lar üzerine çalışmıştır [3].

1980'li yıllarda çevresel kaygılar dikkate alınarak resmi kaynaklar EA'lara teşvik vermeye başlamışlardır. Bu döneme kadar DC tahrik kullanılırken, bu dönemde AC tahrik kullanılmaya başlanmıştır. Bataryalardan sağlanan DC transistörlü bir evirici yardımıyla AC'ye çevrilerek kullanılmıştır. 1980'li yıllarda ABD Enerji bakanlığının teşviki ile Ford/GE ETX-1 aracı geliştirmiştir. 200V'luk kurşun-asit bataryaları 300A AC güç üreten evirici yardımıyla 2 kutuplu asenkron motor kontrol edilmiştir. Çalışmalar geliştirilerek elektrikli aracın menzil ve azami hızı artırılmıştır. ETX-2 prototipi üretilerek 1988 yılında ABD enerji bakanlığına teslim edilmiştir [3].

Avrupada EA'lar üzerine gelişmelerini 1980'lerde aktifleştirmiştir. Fransa'da Peugeot 025 ve Citroen C15 modellerinden toplam 500 kadar araç elektrikli araca

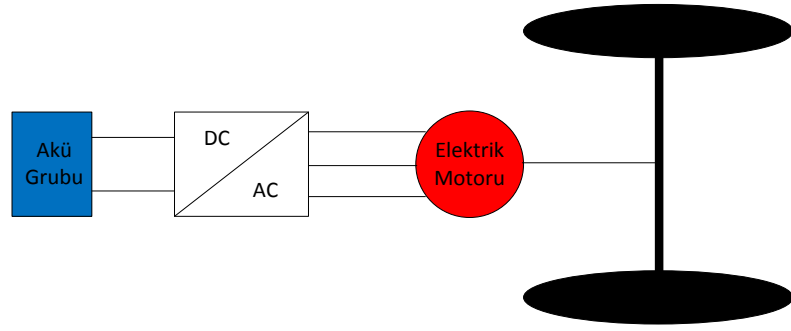
dönüştürülmüştür. Almanya’da ise GES City Stromer isimli aracın dönüşümü tamamlanmıştır. Bu araç, Avrupa güvenlik standartlarını karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Aynı dönemde İtalya’da Fiat Panda Elettra modelinin dönüşümünü tamamlamıştır. Japonya’da ise senkron ve asenkron tahrik motorları kullanılmaya başlanarak AC tahrik sistemine geçilmiştir [3].

1990’lı yıllarda ve sonrasında pazarda yer alması düşünülen EA’lar için Avrupa hükümetleri tarafından hedef oranlar açıklanmıştır. Hükümetler araçlara egzoz salınımlarına göre vergilendirmeler yapmış ve petrol ürünlerindeki vergi oranını artırarak EA’lara olan ilgiyi artırmaya çalışmıştır. Bu dönemde piyasaya sürülen EA’lar; Ford Ranger, Honda EV Plus ve Toyota Rav EV örnek olarak verilebilir. Kullanılan batarya teknolojisi elektrikli araçların menzilinın istenilen seviyeye çıkmasına engel olması nedeniyle araç üreticileri hibrit araç teknolojisi üzerine de çalışmalarını sürdürmüşlerdir. Özellikle Japonya bu anlamda lokomotif olmuştur. Toyota Prius, Toyota Yaris, Honda Insight ve Nissan Tino bu araçlara örnek olarak verilebilir [3].

## **2.2 Elektrikli Araç Sistemleri**

Elektrikli araçlarda, araç içerisine yerleştirilmiş enerji üretim, dağıtım ve tahrik sistem elemanları birlikte çalışmaktadır. Sistem içerisindeki elemanların birbirlerine bağlanma şekilleri, enerji akışındaki tercihleri ve farklılıklarına göre tahrik sistem konfigürasyonları (drivetrains) tanımlanmıştır [4].

Elektrikli araçlar tam elektrikli araç (EA), hibrit elektrikli araç (HEA) ve dışardan şarj edilebilen elektrikli araç (PHEA) olarak üç gruba ayrılır. Tam elektrikli araç elektrik motoru için gerekli olan elektriksel enerjiyi bataryalardan karşılamaktadır. Bataryanın yanı sıra yardımcı güç kaynakları da ani ivmelenme ve yokuş tırmanma anlarında pik talebi karşılamak için kullanılabilir. Bu durum enerji yoğunluğu yüksek, güç yoğunluğu düşük bataryalar için önemlidir [4]. Tam elektrikli araçlar için enerji akış şeması Şekil 2.4’te görülmektedir.



Şekil 2. 4 Tam elektrikli araç

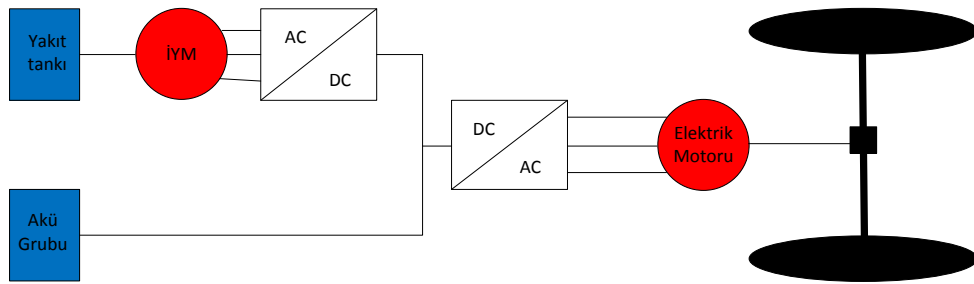
Tam elektrikli araçlarda şarj edilebilir bataryada depolanan elektrik enerjisi motor kontrolünde kullanılmaktadır. Motorun yol şartlarını karşılaması için gereken güç gaz pedalının pozisyonuna göre belirlenmektedir [3].

Tam elektrikli araçlarda verim, konvansiyonel araçlara göre oldukça yüksektir. Konvansiyonel araçlarda verim %18-25 aralığında değişirken tam elektrikli araç %46 verimle çalışmaktadır. Elektrikli araçlar ilk zamanlarda DC motorlar kullanılarak tasarlanmalarına karşın son dönemlerde üretilen çoğu elektrikli araç DC-AC evirici yardımıyla AC motor kullanılarak üretilmektedir [5].

Hibrit elektrikli araçlarda birden fazla güç kaynağı farklı konfigürasyonlarda kullanılarak aracın güç ihtiyacı karşılanmaktadır. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu Teknik Komitesi tarafından verilen tanıma göre hibrit elektrikli araç, enerjinin iki ya da daha fazla enerji kaynağından sağlandığı ve bu enerji kaynaklarından en az bir tanesinin elektrik enerjisi verdiği bir araç olarak ifade edilmiştir [6]. Hibrit elektrikli araç sistemleri, aracın tahrik edilmesinde içten yanmalı motorun yanında bir elektrik motoru ve bataryanın kullanılması ile birlikte yakıt tüketimini, buna bağlı olarak da içten yanmalı motorun olumsuz çevresel etkilerini önemli bir oranda azaltmaktadır. Ayrıca, elektrik motoru ve bataryanın kullanılması ile birlikte frenleme anlarında ortaya çıkan enerji geri kazanılabilmekte, bu sayede yakıt tasarrufu sağlanmaktadır. Hibrit elektrikli araçlarda performansı etkileyen en önemli faktör hibritleşme konfigürasyonudur. Bu konfigürasyonlardan en önemli olanları seri hibrit, paralel hibrit ve seri-paralel hibrit (karma) olarak ortaya çıkmaktadır [6], [7].

Seri hibrit konfigürasyonunda enerji akış şeması Şekil 2.5'te verilmiştir. Seri hibrit konfigürasyonunda aracın tahrik edilmesi elektrik motoruyla sağlanmaktadır. Burada

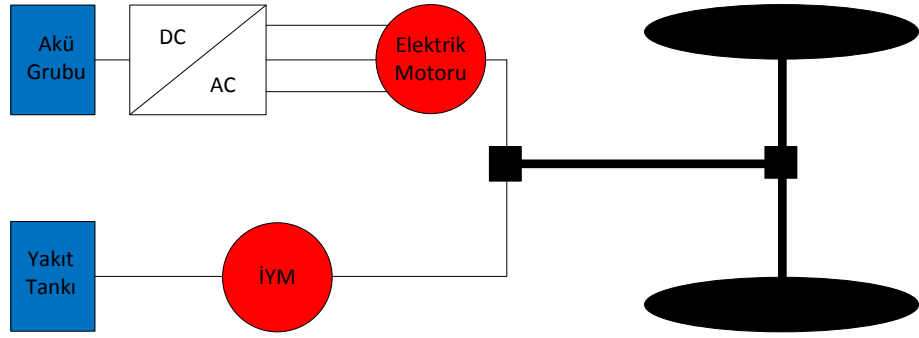
elektrik motoru, evirici çıkışındaki elektriksel gücün mekanik güce çevrilmesi için kullanılmaktadır. Seri hibrit konfigürasyonunda kullanılan generatör içten yanmalı motordan gelen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmektedir. Böylece üretilen elektrik enerjisi batarya sisteminin elektrik enerjisiyle elektronik kontrolörde birleşerek aracın kontrol edilmesinde kullanılmaktadır. Elektronik kontrolör, aracın anlık ihtiyacına göre hangi kaynaktan ne kadar enerji sağlanacağını belirlemektedir. Seri hibrit konfigürasyonunda frenleme anlarında elektrik motoru generatör olarak çalıştırılarak frenleme enerjisi bataryalarda depolanmaktadır. Kontrolör frenleme anlarında içten yanmalı motor ve generatör sistemini devreden çıkarmaktadır [6].



Şekil 2. 5 Seri Hibrit Konfigürasyonu

Seri hibrit araçlara örnek olarak 2010 yılında üretilen Chevrolet Volt verilebilir. Bu araç 500 km menziliyle oldukça iddialıdır. Seri hibrit araçlar uzatılmış menzilli elektrikli araçlar olarak da adlandırılmaktadır [3].

Paralel hibrit elektrikli araçta, İYM ve elektrik motoru aynı mil üzerinden tekerleklerle doğrudan mekanik bağlantı ile tahrik vermektedir (Şekil 2.6). Paralel hibrit araçlara örnek olarak Honda Insight, Honda Civic ve Ford Escape Hibrit verilebilir. Paralel tahrik sistemleri mekanik olarak seri hibrit sistemlere göre daha karmaşıktır. Paralel tahrikli araçlarda konvansiyonel araçlara göre daha küçük İYM kullanılır. Toplam güç ihtiyacı ve çalışma verimine bağlı olarak kontrolör hangi kaynaktan ne kadar güç çekileceğini belirler. Kontrolör; yakıt ekonomisi, performans, salınım ve menzil için optimize edilmiştir. Şekil 2.6'da paralel hibrit elektrikli araca ait enerji akış şeması görülmektedir.



Şekil 2. 6 Paralel Hibrit Konfigürasyonu

Seri hibrit sistemde olduğu gibi paralel hibrit sistemde de rejeneratif frenleme ile bataryalar şarj edilebilmektedir. Paralel hibrit sistemde seri hibrit sisteme göre daha küçük kapasiteli bataryalar kullanıldığı için şarj çoğunlukla rejeneratif frenleme sırasında yapılır. Buna ek olarak sürüş esnasında da elektrik motoru generatör gibi davranarak bataryaları şarj edebilmektedir. Daha küçük elektrik motoru ve bataryaların kullanılması paralel hibrit sistemin fiyatını seri hibrit sisteme göre daha düşük kılmaktadır. Burada içten yanmalı motor direkt olarak tekerleklere bağlı olduğu için seri hibrit sisteme göre toplam enerji dönüşüm verimi daha yüksektir. Ayrıca hem İYM hem de elektrik motoru aynı anda güç sağladığı için aracın gücü daha fazladır. Paralel hibrit araçlarda sistemin araca nasıl entegre edildiğine bağlı olarak %25 ila %60 arasında yakıt tasarrufu sağlanabilir [6].

Seri-paralel hibrit konfigürasyonu seri ve paralel konfigürasyonun bileşkesi olarak karışımına çıkmaktadır. Burada İYM direkt olarak tekerleklere bağlıdır. Tasarımın özelliği İYM'nin transmisyon ile bağlı olmayıp seri tahrik sisteminde olduğu gibi generatör ile bağlı olmasıdır. Sonuçta İYM optimum verimde çalışabilmektedir. Düşük hızlarda araç seri hibrit sistemde olduğu gibi çalışmaktadır. Yüksek hızlarda ise İYM devreye girerek tekerleklere güç verir ve seri tahrikteki gereksiz enerji dönüşümleri ile kaybedilen enerji en düşük seviyeye indirilir [7].

Toyota Prius'da bu sistem kullanılmıştır. Burada amaç hem paralel hem de seri sistemin avantajlarını kullanarak İYM'nin en verimli noktada çalışmasını sağlamaktır. Otomotiv endüstrisinde şarj edilebilir EA'lar bir sonraki teknolojiye geçiş için mihenk taşı olarak düşünülmektedir. Bazı çevreler bir sonraki teknolojinin yakıt hücreli araçlar (FCV) olacağına inanırken, birçok kişi bunun bataryalı elektrikli araçlar olmasını

beklemektedir. Yakıt hücreli elektrikli araçların ticarileşmesi için henüz süre varken; bataryalı elektrikli araçlar 2015 yılı içerisinde dünyanın birçok bölgesinde satışa çıkarılmıştır [8].

### **2.3 Elektrikli ve Hibrit Elektrikli Araçların Alt Bileşenleri**

Elektrikli araçlarda çeşitli alt sistemler kullanılmaktadır. Bunlar sırası ile güç üretim sistemleri, enerji depolama sistemleri, güç kontrol sistemleri, tahrik sistemleri ve enerji yönetim sistemleridir.

Elektrikli araçların mimarisi ne olursa olsun elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüşecektir. Elektrikli araç teknolojisinde güç üretim modülü ana hareketlendirici ve generatör ile birleşik bir modül olarak düşünülmelidir. Güç üretim sistemleri doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır. Doğrudan güç üretim sistemleri arasında bataryalar ve hidrojen enerjisi ile çalışan yakıt pilleri yer almaktadır. Dolaylı enerji üretim sistemleri ise doğrudan enerji kaynaklarının yanında ana hareketlendirici tarafından sürülen generatörler kullanılmaktadır. Ana hareketlendirici ve generatörün birlikte kullanılmasıyla belli bir akım-gerilim karakteristiğine sahip elektrik enerjisi üretilmektedir. Ana hareketlendiriciler ve generatörler özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Elektrikli araçlarda alternatif akım generatörleri ısı makinaları (İYM, gaz türbini, vb.) ile birlikte kullanılmaktadır [3].

Elektrikli ve hibrit elektrikli araç uygulamalarında bataryaların yüksek özgül güç, yüksek özgül enerji ve uzun çevrim ömrüne sahip olması beklenmektedir. Özgül enerji yoğunluğu enerji kaynağının birim kütlesinde depolanan enerji miktarını göstermektedir. Özgül güç ise yine enerji kaynağının birim kütlesinin verdiği güç olarak ifade edilmektedir. Elektrikli araçlarda enerji depolama sistemlerinde bataryalar, volanlar ve süper kapasitörler kullanılmaktadır [3].

Elektrikli araç teknolojisinde güç kontrol sistemleri önemli bir yer tutmaktadır. MOSFET, IGBT, IGCT (Insulated gate controlled thyristor) ve MCT (mos controlled thyristor) gibi yarı iletken anahtarların ilerleyen teknoloji ile elektrik sistemlerinin kontrolünde önemli gelişmeler sağlanmıştır. Tahrik sisteminin kontrolü, DC gerilimde

AC gerilim üretilmesi, yakıt pilinin çıkış geriliminin regüle edilmesi, bataryanın şarj edilmesi, klasik güç elektroniği devrelerinin kontrolü ile gerçekleştirilmektedir [3].

