

151330

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇ GÜÇ SİSTEMİNİN
SİMÜLASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Okan TÜR
(504011033)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Aralık 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Ocak 2004

Tez Danışmanı Prof.Dr. R. Nejat TUNCAY 20.1.2004
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Ali Güvenç GÖKTAN

Y.Doç.Dr. Özgür ÜSTÜN 20.1.2004

151330

OCAK 2004

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen, başta değerli hocam, Sayın Prof.Dr. R. Nejat TUNÇAY'a, Sayın Prof.Dr. Adnan KAYPMAN'a, TÜBİTAK-MAM'daki iş arkadaşlarıma, sevgi ve desteklerini her zaman yanımda hissettiğim eşime ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

ARALIK 2003

MÜH. OKAN TÜR



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRİKLİ ARAÇ KONFIGÜRASYONLARI	3
3. ELEKTRİKLİ ARAÇ ALT SİSTEMLERİ	7
3.1 Güç Elektroniği Sistemleri	7
3.2 Tahrik Sistemleri	10
3.3 Güç Üretim Sistemleri	15
3.4 Enerji Depolama Sistemleri	16
3.4.1 Akü	17
3.4.1.1 Hibrid Elektrikli Araçlarda Akü Seçim Kriterleri	18
3.4.1.2 Akü Yönetim Sistemleri	19
3.4.2 Volan (Flywheel)	21
3.4.3 Süperkapasitör	22
3.5 Güç Yönetim Sistemleri	22
3.6 Sürüş Sistemleri	23
3.7 Veri Haberleşmesi	24
4. SİSTEM TASARIMI	26
5. MODELLEME	30
5.1 Araç Dinamiğinin Modellenmesi	30
5.2 Motor/Kontrolör Modeli	33
5.3 Akü Grubu Modeli	36
5.4 Güç Üretim Sistemi Modeli	38
5.5 Güç Yönetim Sistemi	40
6. SİMÜLASYON	44
6.1 Şehir İçi Sürüş Çevrim Simülasyonu Sonuçlarının Tartışılması	45
6.2 Otoyol Sürüş Çevrim Simülasyonu Sonuçlarının Tartışılması	46
6.3 Geliştirilen Modelin Deneysel Sonuçlar ile Karşılaştırması	46
SONUÇ	48

KAYNAKLAR	50
EK A UDDS ŞEHİRİÇİ SÜRÜŞ ÇEVİRİMİ SONUÇLARI	52
EK B US06 OTOYOL SÜRÜŞ ÇEVİRİMİ SONUÇLARI	59
EKC SİMÜLASYON SABİTLERİ	66
ÖZGEÇMİŞ	67



KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
AFC	: Alkalın yakıt pili
AGM	: Absorptive glass mat
DARPA	: Defense Advanced Research Project Agency
DC	: Doğru Akım
DMFC	: Direkt metanol yakıt pili
EA	: Elektrikli araç
FOC	: Field oriented control
FTP	: Federal test procedure
GENSET	: Generatör seti
GÜS	: Güç üretim sistemi
HEA	: Hibrid elektrikli araç
IGBT	: Insulated-gate bipolar transistor
IGCT	: Insulated gate commuted thyristor
İYM	: İçten yanmalı motor
MCFC	: Ergimiş karbonatlı yakıt pili
PAFC	: Fosforik asit yakıt pili
PEMFC	: Proton exchange membrane fuel cell
PHEA	: Paralel hibrid elektrikli araç
PM	: Permanent magnet
PWM	: Pulse width modulation
SHEA	: Seri hibrid elektrikli araç
SOC	: State of charge
SOFC	: Katı oksit yakıt pili
SPFC	: Katı polimer yakıt pili
SRM	: Switched reluctance motor
UDDS	: Urban dynamometer driving schedule

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 Akü karşılaştırma tablosu	17
Tablo 3.2 Volan & Kurşun Asit Akü Karşılaştırması [10].....	22
Tablo 4.1 Sabitlerin açıklaması	27
Tablo 4.2 Araç sabitleri	29
Tablo 5.1 Araç yük modeli giriş ve çıkışları	31
Tablo 5.2 Motor ve kontrolör modeli giriş ve çıkışları.....	35
Tablo 5.3 Akü grubu modeli giriş ve çıkışları	36
Tablo 5.4 Güç üretim sistemi modeli giriş ve çıkışları.....	39
Tablo 5.5 Güç yönetim sistemi modeli giriş ve çıkışları	41

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 Elektrikli araç güç sistemi konfigürasyonu	3
Şekil 2.2 Seri hibrid elektrikli araç güç sistemi konfigürasyonu	5
Şekil 2.3 Paralel hibrid elektrikli araç güç sistemi konfigürasyonu	6
Şekil 3.1 Generatör DC bara bağlantısı	8
Şekil 3.2 Akü şarj sistemi	8
Şekil 3.3 Farklı Seviyedeki DC Gerilimlerin Paralel Bağlanması.....	9
Şekil 3.4 Vektör kontrollü asenkron motor modeli	13
Şekil 3.5 Optima sarı tip 55 Ah AGM akü Voc/SOC grafiği	20
Şekil 3.6 Akü modeli	20
Şekil 3.7 Şarj durumunun belirlenmesine yönelik algoritma	20
Şekil 3.8 Sürüş Sistemleri	24
Şekil 4.1 Seri hibrid elektrik araç güç sistemi	26
Şekil 4.2 Araca etkiyen yükler.....	27
Şekil 5.1 Araç yük modeli	31
Şekil 5.2 Araç yük modeli içeriği	31
Şekil 5.3 Maksimum hız güç ihtiyacı	32
Şekil 5.4 Maksimum hız yük momenti	32
Şekil 5.5 Eğimli yol güç gereksinimi.....	33
Şekil 5.6 Eğimli yol yük momenti	33
Şekil 5.7 Seçilen motorun eğrileri	34
Şekil 5.8 Motor ve kontrolör modeli	34
Şekil 5.9 Motor modelinin içeriği.....	35
Şekil 5.10 Akü grubu modeli.....	36
Şekil 5.11 Akü grubu modeli içeriği.....	37
Şekil 5.12 Akü şarj durumunu hesaplayan blok	37
Şekil 5.13 Akü grubu iç direncini hesaplayan blok	38
Şekil 5.14 Akü grubu açık devre gerilimini hesaplayan blok.....	38
Şekil 5.15 Güç üretim sistemi modeli.....	39
Şekil 5.16 GÜS modeli içeriği.....	40
Şekil 5.17 Örnek güç destek güç yönetim sistemi	40
Şekil 5.18 Örnek yumuşak hibrid güç yönetim sistemi	41
Şekil 5.19 Güç yönetim sistemi modeli	41
Şekil 5.20 Güç yönetim sistemi içeriği.....	42
Şekil 5.21 Hızlanma ve normal sürüş bloğu	42
Şekil 5.22 Yavaşlama bloğu	43
Şekil 6.1 Tüm modellerin entegrasyonu	44
Şekil 6.2 Ptototip Araç 0-60 km/h hızlanma simülasyonu	47
Şekil 6.3 50 km/h sabit hız sürüş simülasyonu.....	47
Şekil A. 1 UDDS güç destek motor sonuçları	53
Şekil A. 2 UDDS güç destek akü sonuçları	54

Şekil A. 3 UDDS güç destek besleme sistemi sonuçları	55
Şekil A. 4 UDDS yumuşak hibrid motor sonuçları	56
Şekil A. 5 UDDS yumuşak hibrid akü sonuçları	57
Şekil A. 6 UDDS yumuşak hibrid besleme sistemi sonuçları	58
Şekil B. 1 US06 güç destek motor sonuçları	60
Şekil B. 2 US06 güç destek akü sonuçları	61
Şekil B. 3 US06 güç destek besleme sistemi sonuçları	62
Şekil B. 4 US06 yumuşak hibrid motor sonuçları	63
Şekil B. 5 US06 yumuşak hibrid akü sonuçları	64
Şekil B. 6 US06 yumuşak hibrid besleme sistemi sonuçları	65



SEMBOL LİSTESİ

A_f	: Araç ön yüzey alanı
c_r	: Hava sürtünme katsayısı
c_t	: Tekerlek sürtünme
E_a	: Endüvi gerilimi
F_e	: Eğim kuvveti
F_r	: Araca ivmelenme süresince etkiyen kuvvet
F_r	: Hava sürtünme kuvveti
F_s	: Araca etkiyen sürekli kuvvetlerin toplamı
F_t	: Tekerlek sürtünme kuvveti
F_t	: Tekerlek sürtünmesi
F_{top}	: Araca etkiyen toplam kuvvet
GR	: Hız redüksiyon oranı
I_a	: Endüvi akımı
J	: Motor eylemsizliği
k_e	: EMF katsayısı
k_t	: Moment katsayısı
L_i	: Endüvi sargı endüktansı
P_{aux}	: Yardımcı yükler
P_c	: Soğutma sistemi gücü
P_{genset}	: Generatör seti gücü
P_{top}	: Tekerleğe aktarılması gereken toplam güç
R_i	: Endüvi sargı direnci
T_{top}	: Tekerleğe uygulanması gereken toplam moment
V_{oc}	: Açık devre gerilimi
ω_r	: rotor açısal hızı
δ	: Hava yoğunluğu
μ_{teff}	: Transmisyon verimi

HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇ GÜÇ SİSTEMİNİN SİMÜLASYONU

ÖZET

Fosil yakıtlarının tükenmekte oluşu ve çevresel duyarlılığın artması, ulaşım araçlarında kullanılmak üzere alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi zorunluluğunu doğurmuştur. Sivil uygulamalarda otomobillerinin elektriksel güç ihtiyacının giderek artması ve askeri uygulamalarda geleceğin zırh ve silahlarının elektriksel sistemler olacağının göz önüne alınması, bu gereksinimlere temel hazırlamak üzere elektrikli araç fikrinin geliştirilmesine etken olmuştur.

Enerji depolama sistemlerinin özgül enerjisinin fosil yakıtlarıyla karşılaştırılamayacak kadar düşük olması, elektrikli araçların sürüş menzilini kısıtlamaktadır. Diğer bir sorun ise enerji depolama sistemleri tekrar şarj sürelerinin uzun oluşudur. Bu sorunlar hibrid elektrikli araç kavramıyla aşılmaya çalışılmaktadır.

Hibrid elektrikli araçlar, güç sistemlerinde enerji depolama sistemleri dışında birden fazla farklı tür itici güç kaynağının, elektrik motoru, içten yanmalı motor ve gaz tribünü v.b., bulunduğu araçlardır. Her iki itici güç kaynağında aracı sürebileceği gibi, elektrik motorunun aracı ve içten yanmalı motorun bir generatörü sürdüğü uygulamalarda mevcuttur.

Günümüzde prototip ve tasarım çalışmaları, maliyetlerin düşürülmesi ve tasarımın optimizasyonu hedeflenerek, matematiksel modelleme ve simülasyon yazılımları ile desteklenmektedir. Hibrid elektrikli araçlarda güç sisteminin kurulması, farklı kaynaklar arasında yük paylaşımına yönelik güç yönetim stratejilerinin belirlenmesi ve tasarımın optimizasyonu gibi konuların matematiksel yazılımlar ile incelenmesi önem taşımaktadır.

Bu tez kapsamında öncelikle elektrik ve hibrid elektrikli araç kavramları tanımlanmış ve elektrikli araçlarda kullanılan alt sistemler incelenmiştir. Seri hibrid konfigürasyona sahip bir araca yönelik tasarım çalışmaları yürütülmüş, alt sistemlerin modelleri geliştirilmiş ve çeşitli sürüş çevrimlerinde simülasyonu yapılmıştır. Son olarak daha önce prototipi geliştirilmiş olan bir elektrikli araca yönelik performans simülasyonları yapılmış ve sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

HYBRID ELECTRIC VEHICLE POWER SYSTEM SIMULATION

SUMMARY

Depleting fossil fuels and increasing environmental concerns have brought a necessity for developing alternative energy sources for transportation. Improving electrical power demands of civil vehicles and future electric armor and weapons for military forces have ignited electric vehicle idea.

Compared with fossil fuels, low specific energy ratio of energy storage systems limits the range of electric vehicles. High recharging duration of energy storage systems is another problem. These drawbacks are tried to be overcome by hybrid electric vehicle concept.

Hybrid electric vehicles are the ones having at least two different propellers, such as electric motor, internal combustion engine or gas turbine, beyond energy storage systems in their power architectures. As both propellers can drive the vehicle, electric vehicle may drive the vehicle and the internal combustion engine may drive a generator.

To be able to decrease prototyping costs and optimize the design, today's research and development projects are supported by mathematical modeling and simulations software. Power system architecture design, determination of power flow management strategies and optimization of the design by mathematical software are very important.

In the scope of this thesis, first electric and hybrid electric vehicle concepts have been introduced and subsystems have been investigated. Design studies for a series hybrid electric vehicle have been conducted, subsystem models have been developed and under different driving cycles, the vehicle has been simulated. Finally performance simulations of a vehicle have been done and the outputs have been compared with experimental results.

1. GİRİŞ

Fosil yakıtlarının tükenmekte oluşu ve çevresel duyarlılığın artması, ulaşım araçlarında kullanılmak üzere alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi zorunluluğunu doğurmuştur. Günümüzde farklı ulaştırma yöntemleri üzerine çalışmalar hızla devam etmektedir. Bunlardan biri olan elektrikli araçlar, hem sivil hem de askeri uygulamalarda geleceğe yönelik en önemli kavram olarak karşımıza çıkmaktadır.

Elektrik motorlarının, yüksek kalkış moment, sıfırdan başlayarak hız kontrolünün yapılabilmesi ve yüksek verim gibi özellikleri, itici güç olarak araçlarda kullanılması fikrini doğurmuştur. Elektrik motorunun ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin beslenebilmesi için, enerji depolama sistemleri ve/veya güç üretim sistemlerinin de araç içerisine yerleştirilmesi gerekmiştir.

Sivil uygulamalarda elektrikli araçların tercih edilmelerinin nedenleri şu şekilde sayılabilir;

- Yakıt tasarrufu
- Çevreye yayılan emisyonların azaltılması
- Gürültüsüz çalışma
- Az bakım gereksinimi
- Çoğu uygulamada transmisyon gerektirmeme
- Kullanım kolaylığı

Askeri uygulamalarda ise yukarıdakilere ek olarak daha çok stratejik nedenler ortaya çıkmaktadır;

- Düşük termal iz
- Yüksek performans
- Sessiz izleme
- Geleceğin elektrikli zırh ve silahlarına zemin oluşturma

Günümüzde Toyota Prius ve Honda Inside gibi erken dönem elektrikli araçları ticari olarak piyasaya sunulmuştur ve diğer otomobil üreticileri de hazırlıklarını sürdürmektedir. Amerika ve Avrupa'nın çeşitli şehirlerinde, hibrid elektrikli otobüsler çeşitli araştırma programları dahilinde toplu taşıma amacıyla kullanıma başlanmıştır.

Bu güne dek başta Amerika ve Almanya olmak üzere çeşitli ülkelerde 15 civarında elektrikli muharebe aracı prototipi üretilmiştir. Ancak elektrikli muharebe araçlarının sahaya inmesinin 2010 yılları civarında olacağı öngörülmektedir.

Elektrikli araçların çalışma biçiminin anlaşılması, sistem tasarımı, optimizasyonu ve kontrol stratejilerinin belirlenebilmesi için modelleme ve simülasyon çalışmaları önem taşımaktadır. ABD ileri savunma araştırmaları ajansı (DARPA), farklı hibrid elektrikli araç güç sistemi konfigürasyonlarının simülasyonlarında kullanılmak üzere standart alt sistem modellerinin geliştirilmesine yönelik bir konsorsiyum oluşturmuştur.

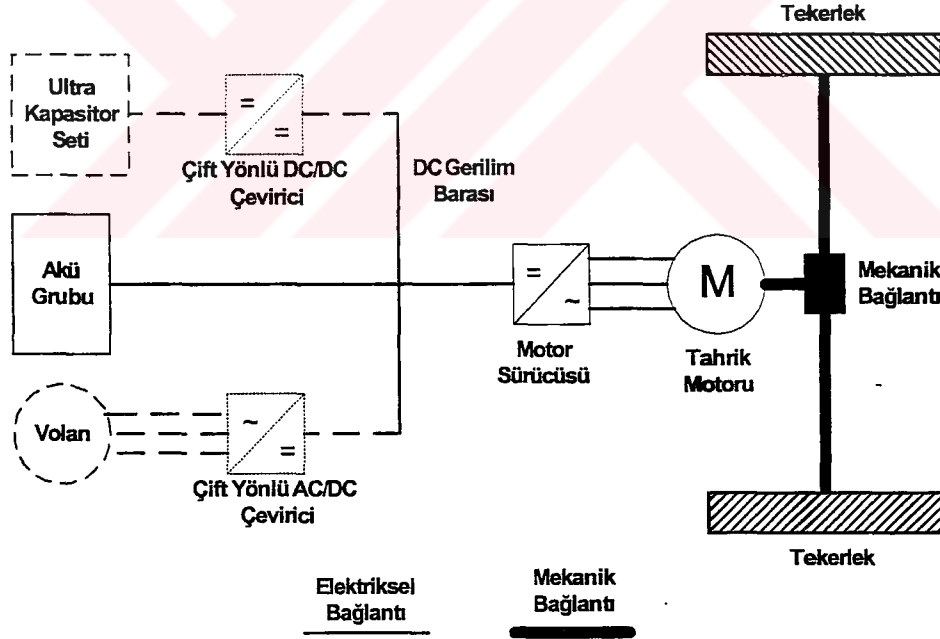
Bu tez kapsamında öncelikle elektrik ve hibrid elektrikli araç kavramları tanımlanmış ve elektrikli araçlarda kullanılan alt sistemler incelenmiştir. Seri hibrid konfigürasyona sahip bir araca yönelik tasarım çalışmaları yürütülmüş, alt sistemlerin modelleri geliştirilmiş ve çeşitli sürüş çevrimlerinde simülasyonu yapılmıştır. Son olarak daha önce prototipi geliştirilmiş olan bir elektrikli araca yönelik performans simülasyonları yapılmıştır. ve sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇ KONFIGÜRASYONLARI

Elektrikli araçlar, güç sistemleri göz önüne alındığında iki ana gruba ayrılırlar.

- Elektrikli Araç (EA)
- Hibrid Elektrikli Araç (HEA)

Şekil 2.1 de görüldüğü üzere, elektrikli araçlarda akü, volan ve ultrakapasitör gibi enerji depolama sistemleri tahrik motorunun ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisini sağlar. Elektrikli araçlarda sürüş menzili, depolanan enerji miktarı ile limitlidir. Günümüz enerji depolama sistemlerinin ağır olması, elektrikli araçlar önündeki en büyük bariyer olarak görülmektedir.



Şekil 2.1 Elektrikli araç güç sistemi konfigürasyonu

Elektrikli araçlarda güç yönetim sistemi hibrid araçlara göre daha basittir. Tahrik motorunun ihtiyaç duyduğu güç, enerji depolama sistemleri tarafından sağlanır. Yavaşlama veya yokuş aşağı sürüş sırasında, motor generatör olarak çalışmaya başlar

ve geri kazanımlı frenleme ile enerji depolama sistemleri tekrar şarj edilir. Elektrikli araçların gün sonunda tekrar şarj edilmesi gerekir.

Elektrikli araçların avantajları şu şekilde sıralanabilir;

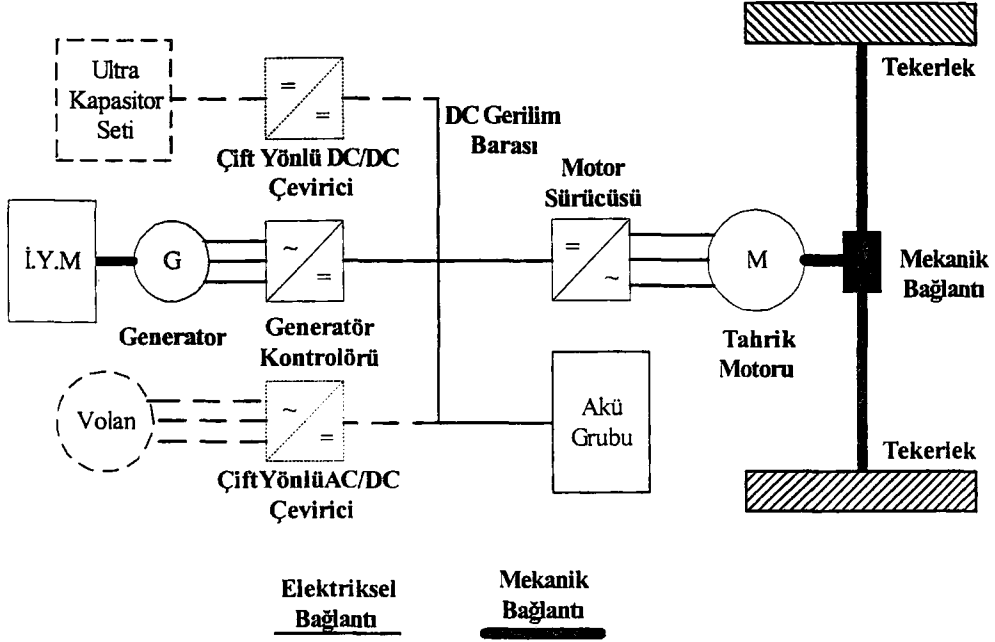
- Sıfır emisyon
- Tamamen sessiz çalışma
- Geri kazanımlı frenleme
- Yakıt masrafının az oluşu

Dezavantajları ise;

- Sınırlı sürüş menzili
- Yüksek ilk satın alım maliyeti
- Şarj istasyon altyapısının bulunmaması
- Tekrar şarj süresinin uzun olması (2-10 saat)

İki yada daha fazla farklı türde güç kaynağı veya tahrik sistemi olan araçlara hibrid elektrikli araç denilmektedir. İçten yanmalı motor (İYM) veya yakıt pilleri bunlardan birisi olabilir. Hibrid elektrikli araçlar güç sistemleri göz önüne alındığında iki gruba ayrılırlar.

Seri hibrid elektrikli araç (SHEA) güç besleme sisteminin hibridizasyonudur [1]. SHEA konfigürasyonunda, elektrikli araçtaki enerji depolama sistemine ek olarak, bir güç üretim sistemi (GÜS), İYM-generatör seti (Genset) veya yakıt pili, eklenir (Şekil 2.2). Bu sistem, akü şarj seviyesini kontrol etmek için kullanılabileceği gibi ana enerji kaynağı olarak ta kullanılabilir. Ana enerji kaynağı olarak kullanıldığında, GÜS ortalama yükleri ve enerji depolama sistemi de kısa süreli yüksek güç ihtiyaçlarını karşılar. Araç yavaşladığında veya düşük güç ihtiyaçlı sürüş sırasında, enerji depolama sistemi geri kazanımlı frenleme veya GÜS tarafından şarj edilir.



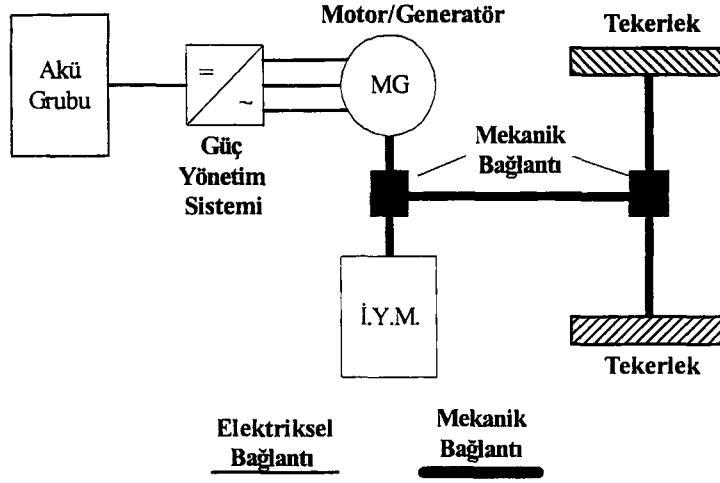
Şekil 2.2 Seri hibrid elektrikli araç güç sistemi konfigürasyonu

İçten yanmalı motorun tekerleklerle bağlantısının olmaması, transmisyon kullanımı gereksinimini ortadan kaldırır. %10-15 mertebelerinde olan transmisyon kayıplarının seri hibrid elektrikli araçlarda olmaması avantajlarından birisidir. İhtiyaç duyulmadığı anlarda İYM'nin kapatılması bir diğer üstünlüğüdür. İYM'nin sadece jeneratörü sürmek için kullanılması, İYM çalışma noktasının optimize edilmesine olanak sağlar. Böylece çevreye yayılan emisyonların en az seviyede tutulması mümkün olmaktadır.