Güç kontrol sistemleri elektrikli araçlarda, klasik güç elektroniği devrelerinden oluşmaktadır. Bu devreler 4 başlık altında incelenebilir:

- Doğrultucular (AC/DC),
- Çeviriciler (DC/DC),
- Eviriciler (DC/AC),
- Kıyıcılar (AC/AC).

Tahrik sistemleri elektrik motoru, güç elektroniği ve kontrol ünitelerinden oluşmaktadır. Elektrikli araçlarda motorlardan beklenen özellikler şunlardır:

- Yüksek anlık güç,
- Yüksek güç yoğunluğu,
- Düşük hızlarda yüksek moment,
- Yüksek hızlarda yüksek güç,
- Sabit moment ve sabit güç aralığında geniş hız aralığı,
- Geniş moment ve hız aralığında yüksek verim,
- Faydalı frenleme durumunda yüksek verim,
- Sağlamlık,
- Kabul edilebilir maliyet.

Elektrikli araçlarda ilk zamanlarda kontrolünün kolaylığı açısından tercih edilen DC motor, gelişen motor kontrol teknolojisi ile yerini AC motorlara bırakmıştır. DC motorun yaygın kullanımının azalmasına fırça–kolektör bakımı neden olmuştur. Asenkron motorun hız kontrolündeki sıkıntının aşılması ile bu motorun elektrikli araçlarda kullanımını artırmıştır. Özellikle sincap kafesli asenkron motorlar, üretim kolaylığı, düşük maliyet ve sağlamlık açısından tercih edilmektedir [3]. Elektrikli araçlarda geçmişten günümüze tercih edilen motorlar şunlardır:

- DC motor,



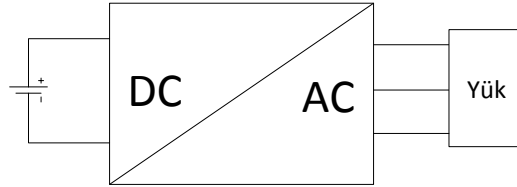
- Asenkron motor,
- Sürekli mıknatıslı motor,
- Anahtarlamaalı relüktans motoru.

Elektrikli ve hibrit elektrikli araçların giderek yaygınlaşması, araçları oluşturan alt birimlere yönelik araştırmaların artmasını sağlamıştır. Özellikle araçların menzilin artırılması ve enerji verimliliği araştırmaların odaklandığı noktalardır.

Tez çalışmasında Tübitak 1003 projesi kapsamında elektrikli araçlar için bir inverter devresi tasarlanmıştır. Tasarlanan inverter devresi ile 3 fazlı asenkron motor kontrol edilmektedir. Tez çalışmasında, kurulan motor sürücü devrenin verimi yüksek örnekleme hızına sahip veri toplama kartı tabanlı bir sistem ile farklı yükleme koşullarında analiz edilmiştir. Yüksek örnekleme hızına sahip veri toplama kartı ile hassas bir ölçüm yapılabildiği gibi diğer verim ölçüm yöntemlerinden daha ekonomik çözüm yolu sunulmuştur.

### DC/AC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

DC/AC dönüştürücüler, (inverterler) DC giriş gerilimini istenilen genlik ve frekansta AC çıkış gerilimine çeviren güç elektroniği devreleridir. Genel bir invertere ait blok şeması Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Tek faz, üç faz veya daha fazla faz çıkışına sahip olarak tasarlanabilmektedirler. Elektrikli araçların tahrik sistemlerinde 3 fazlı PWM inverterler asenkron, senkron ve sürekli mıknatıslı motor kontrollerinde kullanılmaktadırlar. Yaygın olarak IGBT anahtarlar anahtarlama elemanı olarak kullanılmaktadırlar. Anahtarlama elemanı seçilirken anahtarlama elemanının nominal gerilimi, anahtarlama esnasında oluşan gerilim yükselmeleri nedeniyle genelde DC bara geriliminin iki katı olarak seçilmektedir. [21].



Şekil 3. 1 İnverter devresinin blok diyagramı

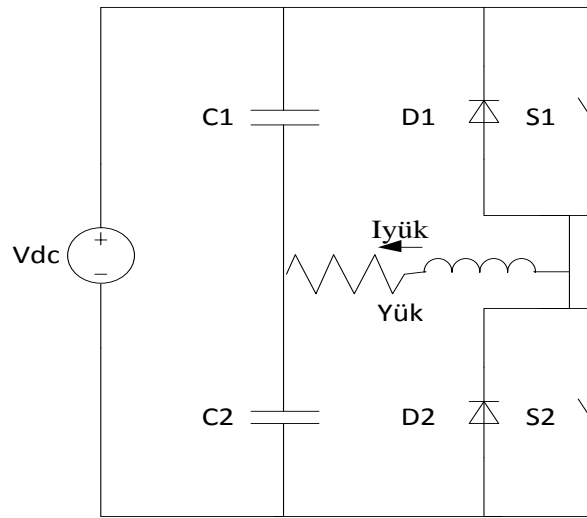
Girişinde DC gerilim kaynağı olan inverterlere gerilim kaynaklı inverter, DC akım kaynağı olan inverterlere ise akım kaynaklı inverter denilmektedir. Ayrıca inverterler kontrol yöntemleri bakımından da sınıflandırılmaktadır ve en yaygın olanları kare dalga inverter ve PWM inverterlerdir.

Anahtarlama için kullanılan diğer PWM tekniklerinden bazıları, histerisiz bant PWM ve uzay vektör PWM tekniğidir. Bu bölümde inverterler kontrol tekniklerine göre ele alınarak, kare dalga inverterin çalışma prensibi anlatılacak ve tez çalışmasında sinüzoidal PWM (SPWM) tekniği uygulanan inverter üzerine çalışılmıştır.

### 3.1 Kare Dalga İnverterler

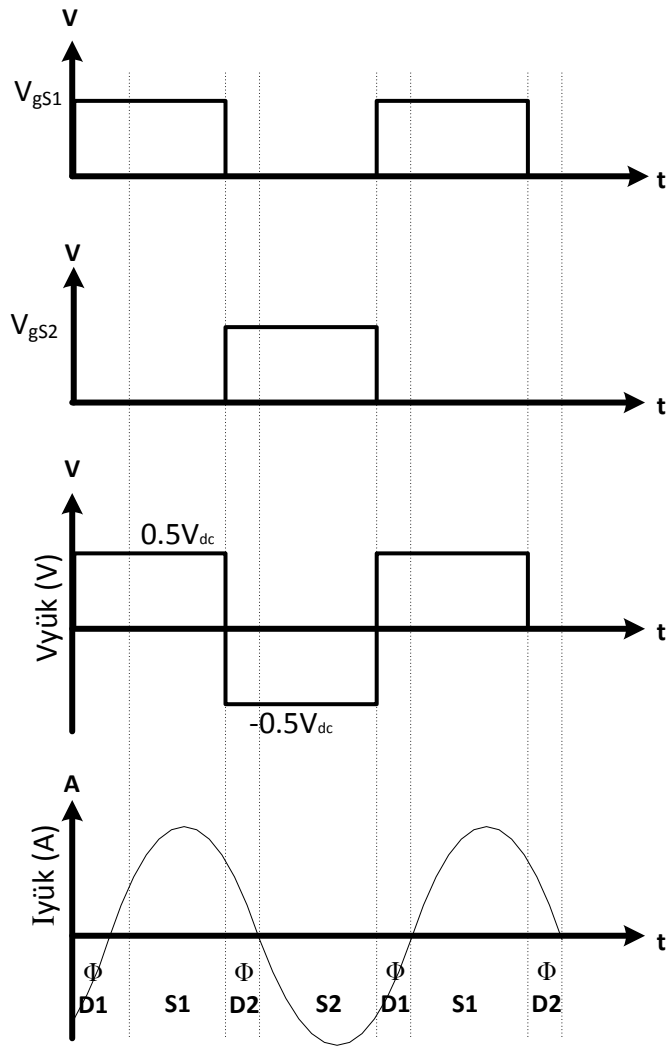
#### 3.1.1 Yarım Köprü Kare Dalga İnverterler

İnverterlerde yarıiletken anahtarların kapı girişlerinde (Gate) kare dalga sinyallerin kullanılmasıyla kontrol edilen inverterlere kare dalga inverterler denilmektedir. Yarım köprü kare dalga inverter seri bağlı iki anahtarlama elemanı ve iki kondansatör kullanarak bir DC kaynaktan AC çıkış üretmektedir. Yük kondansatörlerin ara noktası ile anahtarların ara noktasına bağlanmaktadır. Anahtarlar periyodun yarısında iletimde diğer yarısında ise kesimde çalıştırılarak kare dalga çıkış alınmaktadır [21]. Yarım köprü kare dalga inverter Şekil3.2’de verilmiştir.



Şekil 3. 2 Yarım köprü kare dalga inverter

Yükün endüktif olduğu kabul edilirse anahtarlama sinyalleri, çıkış gerilimi ve akımı Şekil 3.3’te verilmiştir. Endüktif yükün doğal etkisinden dolayı çıkış akım sinyalinde  $\Phi$  kadar bir gecikme olmaktadır.

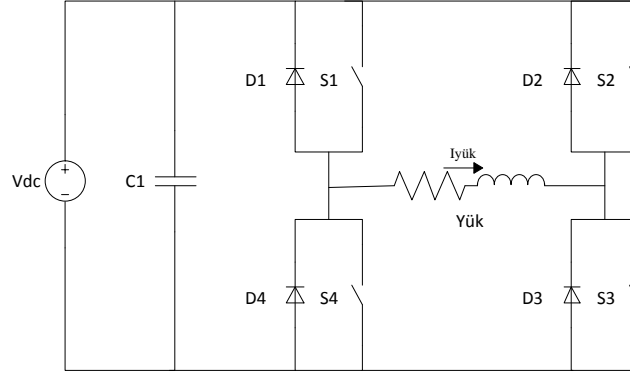


Şekil 3. 3 Yarımc köprü inverter anahtarlama, çıkış akımı ve gerilimi sinyalleri

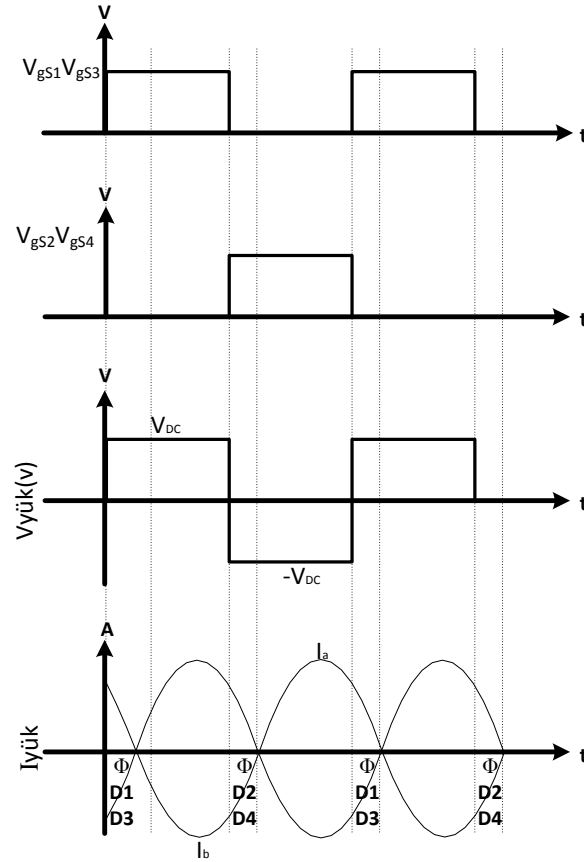
İnverterde S1 anahtarı ilettime girdiğinde girişten çıkışa S1 anahtarı ve C1 kondansatörü üzerinden akım akar.  $180^\circ$  sonunda S1 anahtarı kesime girer ve bu aralıkta akmakta olan yük akımı D2 ve C2 üzerinden 0 değerini alıncaya kadar akar. Bu aralıkta yük üzerinde pozitif gerilim oluşur.  $180^\circ$  iletim modunun diğer yarısında S2 anahtarı ilettime girer ve yük akımının yönü değişir ve akım S2 ve C2 üzerinden akar.  $360^\circ$  sonunda akım D1 ve C1 üzerinden 0 oluncaya kadar akmaya devam eder. Bu aralıkta yük üzerinde negatif gerilim oluşur. Yük üzerinde oluşan pozitif ve negatif gerilim kaynak geriliminin yarısı kadardır.

### 3.1.2 Tam Köprü Kare Dalga İnverterler

Tam köprü kare dalga inverter, iki adet yarım köprü kare dalga inverterin paralel olarak bağlanmasıyla oluşturulmaktadır. Örnek olarak Şekil 3.4'te tam köprü inverter modeli verilmiştir. Tam köprü inverterde, DC gerilim kaynağı ve dört adet iki yönlü anahtar kullanılmaktadır.



Şekil 3. 4 Tam köprü kare dalga inverter

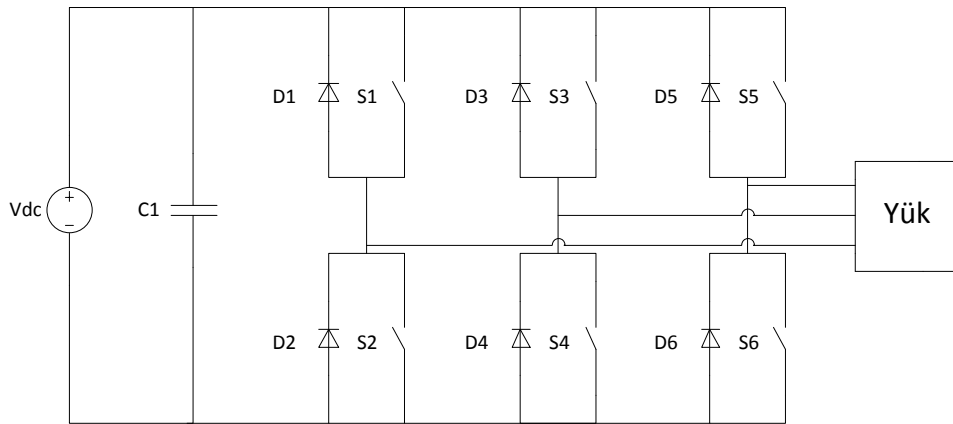


Şekil 3. 5 Tam köprü kare dalga inverter anahtarlama, çıkış akımı ve gerilimi sinyalleri

Tek fazlı inverterde anahtarların kontrol girişlerine uygun işaretler gönderilerek sırayla ilettime geçirilirler. Kare dalga inverttere yönelik kontrol sinyalleri ve çıkış sinyalleri ve ters paralel diyotların iletim aralıkları Şekil 3.5'te gösterilmiştir. İnverterin çalışma süresinde S1 ve S3 anahtarı periyodun yarısı kadar ilettime geçirilir ve yük akımını taşıyarak çıkışta DC gerilimin genliği kadar pozitif gerilim oluştururlar. Yarı periyodun sonunda bu iki anahtar kesime sokularak S2 ve S4 anahtarları ilettime girer. Çıkışta DC gerilimin genliği değerinde negatif gerilim oluşturulur. Böylece çıkışa periyodun yarı süresince pozitif gerilim, diğer yarısında ise negatif gerilim uygulanarak, harmonikler içeren AC gerilim oluşturulur. Çıkıştaki yükün endüktif olması akımla gerilim arasında  $\Phi$  açısı kadar bir faz farkı oluşmasına neden olur. Bu aralıkta anahtarlar üzerinden ters akım geçişi ters paralel diyotlar aracılığı ile sağlanır [21].