SHEA'ların en büyük dezavantajı ise mekanik-elektrik-mekanik enerji çevirim kayıplarıdır. İçten yanmalı motor milindeki mekanik enerji, jeneratör ile elektrik enerjisine çevrilirken, jeneratör iç direnç kayıpları oluşur. Bu enerji daha sonra motor tarafından mekanik enerjiye dönüştürülürken, motor ve kontrolör verim kayıpları ortaya çıkar. Bir diğer dezavantajı ise tahrik motorunun tepe yükleri karşılayacak şekilde seçilmesidir. [2]

Paralel hibrid elektrikli araç ise (PHEA) tahrik sisteminin hibridleştirilmesidir. PHEA'ta hem İYM hem de elektrik motoru araca itici gücü verebilir. Örneğin, düşük hızlarda aracın elektrik motoru ile sürülmesiyle enerji daha verimli kullanılabilir. Yüksek hızlarda daha iyi performans alabilmek için İYM devreye girer. Araç tarafından ihtiyaç duyulan güç, İYM'un gücünden daha az ise elektrik motoru İYM

ile sürülür ve generatör olarak çalışarak enerji depolama sisteminin şarj edilmesi sağlanır. Paralel hibrid konfigürasyonlardan birisi Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3 Paralel hibrid elektrikli araç güç sistemi konfigürasyonu

Paralel hibrid elektrikli araçların avantajlarından birisi fazladan bir elektrik makinesi kullanımına gerek olmamasıdır. Ayrıca İYM enerjisinin doğrudan tekerleklere iletilmesi, sistem verimliliğini artırır. Diğer bir avantajı her iki motorunda tepe yükler için boyutlandırılmamasıdır.

Transmisyon kullanımı gereksinimi ve İYM çalışma noktasının optimize edilememesi PHEA'ların dezavantajlarıdır. PHEA'lar erken dönem elektrikli araçlar olarak görülmektedir. Bunun nedeni tekerleklere iletilen itici gücün halen büyük bir bölümünün İYM tarafından sağlanmasıdır. Bu oran 8:2 – 6:4 aralığında değişmektedir.

Bu iki hibrid konfigürasyonun birleştirilmesi ile oluşturulan seri-paralel hibrid ve kompleks hibrid gibi başka hibrid konfigürasyonlar da mevcuttur. [3]

Konvansiyonel, seri hibrid ve paralel hibrid araçların, farklı sürüş çevrimlerinde performans ve enerji tüketimi karşılaştırması ve hibrid elektrikli araçlarda enerji akışı ayrıntılı olarak daha önceki çalışmalarda ele alınmıştır. [4]

3. ELEKTRİKLİ ARAÇ ALT SİSTEMLERİ

3.1 Güç Elektroniği Sistemleri

EA ve HEA teknolojileri içerisinde güç elektroniği devreleri önemli bir yer tutmaktadır. MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor), IGBT (Insulated gate bipolar transistor) ve IGCT (Insulated gate controlled thyristor) gibi yarı iletken anahtarların geliştirilmesi ile elektrik sistemlerinin kontrolünde önemli gelişmeler sağlanmıştır. Tahrik sisteminin kontrolü, üretilen AC gerilimin DC ye çevrilmesi, yakıt pili çıkış geriliminin düzenlenmesi, akü şarjının uygun yöntemlerle sağlanması vb., klasik güç elektroniği devrelerinin çeşitli kontrol yöntemleri kullanılarak kontrol edilmesiyle başarılmaktadır.

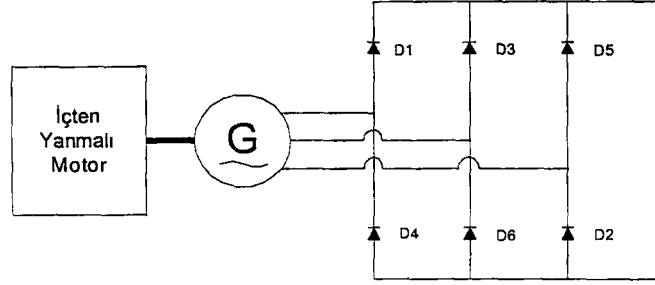
EA ve HEA’larda kullanılan güç kontrol sistemlerini, klasik güç elektroniği devreleri oluşturmaktadır. Bu devreler 3 ana başlık altında incelenebilir;

- Doğrultucular (AC/DC)
- Çeviriciler (DC/DC)
- Eviriciler (DC/AC)

Ac ac kıyıcılar elektrikli taşıtlarda uygulama alanına sahip değildir.

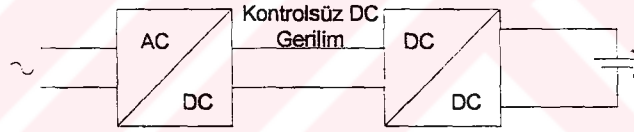
Hibrid elektrikli taşıtlarda kullanılan bara gerilimi dc dir. Bunun başlıca nedeni, kullanılan elektronik devrelerde senkronizasyon sorunu yaşanmaması, kontrol kolaylığı ve verimliliğin artırılmasıdır. Ancak dc elektrik makinaları bakım gereksinimi ve ömürlerinin kısa olması gibi nedenlerle, HET uygulamalarında tercih edilmemektedir. HET elektrik enerjisi üretimi genellikle ac çıkışlı generatörler ile sağlanır. Üretilen elektrik enerjisi dc baraya doğrultucu devreleri ile bağlanır (Şekil 3.1). Bu doğrultucuların AC/DC dönüşümünün yanında bir diğer önemli özelliği güç yönetim (power management) sistemi olarak ta kullanılmasıdır. Pek çok uygulamada dc baraya bağlı olan akülerin şarj ve deşarjının kontrolünde DC/DC çevirici kullanmak yerine, çıkış gerilimi değiştirilebilir doğrultucular kullanılmaktadır.

Örneğin, doğrultucu çıkış geriliminin akü geriliminin üzerine çıkarılması ile akü şarj edilebilmektedir.



Şekil 3.1 Generatör DC bara bağlantısı

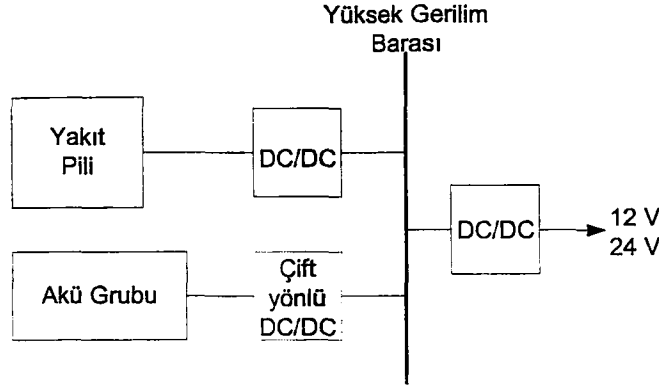
Doğrultucuların ET'lerde bir diğer kullanım alanı da, akü şarj devreleridir. Akülerin şebekeden şarj edilebilmesi için kullanılan güç elektroniği sisteminin bir parçası da doğrultucu devreleridir. Şebeke gerilimi bir kontrolsüz doğrultucu ile doğrultulduktan sonra bir dc dc çevirici ile uygun şarj algoritması kullanılarak akü şarj edilir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Akü şarj sistemi

Dc dc çeviriciler, HET'lerde farklı dc gerilim seviyesine sahip sistemlerin birbirine bağlanması ve fazla kullanım alanı bulmamakla birlikte dc motor kontrolü olmak üzere iki amaçla kullanılabilirler.

Farklı gerilim seviyesine sahip dc sistemler yakıt pili, akü grubu veya alçak gerilim beslemesine ihtiyaç duyan elektronik devreler olabilir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Farklı Seviyedeki DC Gerilimlerin Paralel Bağlanması

Pek çok binek HET uygulamasında DC bara gerilimi 300 V civarında seçilmiştir. Yüksek gerilim barası, kullanılan akülerin birbirine seri bağlanması ile gerçekleştirilebilir. Örneğin 25 adet 12 V ‘luk kurşun asit akünün seri bağlanması ile 300 V luk bara gerilimi oluşturulur. Bu durumda akü grubu için dc dc çevirici kullanmaya gerek olmayabilir. Ancak yakıt pili sistemlerinin çıkış gerilimi genellikle bu seviyenin altında olduğundan, sisteme güç yönetim sistemi adı da verilen dc dc çevirici aracılığı ile bağlanır.

Çevirici kullanımına bir neden de gerek akü gerekse de yakıt pilinin ideal gerilim kaynakları olmaması yani uç gerilimlerinin yüke ve diğer bazı koşullara göre değişim göstermesidir. Regüle edilmemiş güç kaynaklarının birbirine bağlanması kararlı olmayan bir yapı oluşmasına neden olur.

Akü grubu çıkışında kullanılan dc dc çeviriciler, standart çeviricilerden farklı olarak, çift yönlü güç akışını sağlamalıdır. HET’lerde akü grubu, çeşitli yol koşullarında sistemi besler ve uygun durumlarda tekrar şarj edilir. Bu işlem için kullanılacak çevirici çift yönlü çalışabilmeli veya iki ayrı çevirici kullanılmalıdır. İki çevirici kullanımından ağırlık ve maliyet gibi nedenlerle kaçınılmaktadır.

Eviriciler asenkron, senkron, sürekli mıknatıslı senkron motor hız kontrolünde kullanılabilir. Bu makinaların kontrolünde evirici çıkışı sinüzoidaldir. Sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım makinası kontrolünde ise fazlar kare dalga ile beslenir. ET’lerde motor hız kontrolü için kullanılan eviriciler genellikle kullanılan motorun faz sayısına bağlı olarak 3 fazlıdır. Bu konular tahrik sistemleri bölümünde ele alınmıştır.

3.2 Tahrik Sistemleri

EA ve HEA'larda kullanılan tahrik sistemleri elektrik motoru, güç elektroniği ve kontrol ünitelerinden oluşur. Güç elektroniği ve yeni manyetik malzemelerdeki hızlı gelişmeler nedeniyle bu sistemler her geçen gün yenilenmektedir. Daha önceden de değinildiği gibi paralel hibrid elektrikli taşıtlarda bunlara ek olarak, içten yanmalı motor da tahrik sisteminin bir parçasıdır.

Bugüne gelene kadar farklı elektrik motor tipleri EA ve HEA'larda denenmiştir. EA ve HEA motorlarından beklenen özellikler şunlardır:

- Yüksek anlık güç ve yüksek güç yoğunluğu
- Yüksek kalkış momenti ve çok geniş sabit güç bölgesi aralığı
- Moment ihtiyacına hızlı cevap verebilme
- Yüksek verim
- Geri kazanımlı frenleme için yüksek verim
- Aracın değişik çalışma koşulları için yüksek güvenilirlik ve sağlamlık
- Kabul edilebilir seviyede maliyet

Hibrid elektrikli araçlardaki elektrik tahrik sistemlerinin seçimi, esas olarak üç faktöre bağlıdır. Bunlar; sürücünün beklentileri, araç kısıtları ve enerji kaynaklarıdır. Sürücünün beklentileri; ivmelenme, en yüksek hız, tırmanma kabiliyeti, frenleme ve menzil özelliklerini içeren sürüş profili ile tanımlanır. Araç kısıtları; aracın çeşidine, araç ağırlığına ve aracın taşıdığı yüke bağlıdır. Enerji kaynakları ise; aküler, yakıt pilleri, süperkapasitörler, volanlar(flywheel) ve değişik hibrid kaynaklarla ilgilidir.[5]

Geçmişte kontrolünün kolay olması nedeniyle tercih edilen DC motor türleri, günümüzde güç elektroniği alanında yaşanan gelişmeler sonucunda yerlerini AC motorlara bırakmaktadır. Fırça-kolektör bakım gereksinimi DC motor kullanımının azalmasındaki en önemli faktördür.

Güç elektroniği ve kontrol teknolojilerinde geline nokta, asenkron motor hız kontrolü problem olmaktan çıkmış ve zaten endüstride oldukça yaygın olarak kullanılan bu motor, EA ve HEA'larda kullanım imkanına kavuşmuştur. Özellikle

kısa devre kafesli asenkron motorlar, üretimin kolaylığı, maliyet avantajı ve sağlam yapısı nedenleri ile tercih edilmektedir.

Günümüzde hali hazırda üzerinde çalışılan EA ve HEA'ların çoğunda vektör kontrollü asenkron motor kullanılmaktadır. Ancak, sürekli mıknatıslı elektrik motorları da gelecek vaat etmektedir.

Elektrikli araç tahrik sistemlerinde başlıca 4 elektrik motoru kullanılmaktadır;

- DC motor
- Asenkron motor
- Sürekli mıknatıslı motor
- Anahtarlamalı relüktans motoru

DC motorlar, bir manyetik alan içerisinde bir iletkenin akım geçirilmesi sonucunda, o iletkenin kuvvet etki etmesi prensibiyle çalışırlar. DC motorlarda, manyetik alanın oluşturulması için statorda bir alan sargısı ve rotorda da dönme hareketinin sağlanması için bir endüvi sargısı bulunur. DC gerilim dönen kısma da uygulandığından, fırça kolektör düzeneği kullanılmaktadır. Bu düzenek DC motorun bakım gereksinimini arttırmakta ve sanayide olduğu gibi elektrikli araçlarda da kullanımının azalmasına neden olmaktadır.

Asenkron motorlar basit ve sağlam yapısı nedeniyle endüstride olduğu gibi elektrikli araçlarda da en çok tercih edilen motor türüdür. Tek ve üç fazlı olarak üretilebilmekle beraber, yüksek güç gerektiren elektrikli araç uygulamalarında üç fazlı asenkron motor kullanılmaktadır.

Asenkron motorlarda hız kontrolü, dc motorlara göre daha karmaşıktır. 3 fazlı eviriciler farklı kontrol stratejileri ile birleştirilirler. Asenkron motor kontrolünde kullanılan eviricilerde, dc gerilimin anahtarlanarak ac ye dönüştürülmesi çoğunlukla MOSFET veya IGBT'ler ile yapılmaktadır. Bu anahtarlar çeşitli PWM teknikleri kullanılarak kontrol edilir.

Gerilim/frekans (V/F) oranının sabit tutulması prensibine dayanan klasik asenkron motor hız kontrol yöntemi, skalar kontrol. asenkron motor sürekli hal devre eşitlikleri temel alınarak geliştirildiğinden, dinamik durumlarda ve düşük hızlarda zayıf performans gösterir. EA ve HEA motor sürücü performans gereksinimleri, skalar

kontrol yönteminin sağlayamayacağı kadar zorludur. Bunun yerine çoğunlukla vektör kontrol yöntemi kullanılır. [3,6]

EA tahrik sistemlerinde kullanılan asenkron motorlar genellikle en yaygın vektör kontrol yöntemi olan alan uyarlamalı kontrol (FOC-Field Oriented Control) yöntemi ile kontrol edilmektedir. [7]

Alan uyarlamalı kontrol, her bir faz akım ve geriliminin hem fazı hem de genliğinin kontrolünü içerir. FOC üç ana noktaya dayanmaktadır: makine akım ve gerilim uzay vektörleri, hız ve zamana bağlı olarak değişen 3 fazlı sistemin, zamanla değişmeyen 2 koordinatlı sisteme dönüştürülmesi ve uygun bir darbe genişlik modülasyonu yönteminin geliştirilmesi. AC makinelerin bu yöntemle kontrol edilmesi, DC makine kontrolünün tüm avantajlarına sahip olmakta ve mekanik komütasyon problemlerinin ortadan kalkmasını sağlamaktadır.

Alan uyarlamalı kontrol, bir vektör ile ifade edilen stator akımlarının kontrolünü içerir. Bu yöntem, hız ve zaman bağlı 3 fazlı sistemin, iki koordinatlı (d ve q koordinatları) zamanla değişmeyen sisteme dönüştürülmesi temeline dayanır. Bu dönüştürme DC makine kontrolüne benzer bir yapının oluşmasına yol açar. Alan uyarlamalı kontrollü makineler giriş referansı olarak iki sabite ihtiyaç duyarlar: moment bileşeni (q koordinatı ile aynı doğrultuda) ve akı bileşeni (d koordinatı ile aynı doğrultuda). FOC, iki koordinata dönüştürülme temeline dayandığından, kontrol sistemi anlık elektriksel büyüklüklerle ilgilenir. Bu sayede, makinenin tüm çalışma şartlarında uygun kontrol sağlanır.

d-q referans düzleminde moment ifadesi, rotor akısı ve moment bileşeni ile orantılıdır.

$$T \propto \phi_R I_{sq}$$

Rotor akısının sabit bir değerde tutulması ile moment ve moment bileşeni arasında lineer bir ifade elde edilir. Bu yolla, stator akımının moment bileşeninin kontrolü ile moment kontrol edilebilir.

Şekil 3.4'te asenkron motor vektör kontrolüne ilişkin Matlab/Simulink SimPowerSystem demo modeli görülmektedir.

Asenkron motorlara göre kayma açısı hesaplamasının olmaması nedeniyle sürekli mıknatıslı motor kontrolü daha kolaydır. Aynı güç oranında, sürekli mıknatıslı motorun boyutları asenkron motora göre daha küçüktür. Rotor bakır kayıpları olmaması, soğutma açısından PM motorlara avantaj sağlamaktadır. Buna karşın asenkron motor fiyat açısından PM motora üstünlük sağlamaktadır. [6]

Sürekli mıknatıslı senkron motor hız kontrolünde vektör kontrol yöntemi kullanılabilir. Motor sürekli senkron hızda döndüğünden, asenkron motorda olduğu gibi kayma açısı hesaplanmasına gerek olmaması vektör kontrolün uygulanmasını kolaylaştırmaktadır. Ancak PM senkron motor hız kontrolünde yüksek çözünürlüklü pozisyon sensörü kullanımını gerektirir. [6]

Fırçasız doğru akım motor hız kontrolü ise daha kolaydır. Fazlara uygulanan gerilimler kare dalga şeklindedir ve konum belirlemek için yalnızca 3 adet akım sensörü kullanmak yeterlidir. 3 fazlı kare dalga evirici ile hız kontrolü sağlanır. [6]

Anahtarlamalı relüktans makinasının (SRM) en belirgin özelliği rotorunda mıknatıs veya sargı olmaması ve statorunda bağımsız faz sargılarının olmasıdır. Rotor ve stator, ince manyetik çelik tabakaların üst üste konulmasıyla oluşturulur. [6]

SRM stator faz sargıları birbirinden bağımsız olarak sırayla dc gerilimle beslenir. Diğer motorlardan farklı olarak SRM motorlarının dönüş yönü fazların beslenme sırasına bağlıdır. Örneğin 1-2-3-4 besleme sırası uygulandığında motor saat yönünde dönüyorsa, 4-3-2-1 besleme durumunda ters yönde dönecektir.

Anahtarlamalı relüktans motorları, basit yapı ve düşük üretim maliyeti avantajlarına sahiptirler ve elektrikli araç tahrik sistemi için moment-hız karakteristiğini karşılamaktadırlar. SRM kayıplarının çoğunun statorda oluşması, soğutma açısından kolaylık sağlamaktadır. Birbirinden bağımsız stator fazları, fazlardan birinde sorun oluşması durumunda bile çalışmanın devam etmesine olanak sağlar. [6]

3.3 Güç Üretim Sistemleri

Günümüz hibrid araçlarında güç üretimi genellikle kısaca genset olarak adlandırılan içten yanmalı motorların sürdüğü generatörler ile sağlanmaktadır. Yüksek güç gerektiren ağır araçlarda içten yanmalı motor olarak dizel motorlar kullanılırken, hafif araçlarda benzinli motorlar da tercih edilebilmektedir. Generatör olarak asenkron veya sürekli mıknatıslı senkron makinalar seçilmektedir.

Enerji verimliliği göz önüne alınarak, genset'in en yüksek performansı verdiği aralık, çalışma noktası olarak seçilir. Hibrid araçlarda verimliliğin artırılması amacıyla güç üretim sisteminin optimizasyonu önemli bir çalışma konusudur.

Yakıt pilleri geleceğin güç üretim sistemleri olarak görülmektedir. En basit anlamda bir yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirir. Yakıt olarak hidrojen ile beslendiğinde, atık olarak sadece ısı ve su buharı üretirler. Yakıt pillerinin çeşitli türleri olmasına karşın, boyut ve çalışma sıcaklığı gibi etmenler nedeniyle sadece proton elektrolit membran (PEM) tipi yakıt pilleri elektrikli araçlara uygun görünmektedir.

Yakıt pili tipleri şunlardır:

- Proton Elektrolit Membranlı Yakıt Pili (Proton Exchange Membrane-PEM)
- Fosforik Asit Yakıt Pili (Phosphoric Acid Fuel Cell-PAFC)
- Alkali Yakıt Pili (Alkaline Fuel Cell-AFC)
- Ergimiş Karbonat Yakıt Pili (Molten Carbonate Fuel Cell-MCFC)
- Katı Oksit Yakıt Pili (Solid Oxide Fuel Cell-SOFC)

Yakıt pili tiplerinin EA'larda uygulanabilmesinde dikkat edilen ilk kriter çalışma sıcaklıklarıdır. Yüksek çalışma sıcaklıklarına sahip SOFC (700-1000 °C), ve MCFC'lerin (650-750 °C), EA'larda uygulanması aracın çalışma ortamının getirdiği kısıtlamalar nedeni ile zor görünmektedir. Yakıt pilleri arasında diğerlerine nazaran daha düşük sıcaklıklarda çalışan PAFC (150-250 °C), AFC (110-150 °C), PEM (90-120 °C) yakıt pilleri ET'ler için daha uygun görülmektedir. PAFC maliyetinin ve nispeten çalışma sıcaklığının yüksekliği nedeni ile tercih edilmemektedir. [8]

Bugün için yakıt pillerinin elektrikli taşıtlarda kullanımının önündeki engeller şu şekilde sıralanabilir:

- Yakıt pillerinin yüksek maliyeti
- Hidrojenin depolanma tehlikesi
- Farklı yakıtlardan hidrojen elde edilmesinin zorluğu ve maliyeti
- Tüm sistemin boyut ve ağırlığının araçlar için halen yüksek oluşu
- Yakıt pillerinin çalışmaya başlamadan önce belirli bir sıcaklığa çıkartılma gereksinimleri

Yakıt pillerinin, önümüzdeki birkaç yıl içerisinde, yardımcı güç kaynağı olarak düşük güçlerde araçlarda uygulanmaya başlanacağı tahmin edilmektedir. Ana güç kaynağı olarak kullanımının 2015-2020 yılları civarında gerçekleşeceği öngörülmektedir.

3.4 Enerji Depolama Sistemleri

Enerji depolama sistemleri, elektrikli araçların önemli alt sistemlerindendir. Ana güç kaynağı, anlık yükleri karşılama ve geri kazanımlı frenleme sırasında üretilen enerjinin depolanması gibi görevler üstlenirler.

Hibrid elektrikli araçlarda enerji depolama sisteminden genel olarak beklenen özellikler şunlardır;

- Yüksek özgül güç (W/kg) ve güç yoğunluğu (W/cm^3)
- Yüksek özgül enerji (Wh/kg) ve enerji yoğunluğu (Wh/cm^3)
- Derin deşarja dayanabilme
- Uzun ömür
- Yüksek güçle şarj olabilme
- Az bakım gerektirme
- Güvenilirlik
- Düşük maliyet

Günümüzde tüm bu özelliklere bir arada sahip olan enerji depolama sistemi bulunmamaktadır. Enerji depolama sistemleri genellikle çeşitli tipteki akülerden oluşturulmaktadır. Bazı uygulamalarda flywheel ve süperkapasitörlerde kullanım alanı bulabilmektedir. [9]

3.4.1 Akü

Hibrid elektrikli araç enerji depolama sistemi genellikle birbirine seri ve paralel bağlı akülerden oluşturulmaktadır. Valf regüleli kuru tip kurşun asit (VRLA), nikel kadmiyum (NiCd), nikel metal hidrat (NiMH), sodyum sülfür (NaS), sodyum nikel klorid (NaNiCl₂), lityum polimer (Li-Polimer) ve lityum iyon (Li-ion) elektrikli araçlarda kullanılabilecek akülerdir. Ancak pratikte VRLA, NiMH ve Li-ion aküler HEA’larda kullanım alanı bulabilmektedir.

Tablo 3.1’de, bahsedilen akülere ilişkin çeşitli parametreler verilmiştir. Bu veriler değişik akü üreticileri için farklılıklar gösterebildiğinden sadece fikir verebilmek amacıyla kullanılmıştır. Hatta aynı akünün değişik modellerinde bile önemli farklılıklar görülebilmektedir.

Tablo 3.1 Akü karşılaştırma tablosu

Akü Türü	Özgül Enerji (Wh/kg)	Özgül Güç (W/kg)	Ömür Döngü Sayısı (%80 Deşarj Derinliğinde)	Nominal Hücre Gerilimi (V)
VRLA	30-45	150-400	300-800	2
NiCd	50-65	150-350	1000-1500	1.2
NiMH	30-85	300-1300	800-1300	1.2
NaS	80-120	110-200	900-1000	2
NaNiCl ₂	80-100	130-160	1000-1200	2.5
Li-Polimer	140-170	300-350	600	2.8
Li-Ion	90-130	200-800	1200	3.6

Tablo 1’deki aynı akü türü için verilerin belirli aralıklar içinde değişmesinin nedeni, özgül enerji, özgül güç ve ömür döngü sayılarının birbirleri ile ters orantılı olarak değişmesinden kaynaklanmaktadır. Özgül gücü artırılan bir akünün, özgül enerjisinde ve ömür döngü sayısında düşüş görülmektedir. Örneğin Varta firmasının üretmekte olduğu yüksek özgül enerjili NiMH akü 65 Wh/kg, 300 W/kg iken, yüksek güçlü NiMH akü ise 35 Wh/kg, 1300 W/kg’dir.