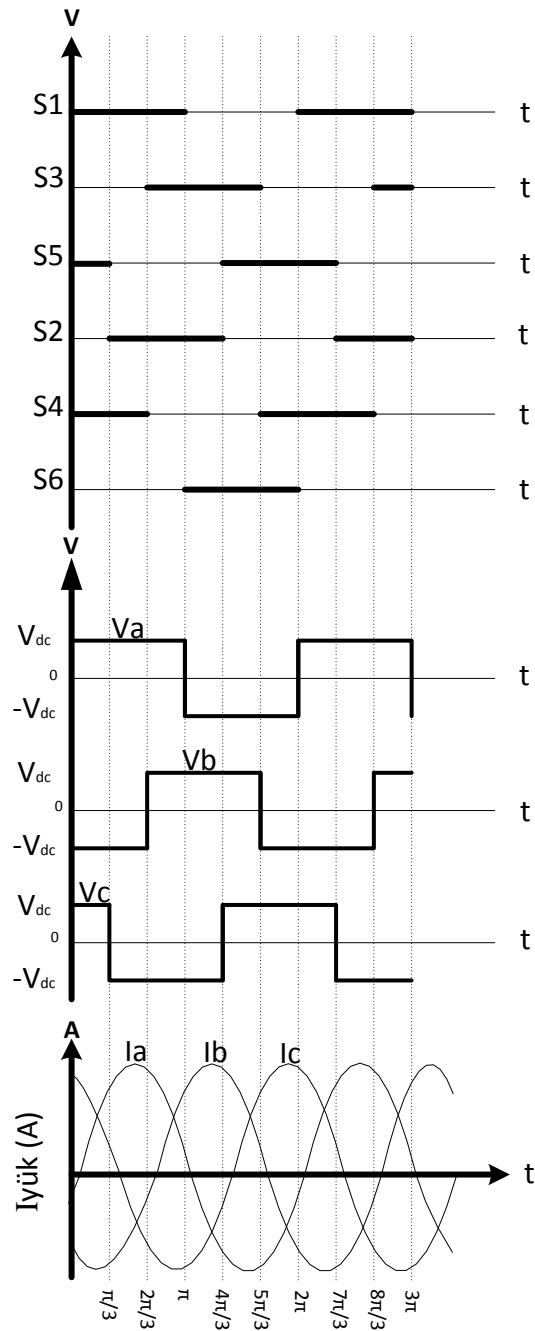
### 3.1.3 Üç Fazlı Kare Dalga İnverter

Üç fazlı inverterler üç adet yarım köprü inverterin paralel olarak bağlanmasıyla oluşturulmaktadır.



Şekil 3. 6 Üç fazlı kare dalga inverter

Çalışma prensibi yarım köprü ve tam köprü inverterlere çok benzerdir. Yük seri bağlı anahtarların orta noktalarına bağlanarak beslenmektedir. Kontrol yöntemi olarak genellikle  $180^\circ$  iletim yöntemi kullanılmaktadır. Faz gerilimleri arasında  $120^\circ$ 'lik fark anahtarlama sinyallerine uygulanmaktadır. Böylece üç fazlı çıkış alınmaktadır. Üç fazlı inverter devresi Şekil 3.6'da verilmiştir. Üç fazlı kare dalga inverttere yönelik kontrol sinyalleri ve çıkış sinyalleri Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 7 Tam köprü kare dalga inverter anahtarlama, çıkış akımı ve gerilimi sinyalleri

### 3.2 Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonlu (SPWM) İnverterler

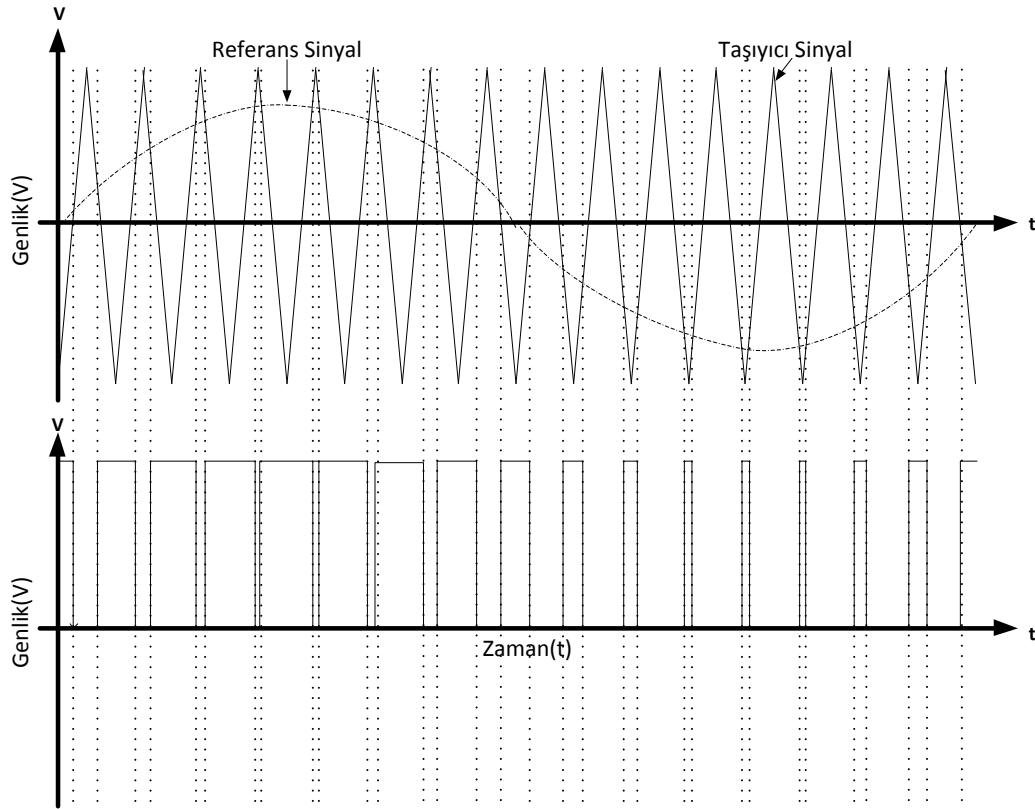
SPWM inverterler yarım köprü, tam köprü ve üç fazlı sinüzoidal PWM inverter olarak sınıflandırılabilir. Çalışma prensibi kare dalga inverterlerle benzerdir.

PWM kontrol yönteminde anahtarlama elemanlarına giden kapı sinyallerinin doluluk oranı değiştirilerek çıkış geriliminin ayarlanması prensibi kullanılmaktadır. Genellikle doluluk oranı sabit frekans altında gerçekleştirilmektedir. Doluluk oranı (D) bir periyot süresince anahtarın iletimde kalma süresi olarak tanımlanmaktadır. T periyot,  $t_{on}$  iletim süresi olmak üzere doluluk oranı formülü aşağıda verilmiştir.

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.1)$$

SPWM tekniği inverterlerde en yaygın kullanılan ve bilinen anahtarlama tekniğidir. Bu teknik temelde bir referans sinüs sinyalinin taşıyıcı sinyalle kıyaslanmasına dayanmaktadır. Şekil 3.8’de bu kıyaslama verilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere sinüs sinyalinin taşıyıcı sinyalden genlik olarak daha düşük olduğu noktalarda anahtarlama sinyali oluşmaktadır. Aynı faz kolu üzerinde seri olan diğer anahtarlama elemanına ise oluşan anahtarlama sinyalinin lojik olarak tersi gitmektedir. Tam köprü inverterde ikinci faz kolunun anahtarlama sinyalleri referans sinyalinin periyodun yarısı kadar ötelenmesi ile elde edilir. Üç fazlı sistemler için referans sinyal periyodun üçte biri kadar ötelenerek anahtarlama sinyalleri oluşur.





Şekil 3. 8 Referans sinyal ve taşıyıcı sinyalin karşılaştırılması

Kıyaslamada genellikle taşıyıcı işaretin frekansı ve genliği referans sinyalden daha büyüktür. Kıyaslama işleminin mikroişlemcilerde doğal örnekleme olarak gerçekleştirilmesi mümkün değildir ve bu işlem referans sinyalin örneklenmesi ile mümkün olmaktadır. SPWM yönteminde çıkış gerilimde etkin olan iki büyüklük bulunmaktadır; modülasyon indeksi ( $M$ ) ve taşıyıcı sinyal oranı ( $M_f$ ). Bu iki büyüklük anahtarlama sinyallerinin doluluk oranına doğrudan etki etmektedir. Bunlardan modülasyon indeksi kıyaslanan sinyallerin genlik oranını, taşıyıcı oranı ise frekans oranını ifade etmektedir. İnverter çıkış gerilimi ( $V_{AC}$ ) modülasyon indeksinin giriş gerilimi ile çarpımıyla elde edilmektedir [22]. Aşağıda modülasyon indeksi, taşıyıcı oranı ve çıkış gerilimi hesabının yapıldığı formüller sırasıyla verilmiştir.

$$M = V_r/V_t \quad V_t : \text{Taşıyıcı sinyal genliği} \quad (2.2)$$

$V_r$  : Referans sinyal genliği

$$M_f = f_t/f_r \quad f_t : \text{Taşıyıcı sinyal frekansı} \quad (2.3)$$

$f_r$  : Referans sinyal frekansı

$$V_{AC} = M \times V_{DC} \quad V_{DC} : \text{İnverter giriş gerilimi} \quad (2.4)$$

Taşıyıcı sinyal ve referans sinyaller Şekil 3.8’de verildiği gibidir. Sinyallerin kesişme noktaları doluluk oranını yani anahtarların iletimde kalma süresini belirlemektedir. Referans sinyal çıkış geriliminin temel frekansını, taşıyıcı sinyal ise anahtarlama elemanlarının bir periyot boyunca kaç kere anahtarlama yapacağını belirlemektedir. Çıkış geriliminin frekansı artırılmak istenirse referans sinyalin frekansı, genliği artırılmak istenirse modülasyon indeksi artırılmalıdır.

Bu tez çalışmasında elektrikli araçlar için tasarlanan üç fazlı inverter topolojisi kullanılarak asenkron motor SPWM yöntemiyle sürülecektir. Taşıyıcı sinyal 10kHz ve çıkış akımı 50 Hz frekansında olacaktır. Motor kontrolü için açık çevrim  $\frac{V}{f}$  kontrolü kullanılacaktır.

## BÖLÜM 4

### BENZETİM ÇALIŞMASI

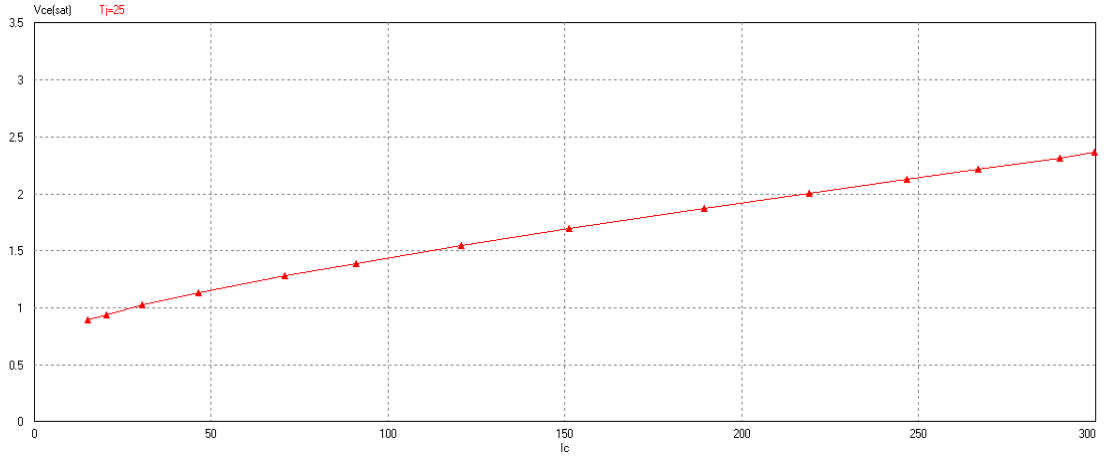
Deneysel çalışmadan önce kurulacak inverter devresi benzetim ortamında modellenerek verim analizi yapılmıştır. Bu amaçla PSIM (PowerSim) programı kullanılmıştır. PSIM özellikle güç elektroniği ve motor sürücü devreleri için tasarlanmış bir yazılımdır. Güç elektroniğinde kullanılan anahtarlama elemanları benzetim ortamında rahatlıkla modellenebilmektedir. Ayrıca anahtarlama elemanlarında iletim ve anahtarlama esnasında meydana gelebilecek kayıpların analiz edilmesini ve termal koşulların hesaplanmasını da sağlamaktadır.

Tez çalışmasında oluşturulacak inverter devresinde kullanılacak anahtarlama elemanlarının davranışını incelemek için PSIM'in sunduğu "PSIM Device Database Editör" ile deneysel çalışmada kullanılacak IGBT anahtarı katalog verileri kullanılarak modellenmiştir. Böylece anahtarların iletim ve anahtarlama kayıpları simülasyon ortamında kolayca hesaplanabilmektedir [24].

IGBT anahtar modeli, katalogda verilen grafikler kullanılarak oluşturulabilmektedir. IGBT kataloğunda verilen  $V_{ce(sat)}-I_c$  değişim grafiği modele Şekil 4.1'te girilmiştir. Bu grafik kullanılarak IGBT anahtarında oluşan iletim kaybı

$$P_{loss\_con\_IGBT} = V_{ce(sat)}I_c \quad (3.1)$$

formülü ile hesaplanabilmektedir.



Şekil 4. 1 V<sub>ce(sat)</sub>-I<sub>c</sub> grafiği

Yarı iletken anahtarların ilettime ve kesime girme anlarında iki farklı anahtarlama kaybı mevcuttur. Bu kayıpları hesaplayabilmek için hem E<sub>on</sub>-I<sub>c</sub> grafiği hem de E<sub>off</sub>-I<sub>c</sub> grafiği PSIM Database Editör kullanılarak anahtar modeline girilmiştir. İlettime girme kaybı

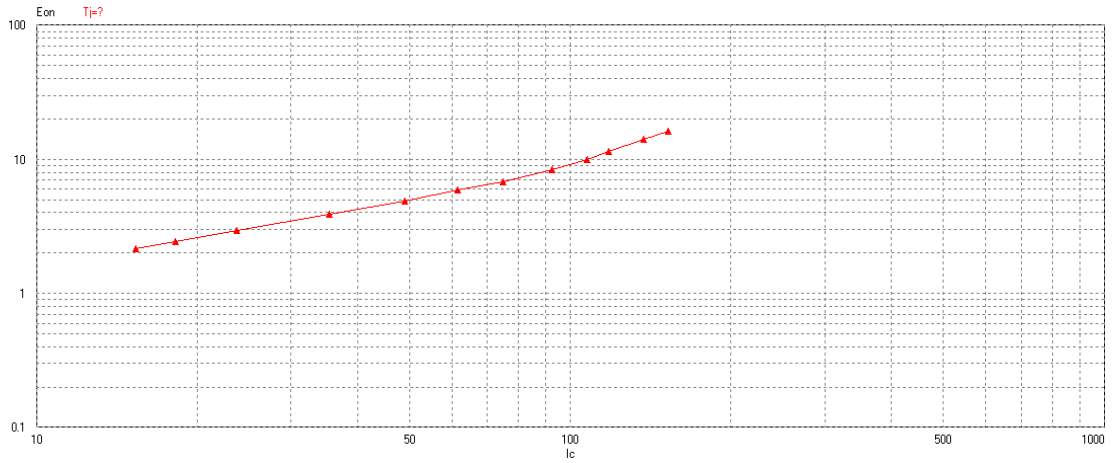
$$P_{loss\_turnon\_IGBT} = E_{on}f \quad (3.2)$$

formülü ile hesaplanırken, kesime girme kaybı

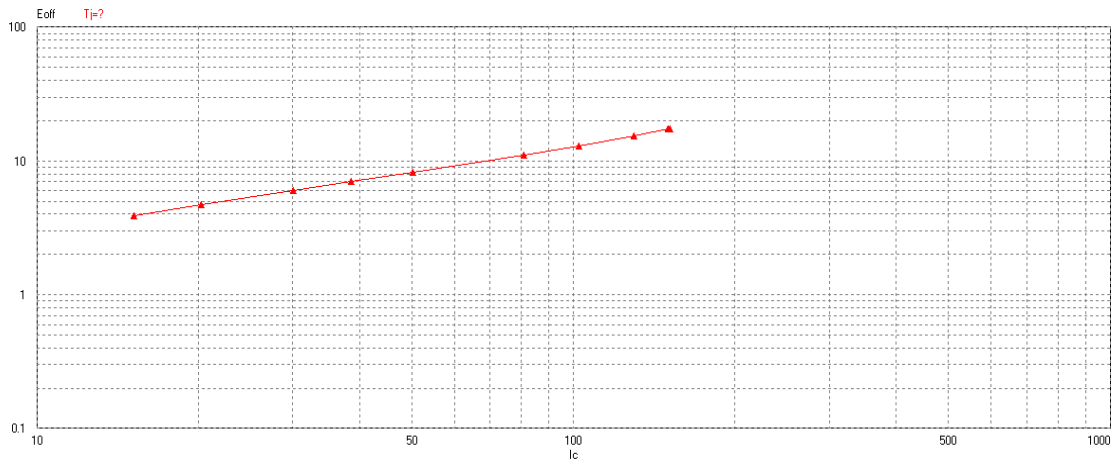
$$P_{loss\_turnoff\_IGBT} = E_{off}f \quad (3.3)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. P<sub>loss\_turnon\_IGBT</sub> anahtar ilettime girerken oluşan kaybı, E<sub>on</sub> ilettime girme enerjisini, P<sub>loss\_turnoff\_IGBT</sub> anahtar kesime giderken oluşan kaybı, E<sub>off</sub> kesime girme enerjisini ve *f* anahtarlama frekansını ifade etmektedir.