Dünyada en fazla kullanım alanı kurşun asit (PbA) aküler bulmaktadır. Olgunlaşmış teknolojisi, üretiminin çok yaygın olmasından dolayı temininin kolay olması ve düşük fiyatı gibi nedenler PbA akülere avantaj sağlamaktadır. Ancak enerji ve güç yoğunluklarının düşük olması yeni arayışlara yönelinmesine neden olmuştur.

Günümüzde klasik sulu tip kurşun asit akülerin yerini kuru tip kurşun asit aküler almaya başlamıştır. Kuru tip kurşun asit aküler jel ve emdirilmiş cam elyafı (absorptive glass mat-AGM) olmak üzere iki farklı türde üretilmektedir. Bu gelişmiş kurşun asit akülerin özgül güçleri 400 W/kg değerlerine ulaşmıştır. Ayrıca kapasitelerinin 9 katı kadar akım değerleriyle şarj edilebildikleri ifade edilmiştir [10].

NiMH akü teknolojisi özellikle yüksek özgül güç özelliği ile HEA enerji depolama sistemleri için ilginç bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Geri kazanımlı frenlemede yüksek enerji depolama kabiliyetleri ve uç gerilimlerinin hemen hemen yükten bağımsız oluşu diğer üstün özellikleri arasındadır. Üretim miktarının düşük olması nedeniyle fiyatlarının yüksek oluşu ve yüksek güçlerde henüz güvenilirliklerinin ispat edilememesi ise başlıca dezavantajlarıdır.

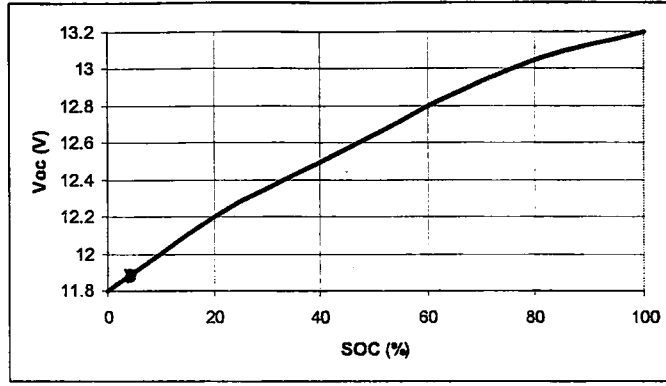
Yüksek özgül enerji ve güç yoğunluğu özellikleri nedeniyle, geleceğin enerji depolama teknolojisi olarak görülmekte olan Li-ion aküler henüz laboratuvar aşamasındadırlar. Taşınabilir elektrikli aletlerde kullanımı gün geçtikçe artmasına rağmen, yüksek güçlerde kullanımı ile ilgili güvenilirliği belirsizliğini korumaktadır.

NiCd aküler geçmişte elektrikli araçlarda kullanım alanı bulmuşlardır. Ancak tam deşarj olmadan tekrar şarj edilmesi durumunda kapasitesini kaybetmesine neden olan hafız etkisi nedeniyle HEA'larda kullanım alanı bulamamıştır. Kadmiumun kanserojen ve çevreye zarar verici etkileri diğer sorunlardır.

NaS ve NaNiCl_2 aküler yüksek özgül enerjilerine rağmen düşük özgül güç yoğunluğu ve 300 - 350 °C deki çalışma sıcaklığı özelliklerinden dolayı EA teknolojisi içerisinde kullanım alanı bulamamaktadır.

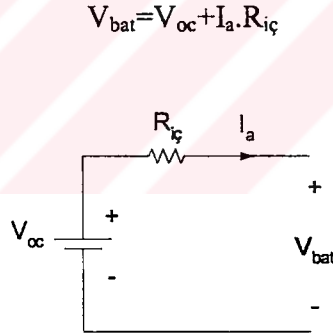
3.4.1.1 Hibrid Elektrikli Araçlarda Akü Seçim Kriterleri

Genel olarak EA'larda kullanılacak bataryaların spesifik güç (W/kg), spesifik enerji (Wh/kg) seviyelerinin yüksek, uzun ömürlü ve düşük maliyetli olması istenir. Ancak bu özelliklerin tümünü bir arada barındıran mükemmel batarya bulunmamaktadır. Hibrid elektrikli araçta kullanılacak bataryalar, araçta kullanılan güç yönetim sistemi ve araç konfigürasyonuna göre seçilmelidir.



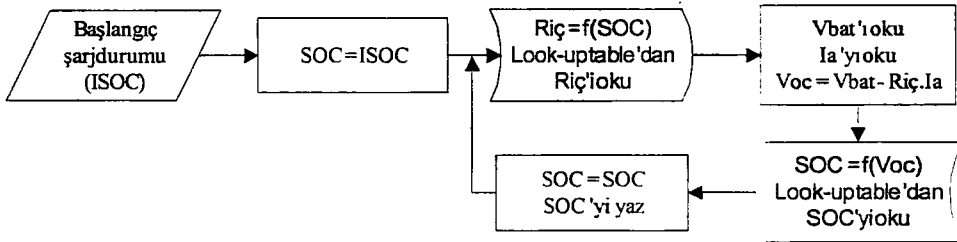
Şekil 3.5 Optima sarı tip 55 Ah AGM akü Voc/SOC grafiği

Akü şarj seviyesinin belirlenmesinde kullanılan en bilinen yöntem akü açık devre geriliminin (V_{oc}) ölçülmesidir. Akünün açık devre gerilimi akü şarj seviyesiyle değişmektedir (Şekil 3.5). Ancak elektrikli araç gibi dinamik bir sistemde bu yöntem tek başına yeterli sonucu verememektedir. Akü iç direncinin etkisinin de göz önüne alınmasıyla akü açık devre gerilimi bilinen eşitlikten bulunabilir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Akü modeli

Şekil 3.7’te şarj durumunun belirlenmesine yönelik algoritma görülmektedir.



Şekil 3.7 Şarj durumunun belirlenmesine yönelik algoritma

Literatürde bu yöntemin dışında yüksek işlemci desteği gerektiren yöntemlerden söz edilmektedir.[11] Dinamik bir sistemin iç durumlarının tahminine yönelik algoritma olan Kalman Filtresi ve yapay sinir ağları yaklaşımlarının kullanıldığı yöntemler bunlara örnek olarak verilebilir.

Kimyasal yapılarından dolayı aynı tür iki akünün karakteristiklerinin üst üste çakışması yarı iletken anahtarlara benzer şekilde mümkün değildir. HET’lerde birbirine seri ve paralel bağlanarak kullanılan akülerin şarj durumlarının farklı seviyelerde olması uygulamada sorunlara yol açar. Diğerlerine göre şarj seviyesi daha düşük olan akü zaman içerisinde derin deşarja maruz kalarak devre dışı kalır.

Özellikle gelişmiş akü türleri olan NiMH ve Li-Ion aküler, çok daha hassas yapıda olduklarından mutlaka akü yönetim sistemiyle birlikte kullanılırlar.

Aküler arasındaki şarj farklılıklarını gidermek, akü ömrünün artırılması için önem arz etmektedir. Bir seri akü grubu içerisindeki her bir akü gerilimi bir mikroişlemci veya sayısal işaret işleyicisi tarafından okunur. Belirlenen ortalama gerilimin altında kalan aküler belirlenir. Şarj seviyesi düşük olarak belirlenen akülerin uçlarına ayrı ayrı bağlı olarak bulunan şarj devreleri devreye girer.

3.4.2 Volan (Flywheel)

Volan yüksek hızlarda dönen ve yüksek eylemsizliğe sahip motor/generatör sistemidir. Generatör olarak genellikle sürekli mıknatıslı senkron makineler kullanılır. Sürtünmeyi azaltmak için vakumlu bir sistem içerisinde bulundurulurlar. Yüksek özgül güç özellikleri nedeniyle hibrid elektrikli araçlarda ani yükleri karşılamak amacıyla kullanım alanı bulabilmektedirler.

Pratikte özgül enerji yoğunluğu çok düşük olduğundan ana enerji depolama sistemi olarak kullanılamazlar. Ayrıca mobil bir uygulamada, araç içerisinde 30000 devir/dakika hızla dönen bir sistemin güvenilirliği kuşku götürmez bir sorundur. Kompleks vakum contaları, yataklama problemleri, elektronik kontrol zorlukları, aracın taşıyamayacağı kadar büyük ve ağır olmaları flywheellerin diğer problemleridir.

Tablo 3.2 Volan & Kurşun Asit Akü Karşılaştırması [8]

Özellikler	Kurşun asit aküye göre oran
Enerji Yoğunluğu (Wh/cm ³)	0.025
Özgül enerji (Wh/kg)	0.25
Güç Yoğunluğu (W/cm ³)	6
Özgül güç (W/kg)	7
Çevrim ömrü	1000
Tekrar şarj oranı	240

Tablo 3.2’de volanların kurşun asit aküyle karşılaştırılması görülmektedir. Özellikle araç içerisinde yer sınırlaması olması nedeniyle, düşük enerji yoğunluğu ve özgül enerjisi, volanların elektrikli araç uygulamalarında kullanım alanı bulamamasına neden olmaktadır.

3.4.3 Süperkapasitör

Süperkapasitörler, bir gaz yada vakum ile ayrılmış iki plakadan oluşan ve bilinen kapasitörden 20 ila 200 kat daha büyük kapasitans özelliği gösteren aygıtlardır. Özgül enerji seviyeleri 2-4 Wh/kg civarında değişebilmektedir. Kurşun asit akülere göre bile oldukça düşük kalan bu oran, süperkapasitörlerin de hibrid araçlarda ana enerji depolama sistemi olarak kullanılmasını imkansızlaştırır. Ancak 2500 W/kg özgül güç oranına sahip prototip süperkapasitörler geliştirilmiştir. Bu özelliklerinden dolayı yakın gelecekte flywheel uygulamalarının yerini alacağı öngörülmektedir.

Süperkapasitörler akülere göre hızlı şarj ve deşarj edilebilirler ve şarj-deşarj ömürleri daha fazladır. Ancak kontrol elektroniği gerektirmeleri ve bugün için maliyetlerinin yüksek oluşu dezavantajlarındandır.

3.5 Güç Yönetim Sistemleri

Farklı hibrid konfigürasyonlarında çeşitli komponentler arasındaki güç akışını düzenlemek için farklı güç yönetim stratejilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Güç yönetim stratejisinin belirlenmesinde göz önüne alınan kriterler aşağıda belirtilmiştir.

- İYM çalışma noktasının optimizasyonu (yakıt tüketimi ve emisyon)
- Çalışma koşuluna uygun enerji depolama sisteminin seçilmesi
- Depolanan enerji miktarı
- Batarya maksimum şarj ve minimum deşarj gerilimleri
- Hedeflenen sürüş performansı

Seri hibrid elektrikli araçlarda iki temel güç yönetim sistemi stratejisinden söz edilmektedir. Bunlardan biri güç destek (power assist), diğeri de yumuşak hibrit (soft hybrid). Güç destek yönteminde genset ortalama yükleri karşılayacak şekilde boyutlandırılırken, enerji depolama sistemi ani yükleri karşılayacak şekilde seçilir. Yumuşak hibritte ise ana güç kaynağı enerji depolama sistemidir. Genset enerji depolama sistemini belirli bir şarj seviyesinde tutmak üzere gerektiğinde devreye girer ve istenilen şarj seviyesine ulaşıldığında devreden çıkar.

Bir hibrid aracın çalışması sürecinde, güç yönetim sistemi, kaynaklardan istenen toplam gücü, mevcut enerji depolama sistemi kapasitesini ve akü uç gerilimini izleyerek, uygun çalışma stratejisini belirler.