IGBT kataloğundan alınan E<sub>on</sub>-I<sub>c</sub> ve E<sub>off</sub>-I<sub>c</sub> grafikleri Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4. 2 E<sub>on</sub>-I<sub>c</sub> grafiği

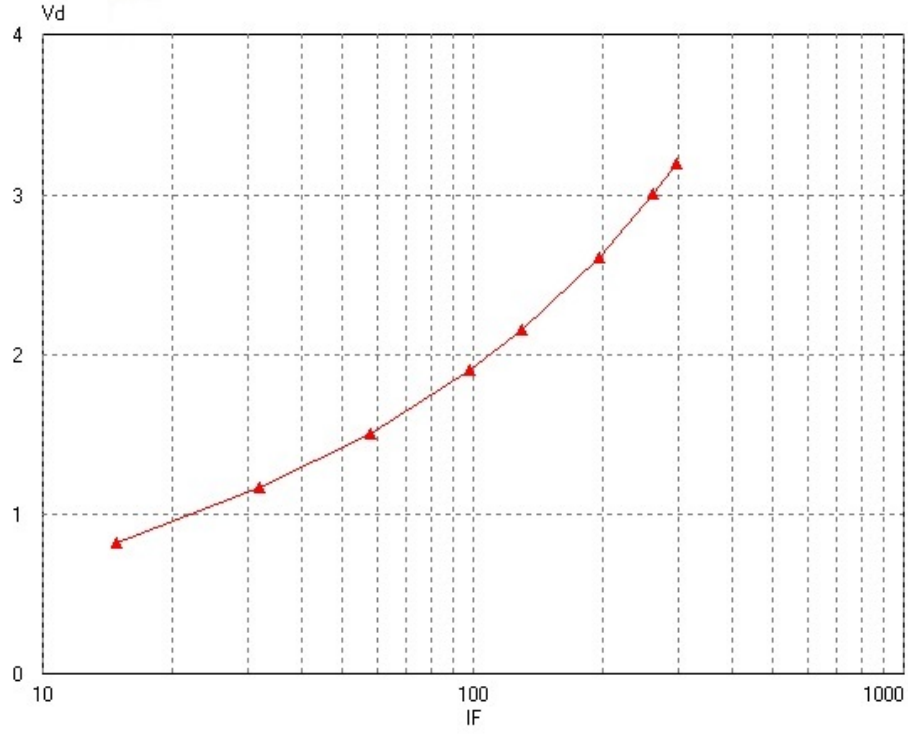


Şekil 4. 3 E<sub>off</sub>-I<sub>c</sub> grafiği

Burada IGBT anahtar modeli oluşturulurken anti paralel diyodun kaybının hesaba katılabilmesi için  $V_d$ - $I_f$  grafiğinin benzetim çalışmasına dahil edilmesi gerekir. Diyodun iletim esnasında oluşturduğu kayıp (3.4) ile ifade edilmektedir:

$$P_{loss\_con\_diode} = V_d I_f \quad (3.4)$$

$P_{loss\_con\_diode}$  diyodun iletim kaybını,  $V_d$  ters paralel diyot üzerindeki gerilim düşümünü  $I_f$  ise diyot üzerinden geçen akımı ifade eder.  $V_d$  ve  $I_f$  parametrelerini PSIM grafik üzerinden almaktadır. IGBT kataloğundan alınan  $V_d$ - $I_f$  grafiği Şekil 4.4'te verilmiştir.



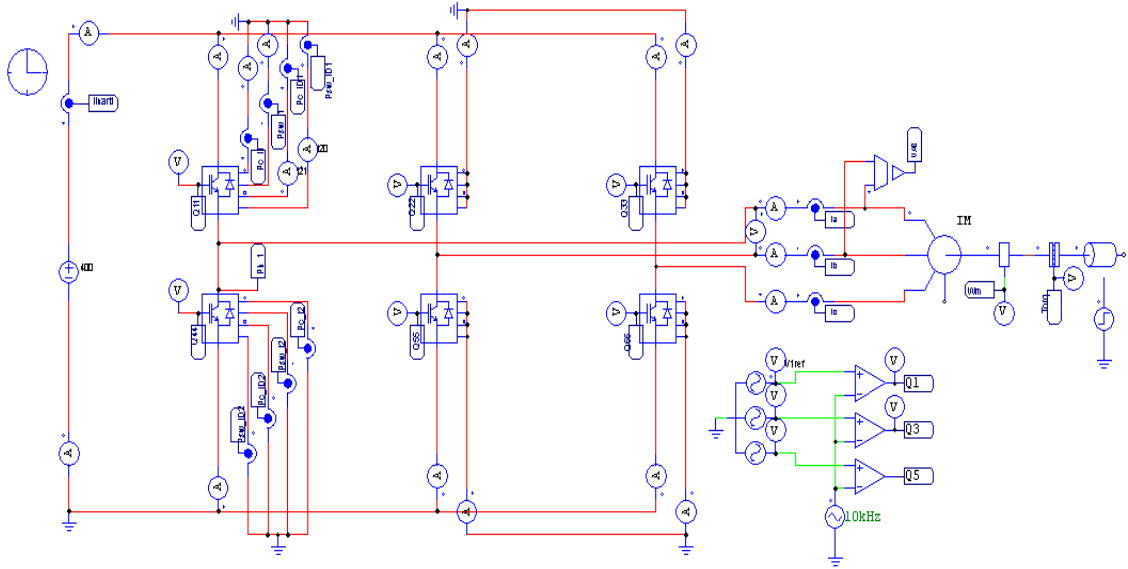
Şekil 4. 4 V<sub>d</sub>-I<sub>f</sub> grafiği

Diyot kesime girerken ters toparlanma süresince bir kayıp oluşmaktadır. Diyodun kesime girme kaybı (3.5)'te ifade edilmiştir.

$$P_{loss\_turnoff\_diode} = \frac{1}{4} Q_{rr} f V_R \quad (3.5)$$

$P_{loss\_turnoff\_diode}$  diyodun kesime girme kaybını,  $Q_{rr}$  diyodun ters toparlanma şarjını,  $f$  anahtarlama frekansını ve  $V_r$  diyodun ters blokaj gerilimini ifade etmektedir.

Benzetim çalışmasında DC bara gerilimi 400V ve anahtarlama frekansı 10 kHz seçilmiştir. Yük olarak asenkron motor kullanılmış ve açık çevrim  $\frac{V}{f}$  kontrolü ile farklı yüklenme durumları için verim değerleri hesaplanmıştır. İnverter devresinin verimi, giriş gücü ve inverter devresindeki kayıplar dikkate alınarak hesaplanan çıkış gücü kullanılarak hesaplanmıştır. PSIM ortamında oluşturulan IGBT anahtar modeli ile kurulan inverter devresi Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 5 IGBT anahtarı ile kurulmuş 3 fazlı inverter devresine ait şematik

İnverter devresinin giriş gücü hesabında DC bara geriliminin ortalama değeri ve inverter devresinden çekilen giriş akımının ortalama değeri dikkate alınarak

$$P_{giriş} = V_{giriş_{ortalama}} I_{giriş_{ortalama}} \quad (3.6)$$

formülü ile hesaplanmıştır. IGBT anahtar modeli ile kurulan inverter devresinde anahtarlar ve ters paralel diyotların iletim ve anahtarlama anlarında meydana gelen kayıplar giriş gücünden çıkarıldığında çıkış gücü elde edilmektedir.

$$P_{çıkış} = P_{giriş} - P_{kayıplar} \quad (3.7)$$

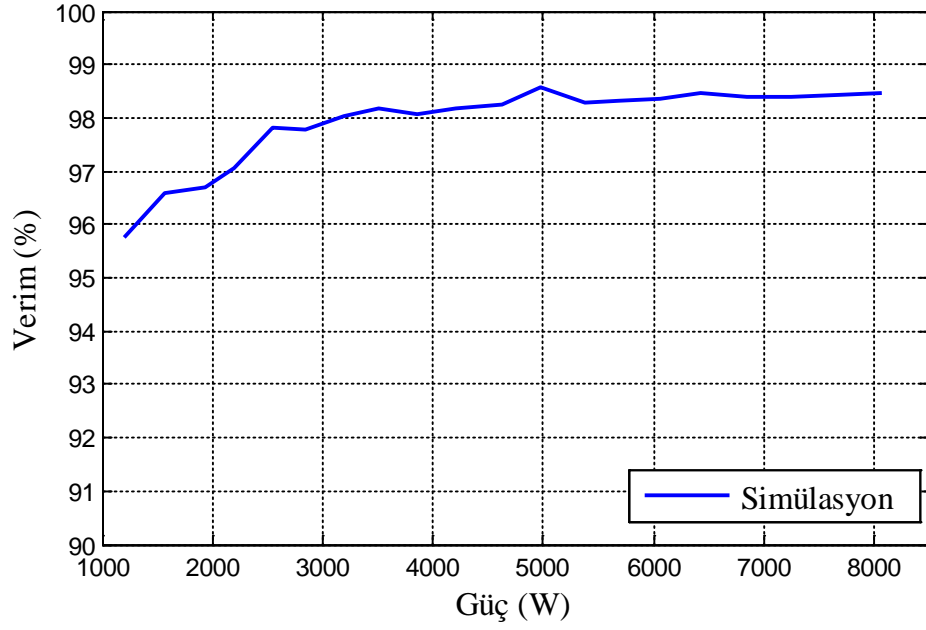
Bu denklemde  $P_{giriş}$  giriş gücünü,  $P_{çıkış}$  çıkış gücünü ve  $P_{kayıplar}$  ise anahtarların iletim ve anahtarlama anlarında oluşan toplam kaybı ifade etmektedir ve PSIM programı tarafından girilen grafikler kullanılarak hesaplanmaktadır.

İnverter devresinin verimi

$$\eta = P_{çıkış} / P_{giriş} \quad (3.8)$$

formülü ile hesaplanmaktadır.

Benzetim alışmasında IGBT anahtarıyla kurulan inverter devresinden 0-8 kW aralığında elde edilmiş verim eğrisi Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4. 6 İnverter verim grafiğı

PSIM ortamında 50 A değeriinde PM50RL1A120 IGBT anahtarı kullanılarak verim analizi yapılmıştır. Elde edilen verim eğrisi deneysel çalışmalar için üst limiti ortaya koymaktadır. Elde edilen verim eğrisi daha sonra deneysel sonuçlarla karşılaştırılacaktır.

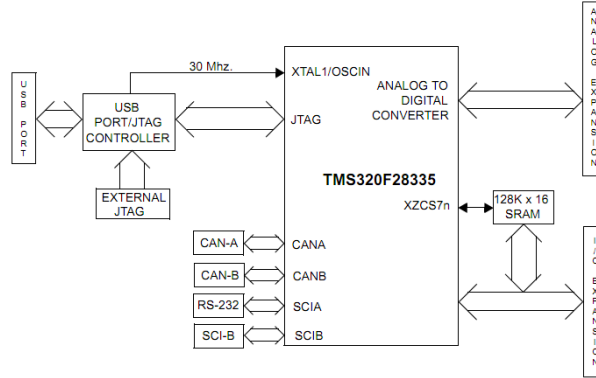


### KONTROL ALGORİTMASI ve DSP PROGRAMLAMA

Deneysel çalışmada projede önerilen elektrikli araçlara yönelik inverter devresinin kontrol algoritmasını uygulayabilmek amacı ile Texas Instruments firmasında ait TMS320F28335 DSP temin edilmiştir. TMS320F28335 DSP'nin uygulama açısından aşağıda belirtilen özelliklere sahip olması tercih sebebi olmuştur:

- TMS320F28335 Dijital Sinyal Denetleyici,
- 150 MHz Çalışma Hızı,
- On-chip 32-bit kayan noktalı (floating point unit) birim
- 68K bytes on-chip RAM,
- 512K bytes on-chip Flash hafıza,
- 256K bytes off-chip SRAM hafıza,
- 16 giriş kanallı on-chip 12 bit Analog Dijital (A/D) dönüştürücü,
- 18 kanallı 16 bit PWM modülü,
- Çoklu genişletme konnektörleri(analog, I/O),
- Kart üzeri USB portu,
- CCS, C/C++ , Matlab, VISSIM desteği.

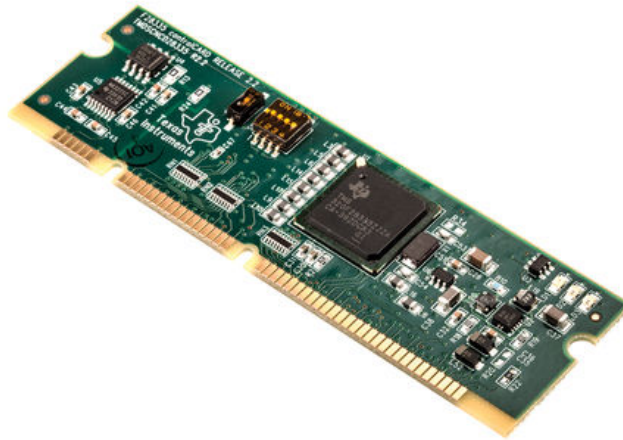
Şekil 5.1’de TMS320F28335’in yukarıda verilen bazı özellikleri görülmektedir.



Şekil 5. 1 TMS320F28335 blok diyagramı[25]

Motor kontrolünde kullanılacak olan TMS320F28335 DSP yazılım geliştirme ve çalıştırma konusunda kullanıcı için uygun bir platform sunmaktadır. Kod geliştirmenin kolaylaştırılması ve hata ayıklamanın daha kısa sürede yapılması için C2000 Code Composer Studio TM sürücüleri sağlanmıştır. Buna ek olarak JTAG bağlantıları emulator için “assembly” ve “C” yüksek seviye hata ayıklama dili ile birlikte ara yüz oluşturmaktadır.

İşlemciler genelde sabit (fixed) ve kayan (floating) noktalı olmak üzere ikiye ayrılırlar. TMS320F28335 DSP donanımsal olarak kayan ve sabit noktalı işlemler desteklenmektedir. Ayrıca IQ math isimli kütüphane desteği ile yazılım desteği de sağlanmaktadır [25]. Şekil 5.2 DSP kontrol kartını göstermektedir.



Şekil 5. 2 TMS320F28335 kontrol kartı [25]

## **5.1 TMS320F28335 DSP Özellikleri**

TMS320F28335 DSP'nin deneysel çalışmada kullanılan temel birimlerine ait bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

### **5.1.1 Dijital Giriş-Çıkış Birimi**

Dijital giriş çıkış birimi DSP ile çevresel birimler ile iletişimi sağlar. Dijital çıkış çevresel birimlere lojik seviyede '1' ve '0' değerini iletir, diğer taraftan dijital giriş ise çevresel birimlerden lojik değerlerin DSP'ye gelmesini sağlar. Dijital giriş çıkış birimi ile çevresel birimlerin durumu kontrol edilirken, çevresel birimlere doğrudan müdahale edilebilmektedir. Dijital giriş-çıkış komut kaydedicileri ayarlanarak kolayca giriş-çıkış birimleri ayarlanabilmektedir [25].

### **5.1.2 Darbe Genişlik Modülasyonu Birimi (ePWM)**

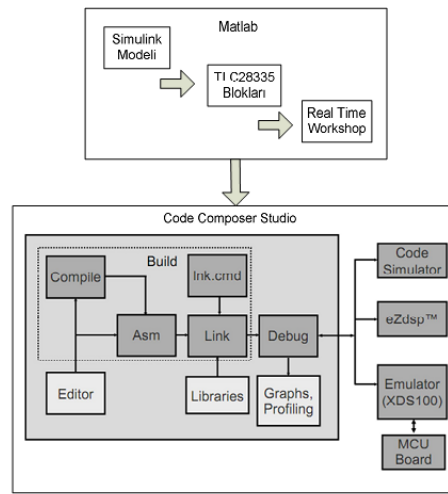
Elektrik motoru kontrolü inverter devrelerindeki anahtarlama elemanlarının iletme ve kesime girme zamanlarının ayarlanmasıyla gerçekleşmektedir. Anahtarlama zamanları gelişmiş sayısal hesaplamalara dayanmaktadır. DSP yüksek çözünürlükte darbe genişlik modülasyon birimi (ePWM) ile anahtarlama sinyallerinin hesabını yaparak dijital sinyalleri üretmektedir. Yüksek çözünürlükte sinyaller üreten TMS320F28335 DSP dijital motor kontrolünde kolaylık sunmaktadır. Bu birim ile üretilecek dijital PWM sinyallerinin frekansı ve ölü zamanları kolaylıkla ayarlanabilmektedir [25].

### **5.1.3 Analog-Dijital Dönüştürücü Birimi**

Günümüzde kontrolörlerden beklenen en önemli özelliklerden birisi olan çevresel elemanlardan gelen analog sinyallerin takip edilmesidir. Örneğin sıcaklık, hız, basınç, nem, moment, hız vb. büyüklüklerin sensörler aracılığı ile kontrolör ortamına alınması gereklidir. Bu birim kontrolörün gerçek dünyaya açılan ara yüzüdür. TMS320F28335 DSP analog sinyaller için 0...+3V ( $V_{min}$ - $V_{max}$ ) aralığında sinyalleri işlemektedir [25]. Gerçek sinyal ADC girişi arasına uygun sensör bu çevrimi yapabilecek kapasitede olmalıdır.

## 5.2 Kod Hazırlama İşlemi

Matlab/Simulink programında kullanılacak olan DSP için verilen bloklarla DSP algoritmaları geliştirilebilmekte ve Real Time Workshop (RTW), Link for Code Composer Studio Development Tools ve Embedded Target for TIC2000 DSP alt yazılımları ile geliştirilen algoritma “ASM” dilinde koda çevrilmektedir. Oluşturulan ASM kodu hedef cihaz üzerinde gerçek zamanlı olarak çalıştırılmaktadır [26]. Bu işlemlerin akış diyagramı Şekil 5.3’te verilmiştir.



Şekil 5. 3 Matlab/Simulink üzerinden DSP için kod üreten akış diyagramı [26]

Simulink ortamında bloklarla geliştirilen algoritma RTW ile kod elde edilmekte ve ‘.out’ uzantılı dosya CCS (Code Composer Studio) yazılım geliştirme ortamına aktarılabilmektedir. CCS ortamında DSP’nin donanımlarına ve kayıtlarına (register) erişim sağlayan destek dosyaları eklenerek bilgisayarın USB portu aracılığıyla kontrol kartına kod yüklemesi yapılmaktadır. CCS ortamındaki izleme penceresinden kayıt dosyaları, analog sinyaller, etiketlenen parametreler vb. takip edilebilmekte ve değiştirilebilmektedir.

## 5.3 Asenkron Motorda $\frac{V}{f}$ Kontrolü

Asenkron motorlar basit yapıları, dayanıklı olmaları ve nadiren arıza yapmaları gibi özellikleri ile endüstride en yaygın kullanılan motorlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Asenkron motorlar normal çalışma bölgesinde sabit hızda çalışmaktadırlar. Genellikle

endüstride birkaç değişik devirde çalıştırılırlar. Yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler asenkron motorların hız kontrolünde yeni uygulama alanları açmıştır.

Elektrik enerjisi ile tahrikte önemli bir yer tutan üç fazlı asenkron motorlar temel olarak şönt karakteristiğe sahip sabit devir sayılı bir tahrik makinesidir. Uygulama açısından doğru akım şönt makinesi ile kıyaslanamasa da kademeli ve sürekli devir ayarı imkânı sağlamaktadır. Bu özelliği ile sabit devir sayısı gerektiren uygulamalarda kullanılabilir. Bu özelliği ile sabit devir sayısı gerektiren uygulamalarda kullanılabilir.

Asenkron motorlarda devir sayısı ( $N_s$ ), kutup çifti sayısı ( $p$ ) ile ters orantılı ve stator geriliminin frekansına ( $f_s$ ) doğru orantılıdır (Denklem (2.4)).

$$N_s = \frac{60f_s}{p} \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'ten anlaşılacağı gibi asenkron motorun hızı doğrudan frekansla kontrol edilebilir. Fakat hız kontrolünde esas alınması gereken nokta motordan beklenen maksimum moment cevabı olmaktadır ve maksimum moment ihtiyacının geniş hız aralığında sağlanmasıdır. Bu gereksinim için asenkron motorda stator gerilimi ( $V_s$ ) ve stator frekansının oranı sabit tutulur ve bu kontrol yöntemi skaler hız kontrolü olarak adlandırılır. Stator gerilimi ile stator sargılarında endüklenen gerilim ( $E_s$ ) eşit kabul edilebilir ( $V_s \sim E_s$ ). Statorda endüklenen gerilimin ifadesi denklem (2.5)'teki gibidir.

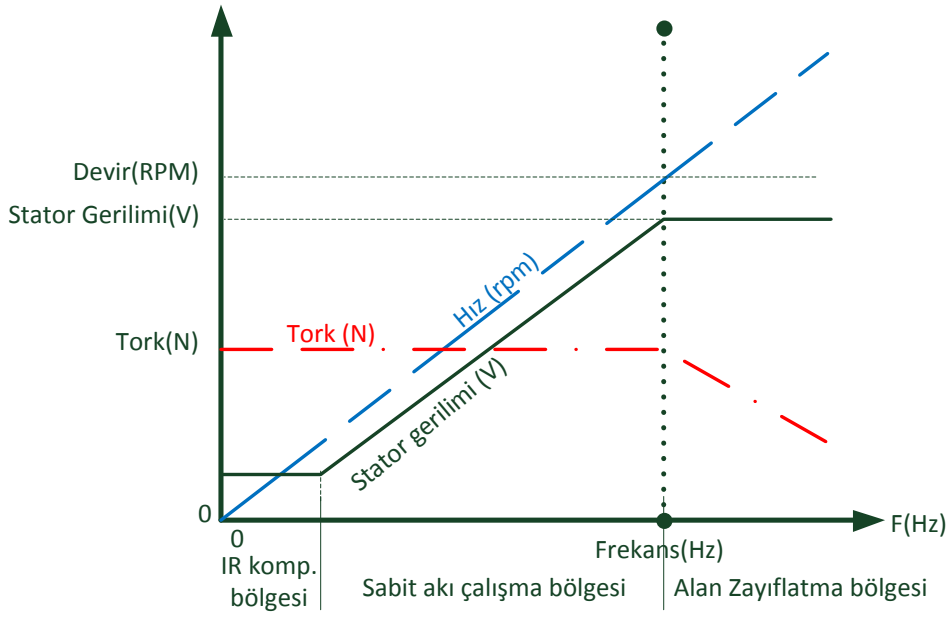
$$E_s = K f_s \Phi \quad (2.5)$$

Burada  $K$  sabit ve  $\Phi$  magnetik akıdır. Asenkron motorlarda moment akı ile doğru orantılıdır. Denklem (2.5)'ten görüldüğü gibi akı  $E_s/f_s$  oranına bağlıdır. Asenkron motorda akının maksimum olduğu noktada belirlenen  $E_s/f_s$  oranı sabit tutulursa düşük hızlar hariç asenkron motor geniş bir hız aralığında maksimum moment ihtiyacını karşılayabilecektir. Motorun etiket değerlerinden bu oran kolaylıkla belirlenebilir.

Düşük hızlarda  $E_s/f_s$  oranıyla yapılan kontrollerde stator direncinin etkisi artmaktadır ve kompanzasyon durumu gerekir.  $IR$  (stator direnci gerilim kompanzasyonu) kompanzasyonu olarak adlandırılan bu durum düşük hızlarda  $E_s/f_s$  oranı biraz artırılarak çözülmektedir. Nominal hızın üstündeki durumlarda stator sargılarının izolasyon problemlerine önlem alınması açısından nominal gerilimin üzerine çıkılmaz ve akı

zayıflatmalı bölgede yani düşük  $E_s/f_s$  oranında çalıştırılır. Maksimum moment noktasından uzaklaşılır [23].

Genel olarak hız kontrolünde uygulanan bu yöntem volt başına hertz ( $\frac{V}{f}$ ) yöntemi olarak adlandırılır ve stator geriliminin genliği ve frekansının ayarlanması için gereken özel sürücü devrelere ihtiyaç duyulur. Şekil 5.4'te  $E_s/f_s$  kontrol yöntemine ilişkin grafikler verilmiştir.



Şekil 5. 4 Stator gerilimi ve asenkron motor hız - tork değişim grafiği

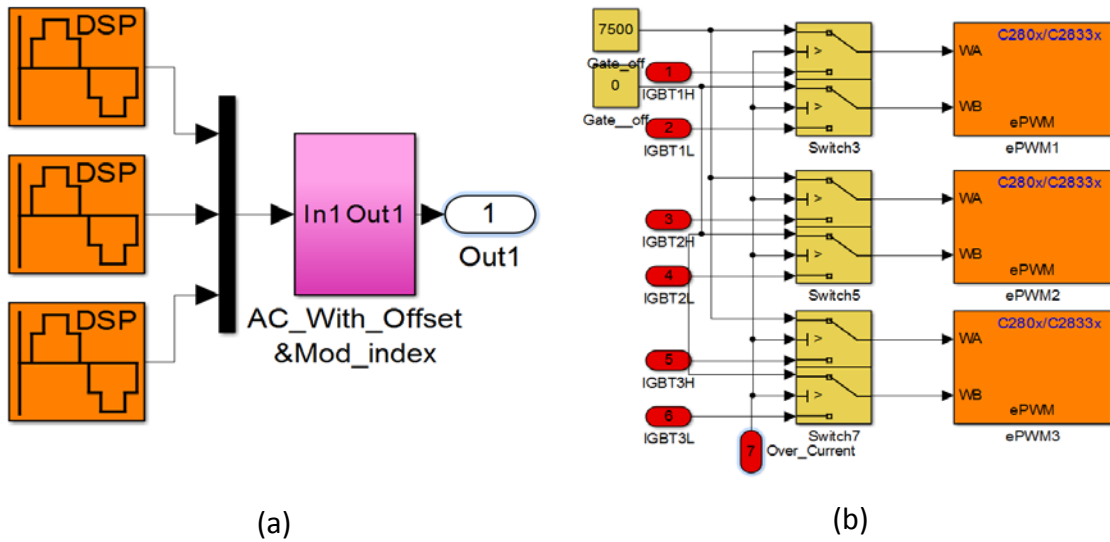
Şekil 5.4 asenkron motorun nominal frekansa kadar  $\frac{V}{f}$  kontrolü ile maksimum tork koşulu altında nominal hıza kadar sürülebileceğini göstermektedir. IR kompanzasyon bölgesi ve alan zayıflatma bölgesinde  $\frac{V}{f}$  oranını değiştirmektedir.

$\frac{V}{f}$  kontrol yönteminde hız geri beslemesi alınarak yapılan uygulamalara kapalı çevrim  $\frac{V}{f}$  kontrolü, hız geri beslemesi olmadan yapılan uygulamalara ise açık çevrim  $\frac{V}{f}$  kontrolü olarak adlandırılmaktadır.

Deneyisel çalışmada asenkron motorun kontrol yöntemi olarak açık çevrim  $\frac{V}{f}$  hız kontrolü belirlenmiştir.

#### 5.4 3 Fazlı İnverter Kontrolü için Geliştirilen Algoritma

Tez çalışmasında asenkron motor kontrolü açık çevrim hız  $\left(\frac{V}{f}\right)$  kontrolü ile gerçekleştirilmiştir. Asenkron motorun 3000 d/d olan hızda dönmesi için çıkış gerilimi nominal genlikte ve nominal frekansında olmalıdır. Bu bilgiler ışığında inverter çıkış gerilimi 220V ve frekansı 50Hz olarak belirlenir. Böylece  $\frac{V}{f}$  oranı 4,4 olarak hesaplanmıştır. Geliştirilen modelde 50 Hz'lik üç adet sinüs sinyal kaynağı kullanılarak 120° faz farkı koyulmuştur. Modülasyon indeksi 0,9 seçilerek anahtarlama sinyalleri için güvenlik bariyeri oluşturulmuştur. Anahtarlama frekansı olarak 10 kHz seçilerek PWM bloklarına 10 kHz'e tekabül eden 3750 değeri girilmiştir. 3750 SPWM için gerekli olan testere sinyalinin genliğini de ifade etmektedir. Sinüs sinyallerini simulink PWM bloğuna uygun hale getirmek için yatay eksen 1875 değerine ötelenmiştir. Anahtarların kısa devre olmaması için gerekli olan ölü zaman 5 µs olarak belirlenmiş ve PWM bloğuna uygun değerleri girilmiştir. Şekil 5.5a modülasyon indeksi ve SPWM için eksenin ötelenme işlemini, Şekil 5.5b ise inverter devresinin anahtarlama sinyallerinin üretildiği PWM bloklarını göstermektedir.

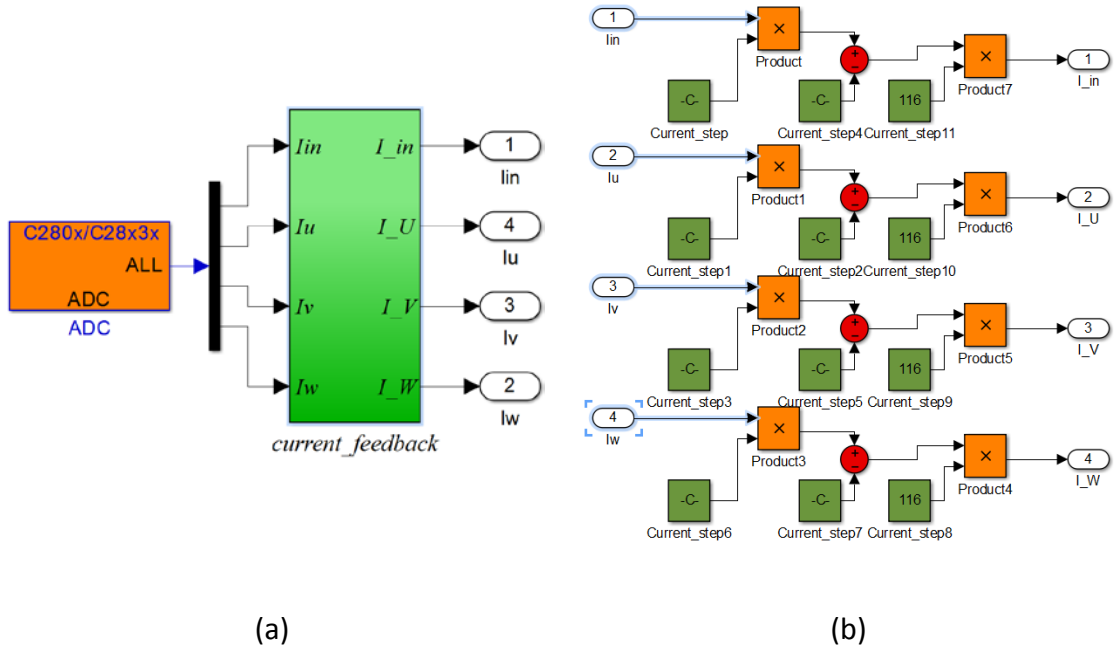


Şekil 5. 5 (a) Modülasyon indeksi ve eksen ötelenmesi

(b) İnverter devresi için SPWM üreten bloklar

İnverter devresinde akım geri beslemesi alınarak çıkış akımında ani artış olduğunda anahtarlama sinyalleri kapatılacaktır. Öne sürülen inverter modelinden alınan akım geri

beslemeleri DSP içine analog dijital çevirici (ADC) özelliğine sahip girişlerle alınmaktadır. Simulink ortamında bu işlem ADC bloğu kullanılarak yapılmaktadır. Geliştirilen modelde inverterin üç faz çıkış akımı ve giriş akımı ADC bloğunda hangi kanallardan aldığı gösterilmiş ve ADC çözünürlüğü 20 kS/s olarak girilmiştir.