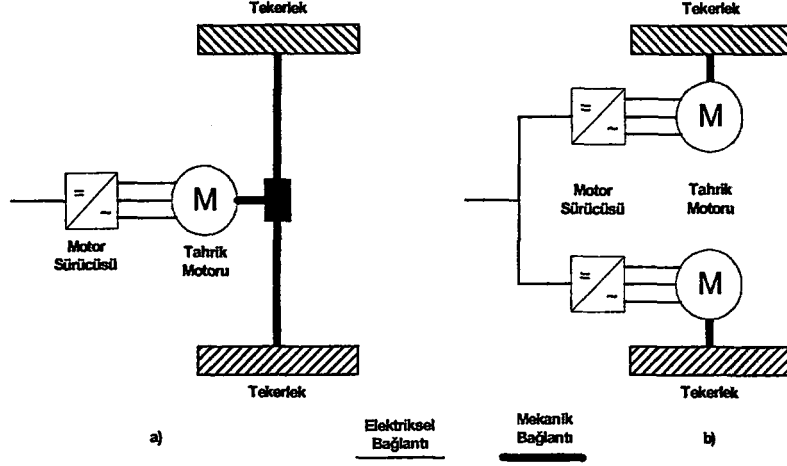
3.6 Sürüş Sistemleri

Taşıt sürüş sistemlerinde, elektrik motorlarının kullanımı, farklı sürüş sistemlerinin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Düşük hızlarda yüksek moment üreten ve sabit güç çalışma bölgesi daha uzun olan elektrik motorları, transmisyon ve diferansiyel sistemlerinin araç sevk sistemlerinde kullanılmamasına olanak sağlamıştır.

İçten yanmalı motorların rolenti adı verilen devirden sonra güç ve moment üretebilmeleri, konvansiyonel araçlarda diferansiyel ve transmisyon kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir. Oysa günümüzde gelişmiş kontrol yöntemleri ve güç elektroniği devreleri sayesinde, elektrik motorlarının devir ayarı 0 'dan başlayarak yapılabilir.

Hibrid araçlarda klasik ve doğrudan sürüş (direct drive) sistemleri uygulanabilmektedir. Klasik sürüş sistemi elektrik motorunun bir transmisyon üzerinden tekerlekleri sürmesini ifade etmektedir (Şekil 3.8.a). Doğrudan sürüşte ise aracın her iki tarafındaki tekerlekler ayrı elektrik motorlarıyla tahrik edilir (Şekil

3.8.b). Günümüzde tekerlek içi motor (in-hub wheel) denilen PM motorların çıkmasıyla bu konseptte gelişmelerde yaşanmaktadır. Ancak tekerlek içi motorlar üzerindeki çalışmalar halen laboratuvar aşamasındadır.



Şekil 3.8 Sürüş Sistemleri

3.7 Veri Haberleşmesi

Otomotiv endüstrisinde, araçların içerisinde gün geçtikçe daha fazla elektronik sistemin kullanılmaya başlanması, veri haberleşmesi konusuna önem kazandırmıştır. Elektrikli araçlarda bu ihtiyaç çok daha fazla ön plana çıkmıştır. Sert ortam koşullarında, verinin bir noktadan diğerine hatasız iletilmesi önem taşımaktadır.

Elektrikli araçlarda elektronik cihazların birbirleri arasında haberleşmesi, örneğin motor ve motor kontrolörü, ve bazı verilerin izlenmesi çoğunlukla aşağıda belirtilen seri haberleşme protokolleri ile gerçekleştirilir.

- RS232
- RS485
- CAN

RS232, iki elektronik cihazın haberleşmesine olanak tanırken, RS485 ile 32 cihazın birbirlerine bağlanabileceği bir ağ oluşturabilir.

Ancak bu iki haberleşme protokolü, elektromanyetik girişimin üst düzeyde bulunduğu ve bazı acil mesajların beklemeden iletilmesinin gerektiği durumların ortaya çıkabildiği elektrikli araçlar için yeterli değildir.

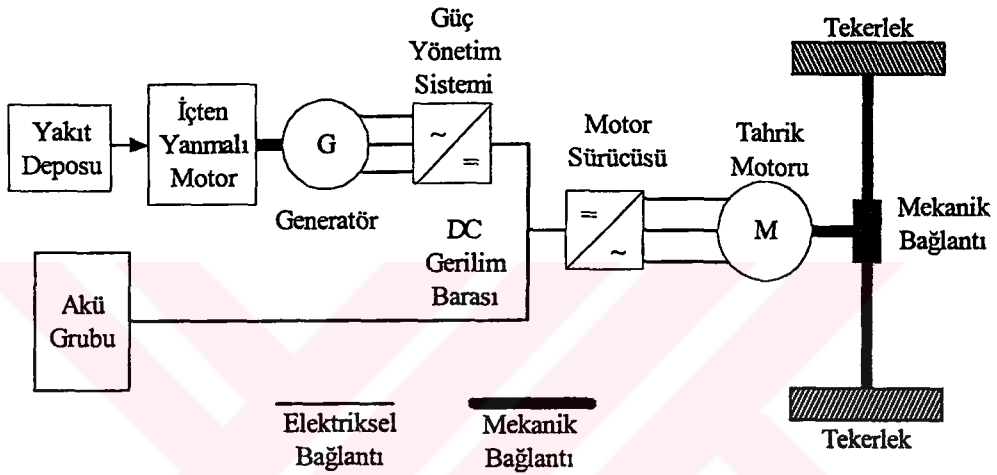
Otomotiv endüstrisinde CAN (Controller Area Network) haberleşme protokolü aşağıda belirtilen üstün özellikleri nedeniyle standart hale gelmiştir.

- Pekçok ucun bulunduğu bir ağda, acil mesajlar beklemeden iletilebilir.
- Ağa bağlı bulunan tüm uçlar aynı anda hattı sürmeye başlayabilir ve öncelikli veri iletme geçirilir.
- Haberleşme hızı düşük hızlı CAN için 125 Kbit/s, yüksek hızlı CAN için 1 Mbits/s'dir.
- CAN protokolü, ağ üzerindeki geçici ve sürekli hataları birbirinden ayırd edebilir. Sürekli hataya yol açan uç ağdan çıkartılarak diğer uçların güvenli bir şekilde haberleşmelerine devam etmeleri sağlanır.
- 8 data byte'ı 15 kontrol biti (CRC) ile korur.

CAN protokolü, Robert Bosch GmbH şirketi tarafından geliştirilmiş ve standardize edilmiştir. CAN ile ilgili daha ayrıntılı bilgiye Bosch tarafında yayımlanmış CAN tanımlama dokümanından ulaşılabilir. [12]

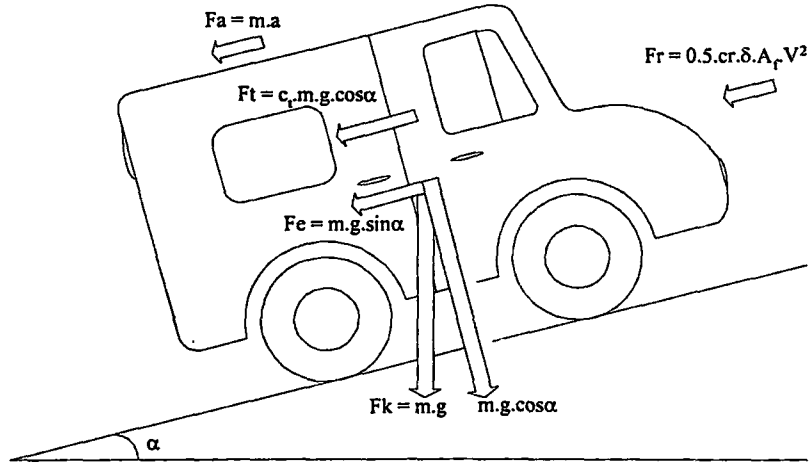
4. SİSTEM TASARIMI

Tezin buradan sonraki bölümü güç sistemi şematik çizimi Şekil 4.1’de görülen bir seri hibrid elektrikli aracın tasarımı ve modellenmesini içerecektir.



Şekil 4.1 Seri hibrid elektrik araç güç sistemi

Elektrikli araç sistem tasarımı öncelikle araca itici gücü verecek olan elektrik motorunun boyutlandırılması ile başlar. Araçtan beklenen performans hedefleri, aracın teknik özellikleri ve yol koşulları, elektrik motoruna uygulanan yükleri belirler.



Şekil 4.2 Araca etkiyen yükler

Şekil 4.2’de bir araca etkiyen kuvvetler gösterilmiştir. Bu kuvvetler tekerlek sürtünme direnci (F_t), eğim direnci (F_e), hava sürtünme direnci (F_r) ve aracın hızlanması için gereken ivmelenme kuvvetidir (F_a).

$$F_t = c_t.m.g.\cos\alpha \quad (4.1)$$

$$F_e = m.g.\sin\alpha \quad (4.2)$$

$$F_r = 0.5.c_r.\delta.A_f.V^2 \quad (4.3)$$

$$F_a = m.dV/dt \quad (4.4)$$

Tablo 4.1 Sabitlerin açıklaması

Değişken	Açıklama	Birim	Değişken	Açıklama	Birim
m	Araç toplam ağırlığı	kg	α	Yol eğimi	°
c_t	Tekerlek sürtünme katsayısı	-	c_r	Hava sürtünme katsayısı	-
g	Yerçekimi ivmesi 9.81	m/s ²	δ	Hava yoğunluğu	
A_f	Araç önyüz alanı	m ²	V	Araç hızı	m/s

F_t , F_e ve F_r motorun sürekli, F_a ise hızlanma süresince var olacak güç ihtiyacının hesaplanmasında kullanılır. Tekerleklerle aktarılması için gereken güç, toplam kuvvetin araç hızı ile çarpılması sonucunda elde edilir (4.8). Tekerleklerle uygulanması gereken toplam momentte, kuvvetin tekerlek yarıçapı ile çarpılmasıyla hesaplanır (4.9).

$$F_s = F_t + F_e + F_r \quad (4.5)$$

$$F_g = F_a \quad (4.6)$$

$$F_{top} = F_s + F_g \quad (4.7)$$

$$P_{top} = F_{top} \cdot V \quad (4.8)$$

$$T_{top} = F_{top} \cdot r \quad (4.9)$$

Tahrik motorunun boyutlandırılmasında aktarma oranı ve verimi hesaba katılır. Otomobillerin transmisyon sistemlerindeki verim kayıpları %10'lar mertebelerindedir. Transmisyon kullanılmaması yani doğrudan sürüş (direct drive) durumunda kayıp %0 olarak alınır.

$$P_m = P_{top} / \mu_{teff} \quad (4.10)$$

$$w_t = V / r \quad (4.11)$$

$$w_r = w_t \cdot GR \quad (4.12)$$

$$T_m = P_m / w_r \quad (4.13)$$

Sivil araç motorlarının maksimum moment değerleri, aracın %10 yokuş tırmanabilmesi koşulu göz önüne alınarak seçilir. Motorun maksimum devri, aracın maksimum hızını belirler.

Hibrid elektrikli araçlarda güç üretim ve enerji depolama sistemleri, tahrik motorunu, soğutma sisteminin ve yardımcı yükleri besleyebilecek şekilde seçilir.

$$P_{ss} = P_{genset} + P_{bat} = P_m / \mu_{meff} + P_c + P_{aux} \quad (4.14)$$

Toplam besleme gücünün, iki kaynak arasında nasıl paylaştırılacağı ve toplam depolanacak enerji miktarı, güç yönetim sisteminin göz önüne alınmasıyla kararlaştırılır. Sessiz sürüş mesafesinin uzun olması istendiği uygulamalarda depolanan enerjinin daha yüksek olması istenir. Diğer uygulama yönteminde ise generatör sistemi ortalama yükleri, enerji depolama sistemi ise kısa süreli tepe yükleri karşılamakta kullanılır. Bu uygulamada depolanan enerji miktarından daha çok enerji depolama sisteminin özgül güç seviyesi (W/kg) önemlidir.

Tasarım ve simülasyon çalışmaları yapılacak olan araca ilişkin çeşitli sabitler tablo 4.2’de belirtilmiştir.

Tablo 4.2 Araç sabitleri

Sabit	Değer	Sabit	Değer
ct	0.01	cw	0.3
δ (km/m ³)	1.17	Af (m ²)	3.1
nt	%90	rw (m)	0.325
mt (kg)	1600	g (m/s ²)	9.81
GR	1.48 x 3.87 (3.Vites x Transmisyon)		

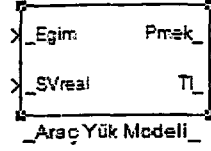
5. MODELLEME

Hibrid elektrikli araçlarda güç sisteminin kurulması, farklı kaynaklar arasında yük paylaşımına yönelik güç yönetim stratejilerinin belirlenmesi ve tasarımın optimizasyonu gibi konuların matematiksel yazılımlar ile incelenmesi önem taşımaktadır. Ancak bugüne kadar geliştirilen elektrikli araç simülasyon paketleri sınırlı özellikler taşımakta ve yazılıma müdahale edilmesine izin vermemekte veya kısıtlamaktadır. Bu simülasyon paketlerinin en gelişmiş olan Advisor, farklı güç yönetim sistemlerinin analizine sınırlı olarak izin vermektedir. Bir diğer önemli eksikliği ise bara gerilimindeki değişimleri dikkate almaması, daha çok güç dağılımlarını incelemesidir.