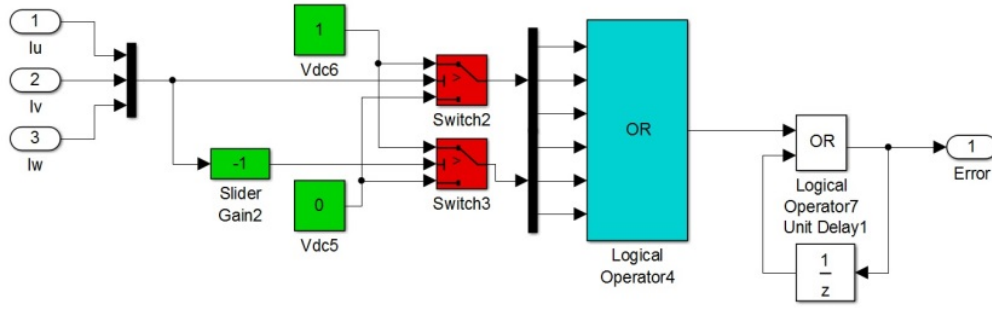
Şekil 5. 6 (a) Simulink ADC bloğu

(b) ADC gerçek değerlere dönüştürme işlemi

Akım geri beslemeleri Hall-Effect sensörler kullanılarak DSP'nin ADC kanalları için belirlendiği 0-3V aralığında kontrol kartına alınmıştır. Şekil 5.6a, Simulink ortamında akım sinyallerinin alınışını; Şekil 5.6b ise ADC için gerçek değerlerin hesaplanmasını göstermektedir.

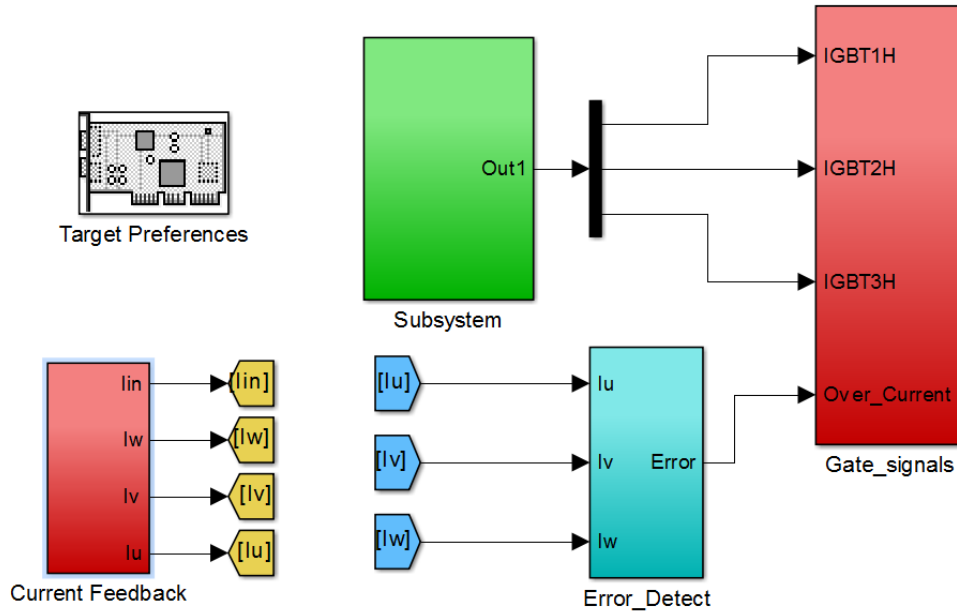
Akım geri beslemesi alınarak kontrolde ve donanımda meydana gelebilecek aksaklıklardan kaynaklanan akım yükselmelerinin önüne geçebilmek için programda korumaya yönelik bir çalışma da yapılmıştır. Çıkış akımlarından herhangi birinde oluşan ani artış 80 A seviyesini aştığında IGBT kapı sinyalleri kesilmiştir. Yapılan çalışma Şekil 5.7'de verilmiştir.





Şekil 5. 7 Programsal aşırı akım koruması

Tez çalışmasının kontrol algoritması bölümünde MATLAB/Simulink paket yazılımı kullanılarak elektrikli araçların sürücü devresi için açık çevrim  $\frac{V}{f}$  algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma simulink ortamında derlenerek CCS programı ile DSP kartının RAM hafızası kullanılarak yüklenmiş ve gerçek zamanlı olarak çalıştırılmıştır. Geliştirilen algoritmanın genel görünüşü Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5. 8 Kontrol algoritması genel görünüm

Geliştirilen açık çevrim  $\frac{V}{f}$  algoritması, Bölüm 6’da anlatılacak olan DSP ara yüz kartında bulunan kontrol kartına yüklenmiştir ve elektrik motoru sabit frekans ve devir şartlarında kontrol edilmiştir.

### DENEYSEL ÇALIŞMA

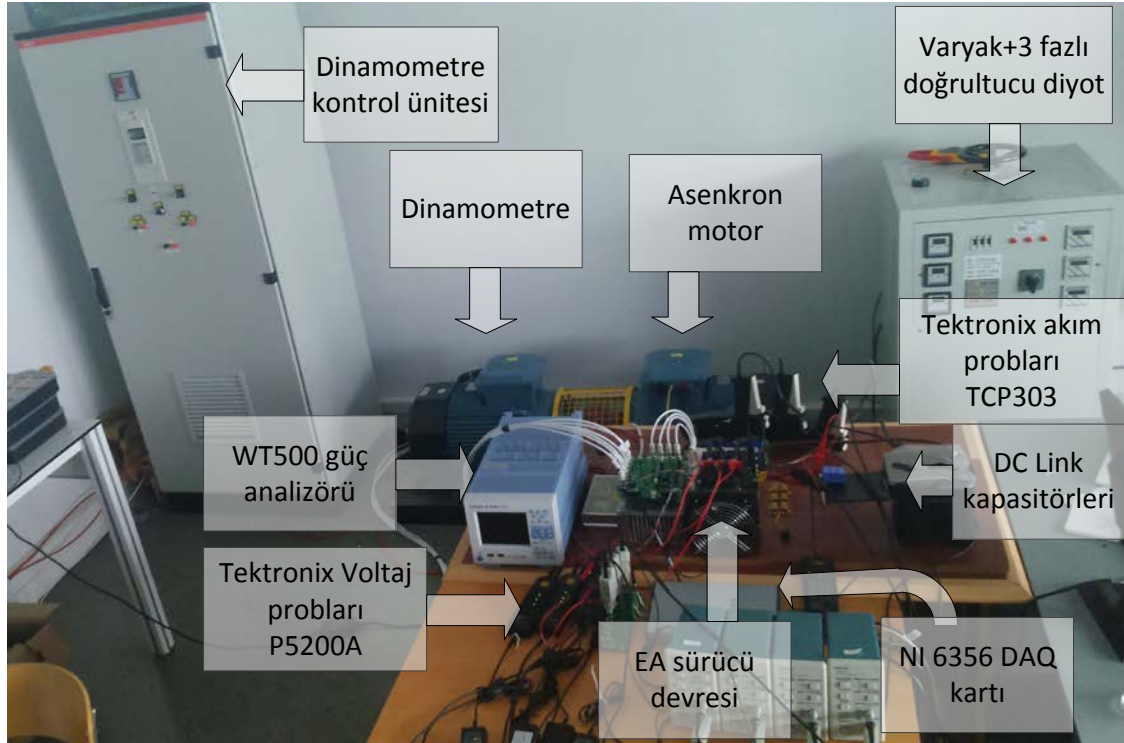
Elektrikli araçların sürücü devresinin verim analizinin yapılması için kurulan deney düzeneği bu bölümde ele alınmıştır.

Deneysel çalışmada kurulumun kolay olması için Powerex firmasının 7'li paket 50A'lık PM50RL1A120 IGBT modülü kullanılarak 8 kVA gücünde üç fazlı bir inverter devresi kurulmuştur. Kurulan inverter devresi için gerekli olan kontrol kartı ve akım-gerilim geri besleme devrelerinin tasarımları yapılmıştır. Kontrol kartı ve IPM modülü arasındaki izolasyonun sağlanması için gerekli olan BP7B kartı satın alınarak 2500V'luk izolasyonla kontrol kartı ve bilgisayar için koruma sağlanmıştır. Üç fazlı inverterin anahtarlama sinyalleri DSP tarafından üretilmiştir. Yazılımsal koruma için akım sensörlerinden gelen değerler anlık olarak kontrol edilerek herhangi bir anda ani akım artışında (80A'e kadar) anahtarlama sinyalleri sonlandırılmıştır. Kurulan inverter devresi için hazırlanan algoritma ilk anlarda düşük gerilim ve boşa çalıştırılarak test edilmiştir. Sonrasında DC bara gerilimi 400V değerine ayarlanarak çıkışlar elektrik motoruna bağlanmıştır.

Hazırlanan açık çevrim hız kontrol algoritması motorun nominal hızda (3000 d/d) dönmesini sağlamıştır. Elektrik motoru kurulan dinamometre sistemiyle 1N adımlarla yüklenerek 0-8 kW arasında yüklenmiştir. Verim ölçüm işlemi için Tektronix marka akım ve gerilim problarından alınan sinyaller DAQ kartına girilmiştir. DAQ kartı USB arayüzü ile bilgisayara bağlanarak veriler bilgisayar ortamına alınmıştır. DAQ kartı LabVIEW™ yazılımı ile kolaylıkla kullanılabilir. LabVIEW™ ile akım ve gerilim sinyalleri anlık olarak takip edilmiş ve kaydedilmiştir. Önerilen verim ölçüm sisteminin

performansını değerlendirmek için verim analizi Yokogawa WT500 güç analizörü kullanılarak da yapılmıştır.

Deneysel çalışmada kurulan sistemin fotoğrafı Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6. 1 Deneysel çalışma için kurulan sistem

Deney düzeneğindeki bileşenler için detaylı açıklamalar aşağıda verilmiştir.

### 6.1 Dinamometre Sistemini

Tez çalışmasında motor sürücü inverter devresinin testlerinin yapılabilmesi için bir dinamometre sistemi kurulmuştur. Dinamometre sistemi sayesinde farklı yüklenme koşulları inverter devresine uygulanabilmektedir. Böylece inverter devresinden çekilecek akım değerleri kontrollü bir şekilde değiştirilebilecek ve inverterin yüklenmesi kolaylıkla yapılabilecektir.

Dinamometre sisteminde her biri 30kVA gücünde 2 adet sincap kafesli asenkron motor birbirine akuple edilmiştir. Şekil 6.2’de görülen motorlardan sağ tarafta olan inverter tarafından sürülmektedir. Diğer motor ise yüklenme koşullarını oluşturmaktadır.



Şekil 6. 2 Akuple motor jeneratör sistemi

Yüklenme esnasında oluşacak enerji, rejeneratif sürücü üzerinden şebekeye aktarılmaktadır. Şekil 6.3.'te görülen rejeneratif sürücü üzerinden moment ve hız verileri girilebilirken moment, hız ve konum bilgileri veri olarak alınabilmektedir.

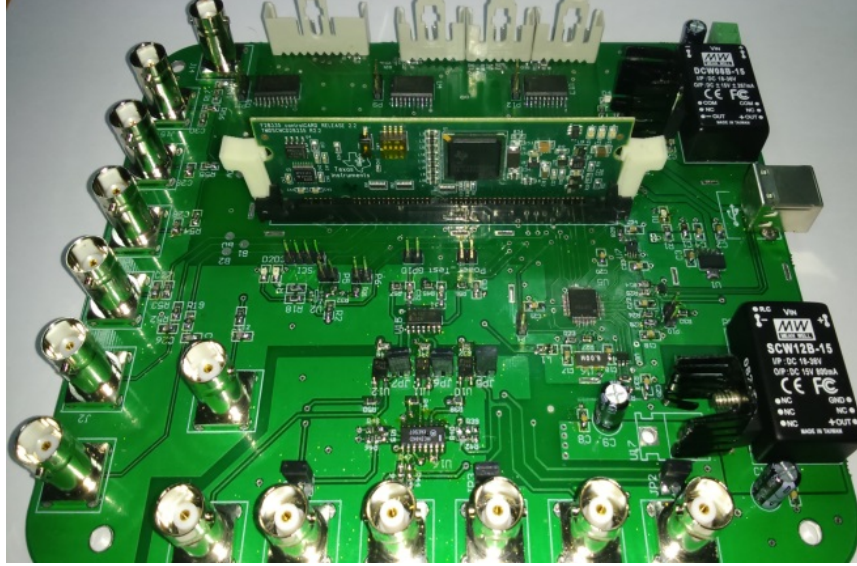


Şekil 6. 3 Rejeneratif sürücü sistemi

## 6.2 DSP Ara yüz Kartı

Motor sürücü devresinin kontrolü için tasarlanan DSP ara yüz kartı Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Anahtarlama elemanlarının sürücü entegreleri 5V gerilim ile

çalışmaktadır. Kullanılan DSP 3.3V genliğinde sinyal üretmektedir. Bu problem Octal Bus Transceiver entegresi kullanılarak 3.3V düzeyindeki sinyallerin 5V düzeyine çıkarılması ile çözülmüştür.



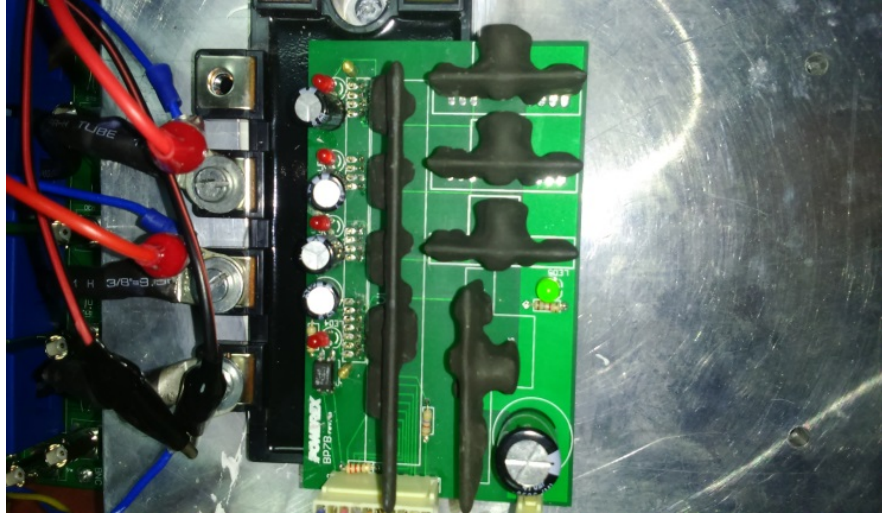
Şekil 6. 4 DSP ara yüz kartı

Deneysel çalışma sırasında tasarlanan DSP ara yüz kartına alınan akım/gerilim geri besleme sinyallerinin ortam gürültüsünden etkilenmemesi için akım geri beslemeleri RG58 kablolar ile taşınarak DSP arayüz kartına BNC konektörler ile alınmıştır.

### 6.3 BP7B IPM Ara yüz Kartı

BP7B IPM ara yüz kartı Powerex firması tarafından 6 ve 7 anahtarlı IGBT modüllerinin sürülebilmesi için tasarlanmış ve projede kullanılan IPM modülleri için önerilen bir karttır. BP7B kartı 24V ile beslenmekte ve 0-15V kapı sürme çıkış sinyalleri üretmektedir. BP7B kartı üst tarafta bulunan IGBT anahtarlarının sürülmesi için 3 adet izoleli DC-DC çevirici, alt tarafta bulunan anahtarlar için ise bir adet izoleli DC-DC çevirici bulundurmaktadır. Ayrıca sinyallerin yalıtımı için bir adet optik izolatör kullanılmıştır. Ayrıca, IPM modülünden gelen hata sinyalini DSP ara yüz kartına göndermektedir. BP7B kartı Şekil 6.5'te görülmektedir.

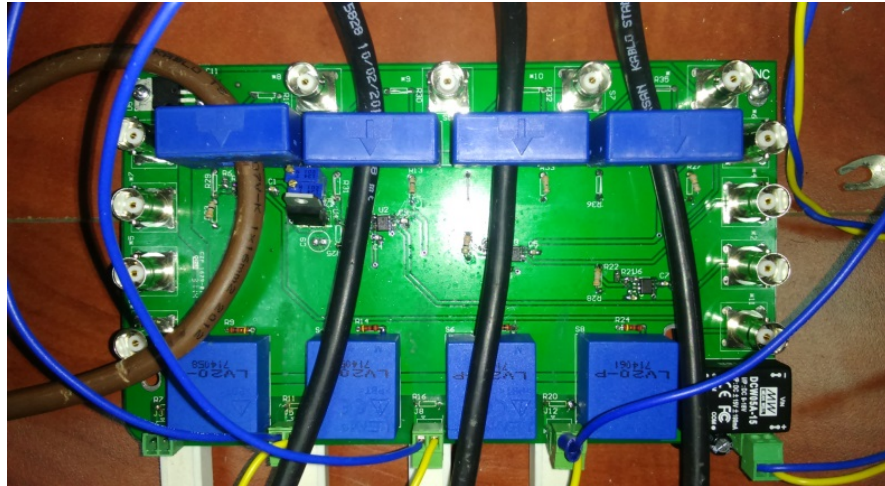




Şekil 6. 5 BP7B ara yüz kartı

#### 6.4 Akım/Gerilim Sensör Devresi

Tez çalışmasında motor sürücü devrenin çıkışında oluşabilecek kısa devrelere ve ani akım artışlarına yönelik koruma amacıyla inverterin çıkış akımları DSP ara yüz kartına alınmıştır. Kullanılan LEM marka akım ve gerilim sensörleri simetrik besleme ( $\pm 15V$ ) ile çalıştığından  $\pm 15V$  çıkışlı DC-DC çevirici kullanılmıştır. Çıkış akımları DSP kartı için 0-3V aralığında çalışacak şekilde toplayıcı bir opamp devresi kullanılarak BNC konnektörle çıktı olarak verilmiştir. Tasarlanan sensör devresi Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. 6 Akım/Gerilim Sensör Devresi

### 6.5 DAQ Kartı Tabanlı Verim Ölçüm Sistemi

Kurulan inverter devresinin verim hesabını yapabilmek amacıyla National Instruments firmasının NI USB 6356 kodlu DAQ kartı temin edilmiştir. Verim ölçümünde kullanılacak akım/gerilim sinyalleri RG58 koaksiyel kablolarla taşınmış ve kullanılan veri toplama kartına girişler BNC konnektörler vasıtasıyla yapılmıştır. DAQ kartına giriş minimum mesafeden yapılarak ortam gürültüsünden etkilenme oranının azaltılması amaçlanmıştır. Şekil 6.7’de kullanılan verim ölçüm sistemi gösterilmiştir.



Şekil 6. 7 Veri toplama geçiş kartı

### 6.6 NI USB-6356 DAQ Kartı

DAQ dış ortamda bulunan verileri toplayıp bilgisayarda işlenebilecek hale çeviren sistemlerdir. Veri toplama işlemi DAQ kartının içindeki ADC (Analog Digital Converter – Analog Dijital çevirici) aracılığıyla gerçekleştirilir. Test ve ölçme işlemlerini kolaylaştıran DAQ kartları veri toplama için en uygun sistemlerdir.

NI USB-6356 DAQ kartının genel özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.



Çizelge 1 NI USB-6356 DAQ kartı özellikleri

Ölçüm Nitelikleri	Voltaj, frekans, dijital değer, quadrature encoder
Bağlantı tipi	USB
Kasa tipi	Metal kasa
Besleme	Harici besleme

#### ANALOG GİRİŞLER

Analog giriş sayısı	8 Adet
Analog giriş örnekleme hızı	1.25 MS/s
Diferansiyel kanal sayısı	8 adet
Analog giriş çözünürlüğü	16 bit
Simultane ölçüm	Var
Zamanlama doğruluğu	Örnekleme oranı için 50 ppm(parts per million)
Zamanlama Çözünürlüğü	10 ns
Giriş bağlantısı	DC
Port gerilim aralıkları	$\pm 10\text{ V}$ , $\pm 5\text{ V}$ , $\pm 2\text{ V}$ , $\pm 1\text{ V}$
Maksimum giriş gerilimi	$\pm 11\text{ V}$
Giriş FIFO Boyutu	32MS (Bütün analog girişler için paylaşılmış )

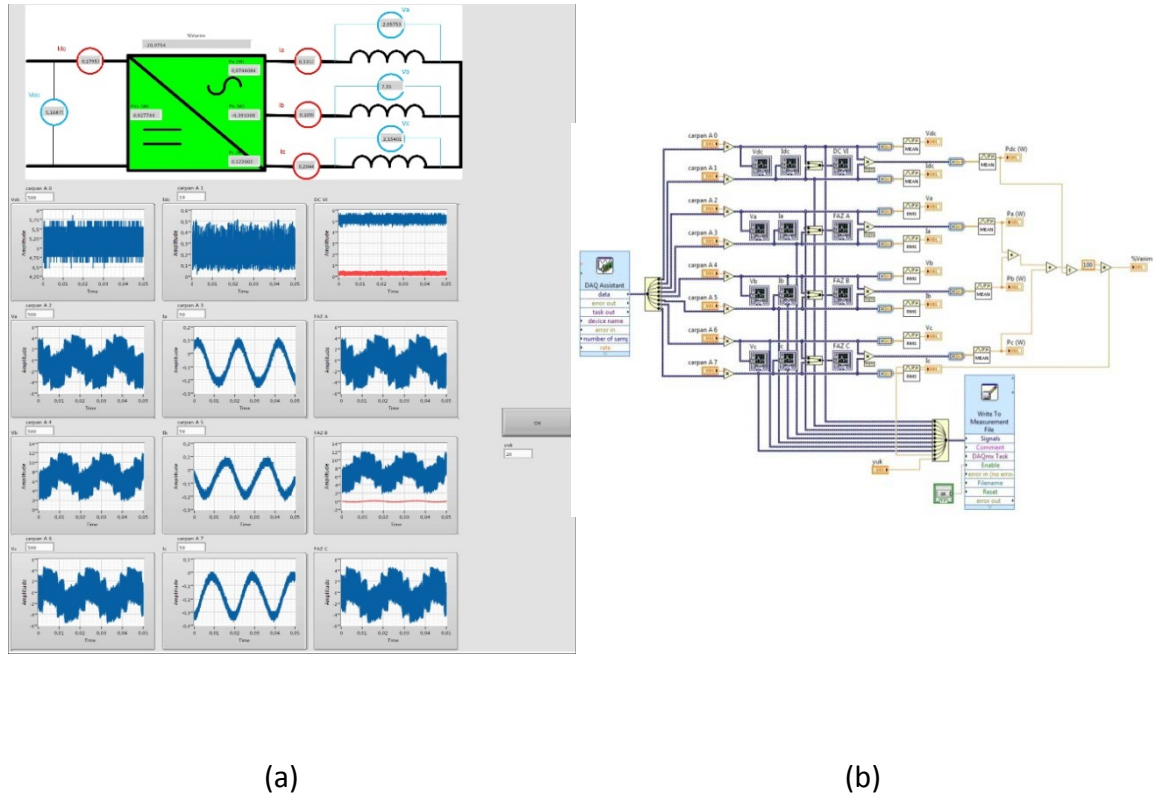
#### ANALOG ÇIKIŞLAR

Analog çıkış kanal sayısı	2 adet
Analog çıkış çözünürlüğü	16 bit
Maksimum yenileme oranı	3.3 MS/s (Anlık)
Zamanlama hata oranı	Örnekleme oranı için 50 ppm(parts per million)
Zamanlama Çözünürlüğü	10 ns
Çıkış aralığı	$\pm 10\text{ V}$ , $\pm 5\text{ V}$ harici referansa göre

Çizelge 1’de verilen DAQ kartının özelliklerinden en önemli olanı 8 analog girişin eş zamanlı olarak veri alabilmesi ve bu kanalların saniyede 1,250,000’e kadar örnek alarak akım ve gerilim sinyallerinin detaylı bir şekilde incelenebilmesine olanak sağlamasıdır. Böylece inverter devresinin giriş ve çıkış akım/gerilimleri hassas bir şekilde ölçülebilmekte ve verim hesabının doğruluğu artmaktadır.

DAQ kartı ile aynı anda devre üzerinden sekiz farklı noktadan giriş ve çıkış akım/gerilim değerleri 1MS/s örnekleme hızı ile alınarak inverter veriminin hassas şekilde hesaplanması amaçlanmıştır. Verim hesabı için DC tarafta gerilim ve akım, çıkışta üç fazın faz-nötr gerilimleri ve hat akımları eş zamanlı ölçülmüştür. Kurulan sistemin çalışmasını izlemek amacı ile LabVIEW™ ortamında bir ara yüz tasarlanmıştır (Şekil

6.8a). Bu ara yüz ile inverter devresinin giriş akım-gerilim değerleri ve çıkış akım-gerilim değerleri anlık olarak takip edilebilmektedir [27].



Şekil 6. 8 (a) Labview Kullanıcı Ara Yüzü

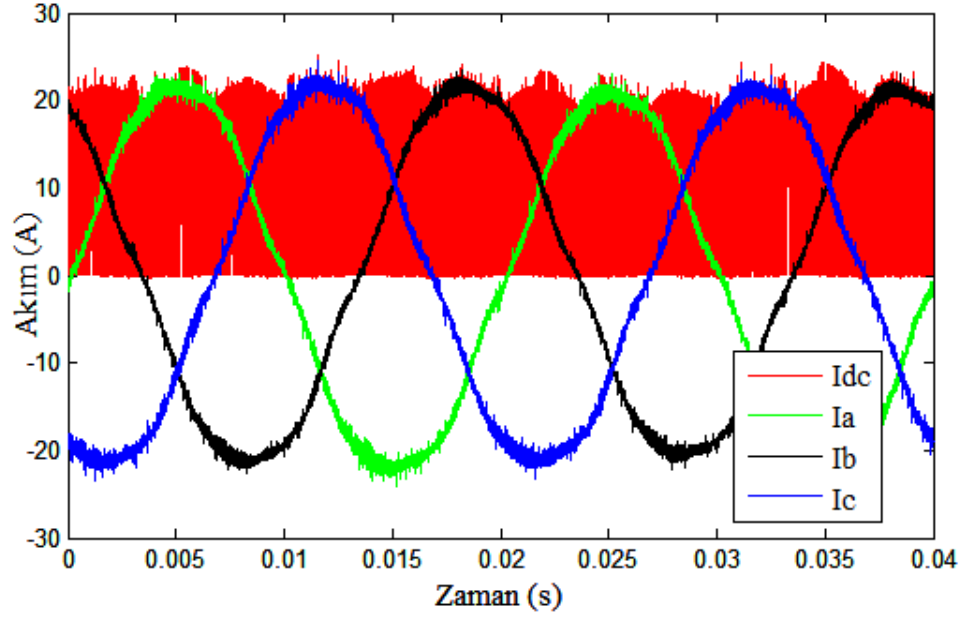
(b) Labview Blok Diyagramı [27]

Sistem belli bir yüklenme durumu için kararlı çalışma noktasına ulaştığında LabVIEW™ ara yüzüne eklenen bir butonla 1 saniyelik giriş ve çıkış akım/gerilim verileri kaydedilmektedir. Giriş gücünü hesaplamak için DC baradan çekilen akım ve DC bara gerilimi çarpılarak elde edilen gücün ortalaması alınmıştır. Çıkış gücünü hesaplamak için her bir faza ait akım ve gerilim değerleri çarpılarak elde edilen anlık güç değerinin ortalaması alınmıştır. Her fazın çıkış gücü toplanarak toplam çıkış gücü bulunmuştur. Her bir yüklenme durumu için hesaplanan giriş ve çıkış güçleri kullanılarak verim değerleri elde edilmiştir.

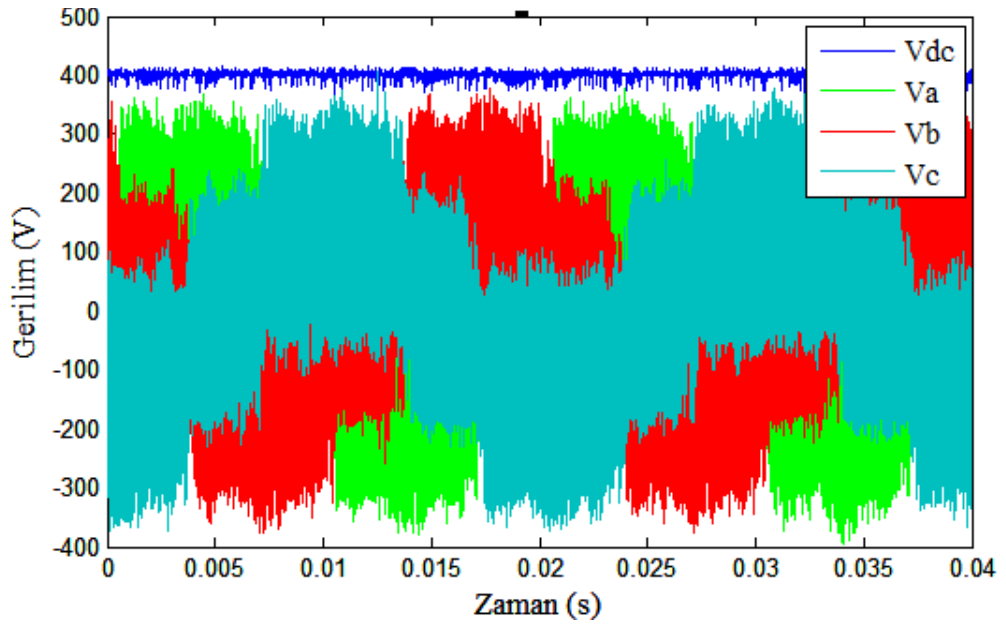
Inverter devresinin verim hesabı yapılırken kullanılan 50A'lık IGBT modülü güç aralığı için üst limit 8kW olarak belirlenmiştir ve 0-8 kW aralığı yüklenme durumu için güç-verim eğrileri elde edilmiştir. DAQ kartı ile 8 farklı kanaldan, kanal başına 1MHz örnekleme hızı ile giriş/çıkış akım-gerilim değerleri eş zamanlı olarak alınmıştır. Yüksek

örnekleme hızı sayesinde inverter devresinin giriş ve çıkış akım/gerilimleri hassas bir şekilde ölçülebilmektedir. Bu da inverter devresinin giriş ve çıkış güçlerinin hesaplanmasında doğruluğu önemli derecede arttırmaktadır.

Örnek olarak Şekil 6.9'da 5kW'lık yüklenme durumu için elde edilen giriş akımı ve üç faz çıkış akımı, Şekil 6.10'da ise DC bara gerilimi ve çıkış gerilimleri (faz-nötr) verilmiştir.