Geliştirilen modeller ile bir seri hibrid elektrikli araç güç sisteminin elektriksel simülasyonunun yapılması hedeflenmiştir. Ancak simülasyonun alt sistem bazında değil sistem bazında yapılması hedeflendiğinden, simülasyonun çözüm süresinde göz önüne alınarak düşük dereceli veya basitleştirilmiş modellerin kullanılması tercih edilmiştir.

5.1 Araç Dinamiğinin Modellenmesi

Yukarıdaki 1,2,3 ve 4 numaralı eşitlikler kullanılarak tekerlekler üzerine uygulanması gereken kuvvet hesaplanmış ve buna transmisyon kayıpları da eklenmiştir. Tüm kuvvetlerin toplamı 8 numaralı eşitlikte gösterildiği gibi araç hızı ile çarpılarak gereken güç bulunmuş ve tekerlek yarıçapı ve redüksiyon oranı da kullanılarak 13 numaralı eşitlikte belirtildiği gibi motorun karşılaması gereken yük momentine ulaşılmıştır. Modelin çalışabilmesi için gereken sabitlerin dışında, yol eğimi ve araç hızında değişken olarak girilir. Modelin dış yüzeyi ve giriş/çıkış değişkenleri Şekil 5.1 ve Tablo 5.1’de verilmiştir.



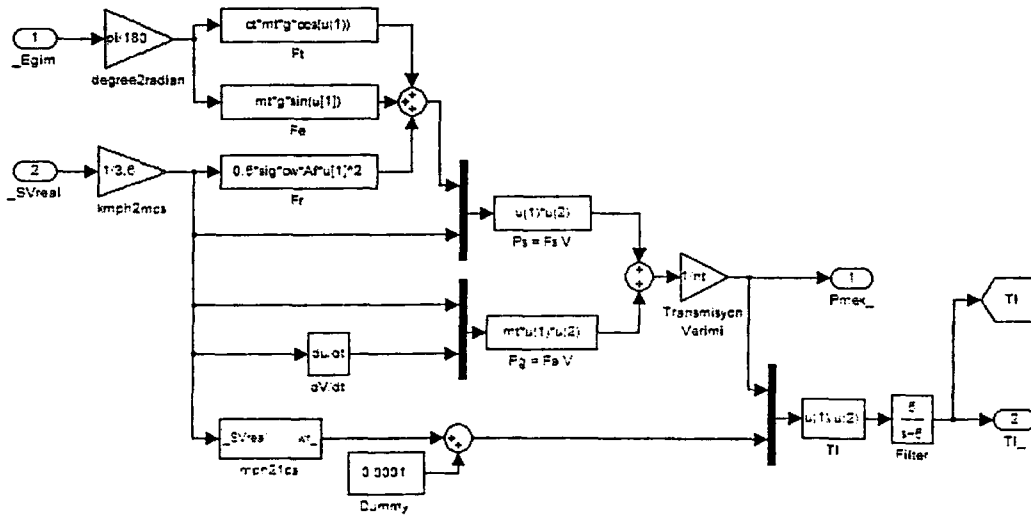
Şekil 5.1 Araç yük modeli

Tablo 5.1 Araç yük modeli giriş ve çıkışları

Giriş		Çıkış	
Egim	Yol Eğimi (°)	Pmek	Mekanik güç (W)
Svreal	Aracın gerçek hızı (km/h)	Tl	Yük momentini (Nm)

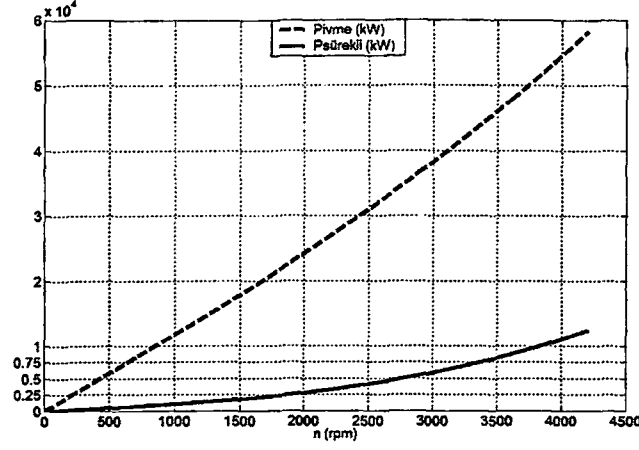
Modelin iç yapısı şekil 5.2’de görülmektedir. Yol eğim girişi önce radyana çevrilerek ilgili bloklara iletilir. Hız girişi ise km/h’ten m/s’ye çevrilerek hava sürtünmesini hesaplayan bloğa gönderilir. Sürekli ve geçici kuvvet değerlerinin toplamının hız ile çarpılmasıyla mekanik güç değerine ulaşılır. Gücün rotor hızına bölünmesi ile motora uygulanan yük momentine ulaşılır. 0’a bölünmeyi engellemek amacıyla çok küçük bir sabit değeri rotor hızına eklenmiştir.

Simülasyon hızının artırılması amacıyla yük momentinin çıkışına bir alçak geçiren filtre eklenmiştir.

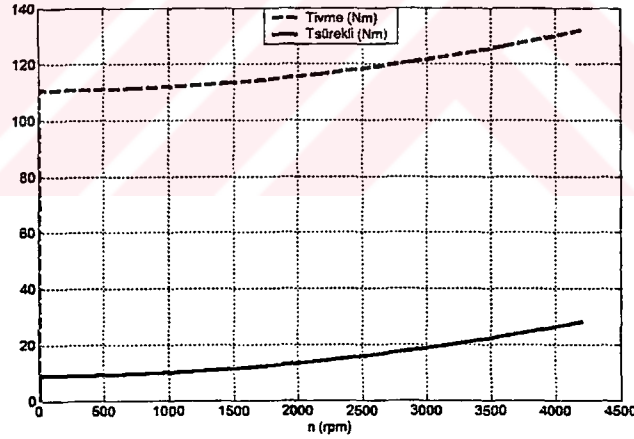


Şekil 5.2 Araç yük modeli içeriği

Araçta kullanılacak motoru seçebilmek için bu modele hız ve eğim girişleri uygulanmış ve motora uygulanacak yüklere ilişkin güç-hız, moment-hız eğrileri belirlenmiştir.



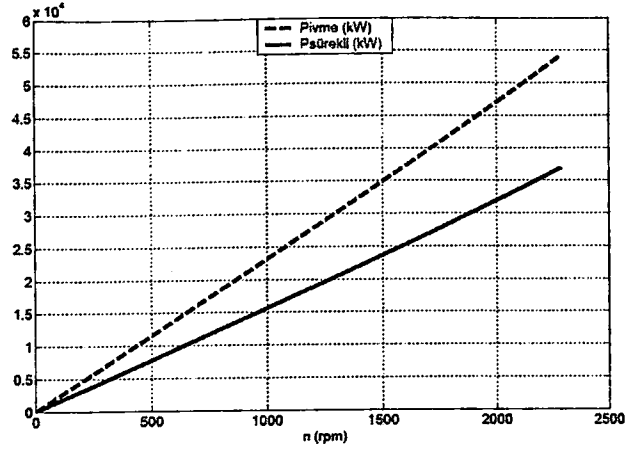
Şekil 5.3 Maksimum hız güç ihtiyacı



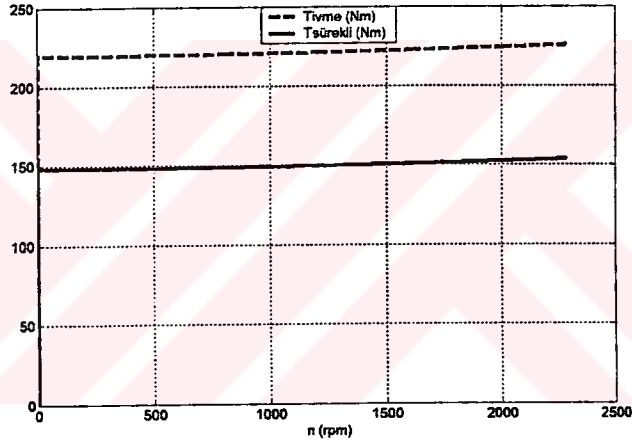
Şekil 5.4 Maksimum hız yük momenti

Düz yolda 0'dan 90 km/h hıza 25 saniyede sabit ivme ile hızlanma koşulu uygulandığında hesaplanan değerlere ilişkin güç-devir ve moment-devir değerleri Şekil 5.3 ce 5.4'te gösterilmiştir. İvmelenme için gereken güç (Pivme) aracın hızlanma sırasında çekeceği gücü, Psabit ise sabit hız sürüşü sırasında gereken gücü göstermektedir.

Aynı model kullanılarak, %10 eğime 0'dan 50 km/h hıza 25 saniyede sabit ivme ile hızlanma hesapları yapılmış ve sonuçlar Şekil 5.5 ve 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.5 Eğimli yol güç gereksinimi

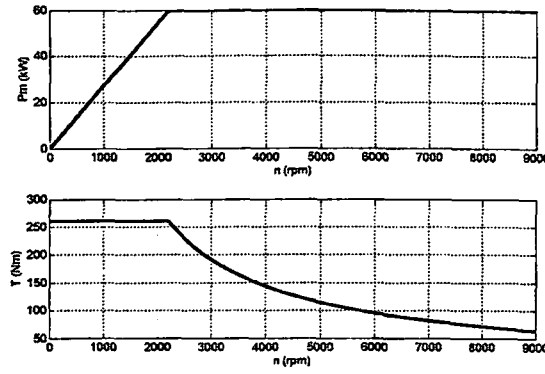


Şekil 5.6 Eğimli yol yük momenti

Bu araç için düşük devirlerde (0-2000 rpm) 250 Nm maksimum moment, 2000-5000 rpm arasında ise 50-60 kW maksimum gücü olan bir motor seçilebilir. Ancak yüklerin hesaplanmasında sabit ivme kullanılması nedeniyle simülasyon sırasında araç performansı daha iyi çıkacaktır. Gerçek araçlarda da 0-30 km/h, 30-60 km/h ivmelenme süreleri birbirinden farklıdır.

5.2 Motor/Kontrolör Modeli

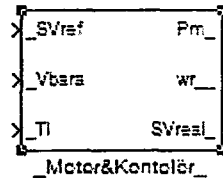
Motorun modellenmesinde yukarıda hesaplanan yükleri karşılayabilecek bir su soğutmalı asenkron motor belirlenmiş ve motora ilişkin eğriler Şekil 5.7'da gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Seçilen motorun eğrileri

Tahrik motoru, sürekli mıknatıs uyarımlı fırçalı dc motor olarak modellenmiştir. Modelin bu şekilde seçilmesi, belirtilen motorun modelleme kolaylığı ve simülasyon süresinin kısaltılmasıdır. Vektör kontrollü ac motorların, kontrolörünün mükemmel olarak çalışması durumunda bu yaklaşımın hatalı olmayacağı daha önce bildirilmiştir. [13]

Motorun alan zayıflatmalı kontrol bölgesi bir look-up tablosu kullanılarak simüle edilmiştir. Motor devrinin baz hızın üzerine çıkmasıyla moment ve endüvi gerilim katsayıları devire bağlı olarak azalmaya başlar.