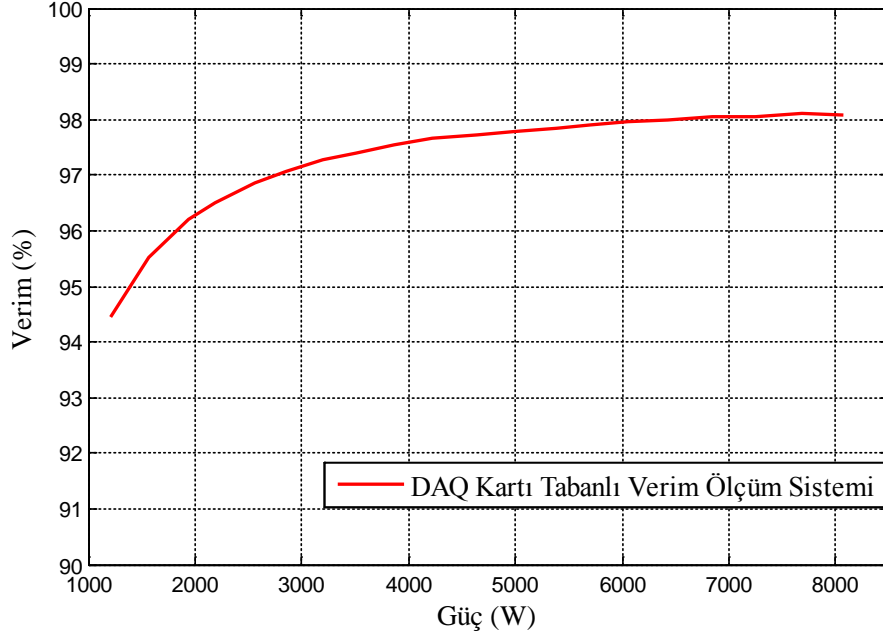


Şekil 6. 9 5kW'lık yüklenme durumu için DAQ kartı ile elde edilen  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  ve  $V_{dc}$  dalga şekilleri



Şekil 6. 10 DC bara, üç faz çıkış gerilimi

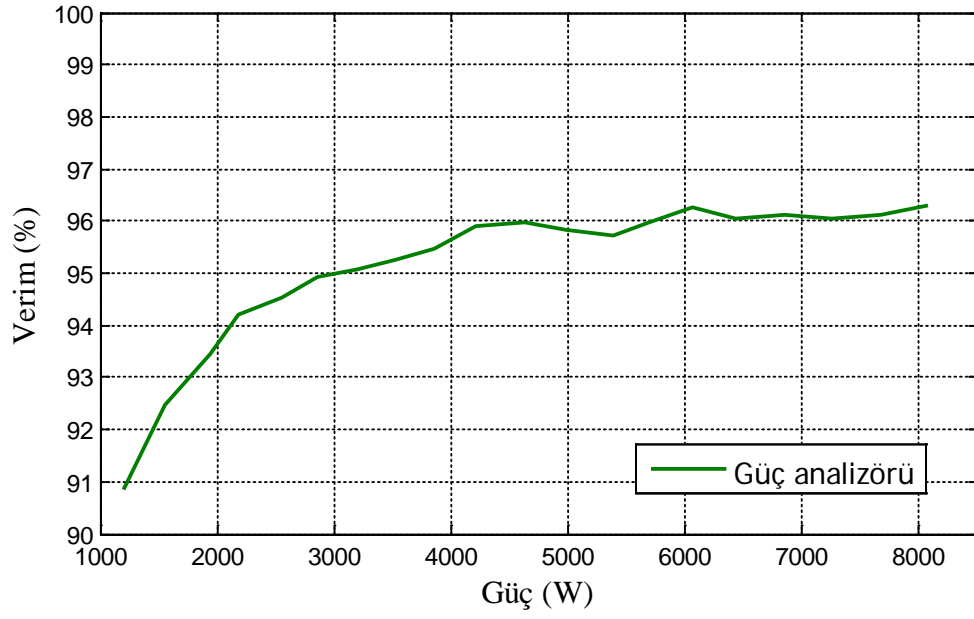
Şekil 6.11 DAQ kartı tabanlı verim ölçüm sistemiyle inverter devreinin yüklenmesiyle elde edilen verim eğrisi verilmiştir.



Şekil 6. 11 DAQ kartı tabanlı verim ölçüm sistemiyle elde edilen verim eğrisi

## 6.7 Güç Analizörü ile Verim Ölçümü

DAQ kartı tabanlı verim ölçümü sisteminin performansını karşılaştırmak için Yokogawa WT500 güç analizörü kullanılarak da yüklenme durumları için verim ölçümleri tamamlanmıştır. Yokogawa WT500 güç analizörü 6 adet analog girişe ve her bir kanalda 100 kS/s örnekleme hızına sahiptir. İnverter devresinin anahtarlama frekansı 10 kHz olduğuna göre anahtarlama frekansından 10 kat yüksek değerde örnek alınmıştır. Elde edilen verim grafiği Şekil 6.12’de verilmiştir.

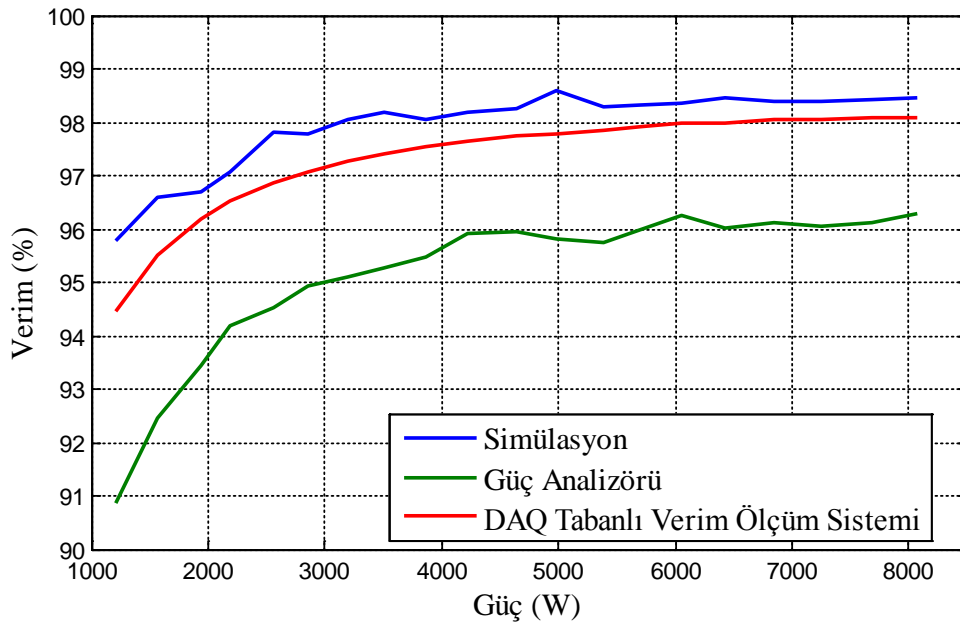


Şekil 6. 12 Yokogawa WT500 güç analizörü ile güç-verim grafiği

Hem DAQ kartı tabanlı verim ölçüm sistemi hem de Yokogawa WT500 güç analizörü ile yapılan ölçümlerde diğer sistem bileşenleri aynı kalmıştır [28].

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elektrikli araçların sürücü devresinin verimi ölçmeye yönelik deneysel test sistemi kurulmuştur. Motor kontrolünde açık çevrim  $\frac{V}{f}$  için Matlab/Simulink'te geliştirilen DSP programı CCS ara yüz programıyla DSP'de yüklenmiş ve çalıştırılmıştır. İnverter devresi, rejeneratif sürücü tarafından kontrol edilen generatörle 0-8 kW güç aralığında yüklenmiştir. İnverter devresinin verimi ilk olarak benzetim ortamında, devamında ise önerilen verim ölçüm sistemiyle ve Yokogawa WT500 güç analizörü ile ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 7.1'de verilmiştir. Kurulan DAQ kartı tabanlı verim ölçüm sistemi ile elde edilen verim değerleri, benzetim sonucu baz alındığında, %1.5 civarında farklılık gösterirken, Yokogawa WT500 güç analizörü ile elde edilen sonuçlar baz alındığında %5.5 seviyelerindedir.



Şekil 7. 1 Güç-verim eğrileri

DAQ kartı tabanlı verim ölçüm sistemi saniyede 1,250,000 örnek alabilirken, Yokogawa WT500 100,000 örnek almaktadır. Verim ölçümünün hassasiyeti açısından bu fark önemlidir. Diğer taraftan DAQ kartı tabanlı verim ölçüm sistemi 8 analog kanala sahiptir ve kanallar eş zamanlı olarak veri alabilmektedir. Alınan veriler LabVIEW™ programıyla anlık olarak takip edilmesinin yanı sıra bilgisayara kaydedilmiştir. Güç analizöründe ise verilerin takibi yapılabilmekte fakat veri kaydetme özellikleri veri kaydetme süreleri kısadır.

Maliyet açısından güç analizörleri ele alındığında örnekleme oranı ve analog giriş sayısı arttıkça fiyat orantılı olarak artmaktadır. Bu parametreler baz alınarak tezde sunulan DAQ kartı tabanlı verim ölçüm sistemiyle yaygın kullanılan güç analizörlerinin maliyetleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2 DAQ kartı tabanlı verim ölçüm sistemi ile yaygın olarak kullanılan güç analizörlerinin maliyet tablosu

Ölçüm Ünitesi	Analog kanal sayısı & Örnekleme oranı		
	Ölçüm alınan kana sayısı	Örnekleme oranı	Maliyet
WT500 Güç Analizörü	6	100kS/s	7596,7\$
WT3000 Güç Analizörü	8	200kS/s	14175,5\$
WT1801 Güç Analizörü	12	2MS/s	16153.7\$
NI USB 6356 DAQ Kartı & LabVIEW™ Yazılımı	8	1.25 MS/s	5195.4\$

Çizelge 2’de görüldüğü gibi önerilen DAQ kartı tabanlı verim ölçüm sistemi maliyet açısından da avantajlıdır. Bu bilgiler ışığında DAQ kartı tabanlı verim ölçüm sisteminin öne çıkan özelliklerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Eş zamanlı olarak 8 analog kanaldan yüksek örneklemeyle veri alımı,
- Anlık veri takibi,
- Anlık veri kaydedilmesi,
- Düşük maliyet.

Tez çalışmasında sunulan verim ölçüm sisteminde LabVIEW™ ortamında eklenecek çalışmalarla harmonik analizi, aktif, reaktif, görünen güçler vb. büyüklükler ölçülebilir. Böylece düşük maliyet ile pahalı güç analizörlerinin ölçüm kalitesinde ölçüm yapılabilecektir.



## KAYNAKLAR

---

- [1] Han D.C., (2002). "Electric Vehicle Symposium 19 proceedings", EVAAP, Busan, Korea.
- [2] Uğur, E. (2011). Prototip Bir Elektrikli Araç Üzerinde Enerji Yönetim Sisteminin Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] Tırıs, M., (2003). Elektrikli Araçlar, TÜBİTAK-MAM Yayını, Kocaeli.
- [4] School of Public and Environmental Affairs at Indiana University, (2011). Plugin Electric Vehicles: A Practical Plan for Progress, Indiana.
- [5] Chan, C. C., & Chau, K. T. (2001). Modern electric vehicle technology, 47, Oxford University Press.
- [6] Eshani, M., Gao, Y., Gay, S. E., & Emadi, A. (2005). Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Fundamentals, Theory, and Design. Boca Raton, FL: CRC.
- [7] Westbrook M.H., (2001). "The electric and Hibrid Electric Car.", London, SAE.
- [8] Friedman D., (1997). "A New Road: The Technology and Potential of Hybrid Vehicles", Union of Concerned Scientists, Cambridge.
- [9] Xiao, C., Chen, G., & Odendaal, W. G. (2007). "Overview of power loss measurement techniques in power electronics systems." Industry Applications, IEEE Transactions on, 43(3): 657-664.
- [10] Aarniovuori, L., Kosonen, A., Sillanpää, P., & Niemelä, M. (2013). High-power solar inverter efficiency measurements by calorimetric and electric methods. Power Electronics, IEEE Transactions on, 28(6): 2798-2805.
- [11] Mattsson, V. (2011). "Comparison of calorimetric and electrical loss measurement methods in a frequency converter research and development application." In Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE.
- [12] Li, X., & Williamson, S. S. (2008). "Efficiency analysis of hybrid electric vehicle (HEV) traction motor-inverter drive for varied driving load demands." In Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008. APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE.

- [13] Mukherjee, S., Hoft, R. G., & McCormick, J. (1990). "Digital measurements of the efficiency of inverter-induction machines." *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 26(5): 872-879.
- [14] Pengwei, H. W. S. (2011). "Efficiency Evaluation of a 55kW Soft-Switching Module Based Inverter for High Temperature Hybrid Electric Vehicle Drives Application." *Transactions of China Electrotechnical Society*, 1.
- [15] Xiao, C., Chen, G., & Odendaal, W. G. (2007). "Overview of power loss measurement techniques in power electronics systems." *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 43(3): 657-664.
- [16] Weier, S., Shafi, M., & McMahon, R. (2010). Precision calorimetry for the accurate measurement of losses in power electronic devices. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 46(1): 278-284.
- [17] Ritchie, Andrew Ewen, (2004). "Calorimetric measuring systems: Characterizing High-Frequency Power Losses in Power Electronic Components and Systems." *IEEE Industry Applications Magazine*, 10(4): 70-78.
- [18] Horinek, M., & Bilik, P. (2010). "Power analyzer for converter testing based on cRIO hardware platform." In *Applied Electronics (AE)*.
- [19] Pradhan, D., Lakshminarayanan, L., & Patil, V. (2014). "A LabVIEW based power analyzer." In *Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT)*.
- [20] Chompoo-Inwai, C., & Mungkornassawakul, J. (2013). "A Smart Recording Power Analyzer Prototype Using LabVIEW and Low-Cost Data Acquisition (DAQ) in Being a Smart Renewable Monitoring System." In *Green Technologies Conference, IEEE*: 49-56.
- [21] Skvarenina T.L., (2002). *Power Electronic Handbook*, CRC Press LLC, Purdue University, West Lafayette.
- [22] Bose B. K., (2002). *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prantice Hall PTR, The University of Tennessee, Knoxville.
- [23] Akdemir, B. (2003). 3 Fazlı Asenkron Motorların MC3PHAC Mikrodenetleticisi Kullanılarak Hız Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- [24] PSIM, User's Guide, 2009, [www.powersim.com](http://www.powersim.com), 1 Ocak 2015.
- [25] Texas Instrument Teaching CD-ROM, <http://www.ti.com/lit/zip/ssqc016> (C2000 Teaching CD-ROM), 1 Mayıs 2015.
- [26] Matlab/Simulink User's Guide, 2008R, [www.mathwork.com](http://www.mathwork.com), 1 Nisan 2013.
- [27] National Instruments, LabVIEW™ Completed User Manual for Everyone, NI-Corporate Headquarters, Austin, 1 Ağustos 2015.
- [28] WT500 power analyzer User's manual, Yokogawa Meters & Instruments Corporation, IM 760201-01E, 1 Eylül 2014.

## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** :Fatih ACAR  
**Doğum Tarihi ve Yeri** :Kadınhanı, 17.05.1988  
**Yabancı Dili** :İngilizce  
**E-posta** :fatihacargyte@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Elektrik Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2015
Lisans	Elektronik Müh.	Gebze Teknik Üniversitesi	2011
Lise	Fen	Ata İçil Lisesi	2006

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011-2013	Komsis Elektronik	ArGe Mühendisi

## **YAYINLAR**

### **Bildiri**

1. Ozdemir, S., Elma, O., Acar, F., & Selamogullari, U. S. (2014, October).,’’ Analyzing the Capacity Utilization Rate of Traction Motor Drives in Electric Vehicles with Real World Driving Cycles’’ In Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2014 IEEE.
2. Acar, F.; Ozdemir, S.; Selamogullari, U.S., " Comparison of Efficiency Measurement Techniques for Electric Vehicle Traction Inverters" Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), 2015 IEEE.
3. Ozdemir, S.; Acar, F.; Selamogullari, U.S., "Comparison of Silicon Carbide MOSFET and IGBT Based Electric Vehicle Traction Inverters" Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), 2015 IEEE.