Şekil 5.8 Motor ve kontrolör modeli

Tahrik motoru aşağıdaki eşitlikler kullanılarak modellenmiştir. Modelin dış yüzeyi ve giriş/çıkış değişkenleri Şekil.5.8 ve Tablo 5.2’de verilmiştir.

$$V_a = E_a + R_i.I_a + L_i.dI_a/dt \quad (5.1)$$

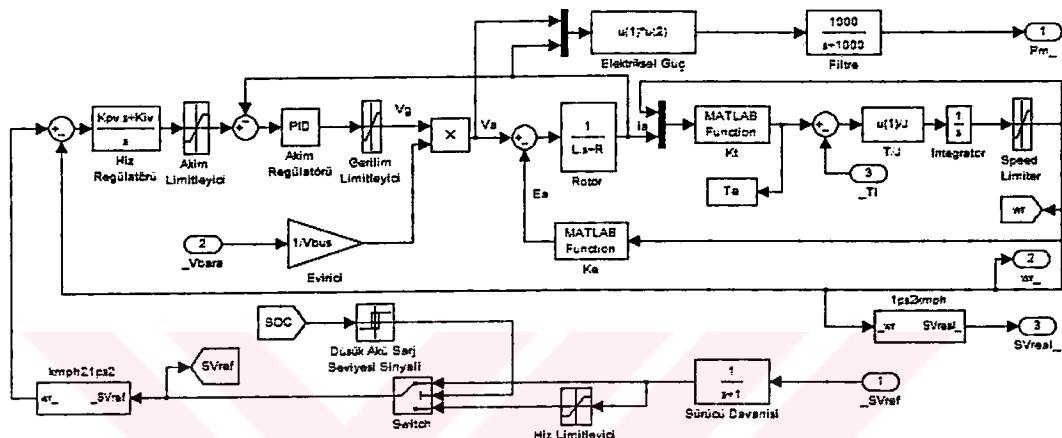
$$E_a = k_e(w_r).w_r \quad (5.2)$$

$$T_e = k_t(w_r).I_a \quad (5.3)$$

$$T_e = J.dw_r/dt + T_l \quad (5.4)$$

Tablo 5.2 Motor ve kontrolör modeli giriş ve çıkışları

Giriş		Çıkış	
SVref	Araç referans hızı (km/h)	Pm	Motorun elektriksel gücü (W)
Vbara	Bara gerilimi (V)	wr	Rotor hızı (1/s)
Tl	Yük momenti (Nm)	SVreal	Aracın gerçek hızı (km/h)



Şekil 5.9 Motor modelinin içeriği

Motor modelinin iç yüzeyi Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Motor modeline girilen hız referansı, öncelikle bir sürücünün davranış biçimini modellemeye yönelik kullanılan alçak geçiren filtreden geçer. Hız referansı ve rotor hızı arasındaki hız hatası, hız regülatörüne girerek akım referansını oluşturur. Maksimum rotor akım değeri ile sınırlandırılmış akım referansı ve akım geri beslemesi arasındaki fark son olarak gerilim limitleyiciye girerek, rotora uygulanması gereken gerilim değeri belirlenir.

Bara gerilimindeki dalgalanmaların motor kontrolörüne yansması basit bir yaklaşım ile modellenmiştir. Vbus olarak girilmiş olan değer evirici nominal gerilimini temsil etmektedir. Bara geriliminin bu değeri aşması durumunda rotora uygulanan ortalama gerilim artar ve oluşan hız hatası sonucunda V_g azalarak rotora uygulanan gerilim uygun değere düşer. Aksi durumda V_g arttırılarak istenilen hız değerine ulaşılır.

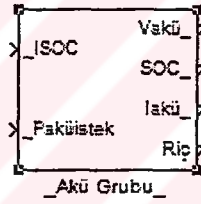
Akü şarj seviyesi belirlenen kritik değere ulaştığında hız limitleyici devreye girerek, GÜS'nin aynı zamanda akü grubunu şarj edilmesi sağlanır. Rotora uygulanan gerilimin akım ile çarpılmasıyla elde edilen güç değeri, 1 KHz'lik alçak geçiren filtreden geçirilerek çıkışa verilmiştir.

Araç yük modeli tarafından hesaplanan yük momenti motor modeline yük olarak girilir. Son olarak rotor hızı, transmisyon oranları da dikkate alınarak km/h'e çevrilir.

5.3 Akü Grubu Modeli

Akü, şarj durumu, güç yönü ve yüke göre değişen bir gerilim kaynağı ve iç direnç olarak modellenmiştir (Şekil 5.10 – Tablo 5.3). Model içerisinde kullanılan look-up tabloları için veriler Matlab tabanlı bir elektrikli araç analiz programı olan Advisor'dan alınmıştır.

Model birbirine seri olarak bağlanmış 25 adet 12 V, 55 Ah'lık akülerden oluşturulmuştur. Bara gerilimi bir akü için limit şarj gerilim değeri olan $25 \times 15 \text{ V} = 375 \text{ V}$ ile sınırlandırılmıştır.

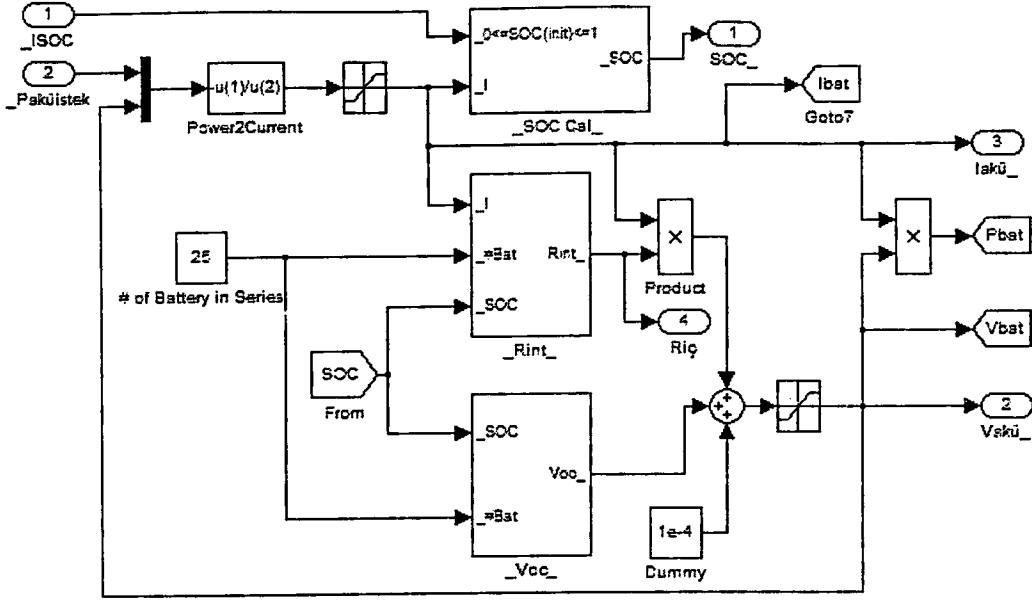


Şekil 5.10 Akü grubu modeli

Tablo 5.3 Akü grubu modeli giriş ve çıkışları

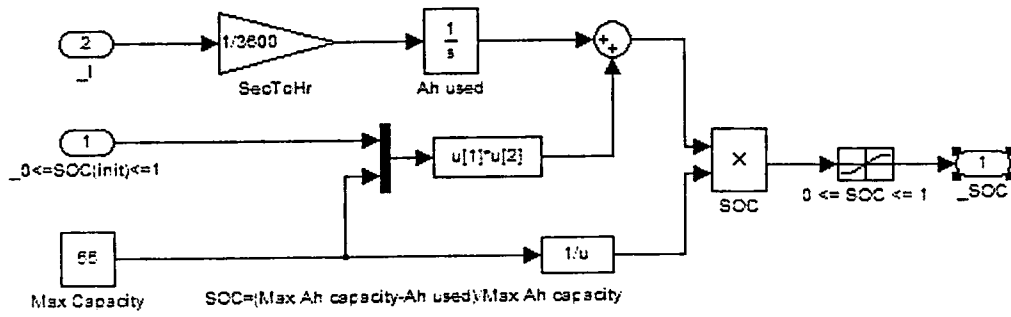
Input		Output	
ISOC	Akü başlangıç şarj durumu	SOC	Akü şarj durumu
Paküistek	Aküden istenen güç (W)	Vakü	Akü gerilimi (V)
		Iakü_	Akü akımı (A)
		Riç_	Akü iç direnci (ohm)

Akü grubu modelinin içeriği şekil 5.11'de gösterilmiştir. Model, şarj durumunu hesaplama, iç direnç ve açık devre gerilimi alt bloklarından oluşmaktadır. Birbirine seri bağlı akü sayısı ve başlangıç şarj seviyesi değiştirilebilmektedir.



Şekil 5.11 Akü grubu modeli içeriği

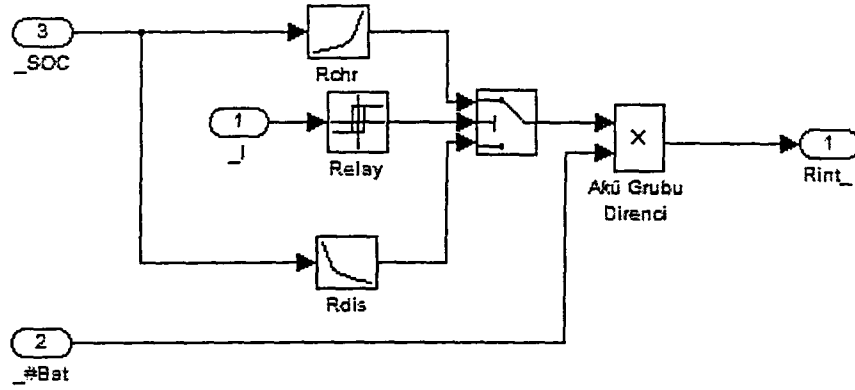
Şarj durumunu hesaplayan blok Şekil 5.12’de görülmektedir. Akünün kapasitesi bir sabit ile değiştirilebilmektedir. Akü akımı 2 numaralı girişten modele girdikten sonra, saatte kullanılan akıma çevrilir ve entegrali alınarak toplam kapasite ile farkı alınır. Negatif akım değeri aküyü deşarj, pozitif akım değeri ise şarj eder. Farkın toplam kapasiteye bölünmesi ile şarj durumuna ulaşılır.



Şekil 5.12 Akü şarj durumunu hesaplayan blok

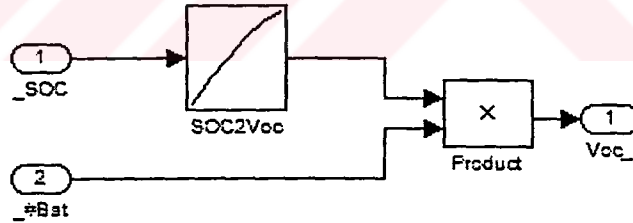
Akü iç direnci, akımın yönüne ve şarj durumuna göre değişmektedir (Şekil 5.13). Modelde kullanılan look-up tabloları için veriler Advisor programından alınmıştır. Bir anahtar modeli ile akünün şarj veya deşarjı sırasında akü iç direnci SOC’a bağlı olarak alınır. Aküden çekilen akımın çok küçük negatif ve pozitif değerlerde değişmesi halinde, modelde kullanılan anahtar bloğu hangi direnç değerini

okuyacağına karar vermekte zorlanmakta ve simülasyonun yavaşlamasına hatta durmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bir röle bloğu ile histerisiz çalışma bölgesi modellenmiştir. Toplam akü sayısı ile çarpılan iç direnç çıkışa toplam akü grubu direnci olarak iletilir.



Şekil 5.13 Akü grubu iç direncini hesaplayan blok

Akü grubu açık devre gerilimi de akü şarj durumuna göre değişmektedir ve kullanılan look-up tablosu için veriler Advisor'dan alınmıştır (Şekil 5.14).



Şekil 5.14 Akü grubu açık devre gerilimini hesaplayan blok

Son olarak akü açık devre gerilimine, iç direnç üzerindeki gerilim düşümünü eklenerek akü uç gerilimine ulaşılır.

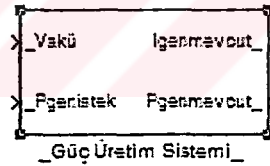
5.4 Güç Üretim Sistemi Modeli

Simülasyonu yapılacak araçta GÜS olarak genset kullanılacaktır. Genset'in oluşturulmasında İYM ve generatör güç-devir eğrilerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. İYM ve generatör çalışma hızlarının birbirine uymaması durumunda

uygun redüksiyon oranı seçilerek sisteme eklenir. Elektrikli araç uygulamalarında generatörün çalışma bölgesi sabit güç bölgesi olarak seçilir ve hız belirli devirler arasında sabit tutulur.

Simülasyonda kullanılmak üzere 15 kW gücünde bir generatör seçilmiştir. Ancak modelin içerisinde generatör ve İYM dinamiklerine yer verilmemiştir. Güç yönetim sisteminin, generatörün nominal gücünden daha fazla yüklenmesine izin vermeyeceği ve çalışma devrinin sabit güç bölgesi olacağı kabul edilirse geçici haller dışında gerilim çökmesi yaşanmayacaktır. Yüklenmeler sırasında İYM hızının düşmesi nedeniyle oluşacak gerilim düşmelerinin, generatör kontrolörünün elektriksel zaman sabitinin mekanik zaman sabitinden çok daha küçük olması nedeniyle kompanze edileceği öngörülmüştür.

Belirtilen nedenlerle güç üretim sistemi modeli sadece bir giriş/çıkış olarak modellenmiştir (Şekil 5.15 – Tablo 5.4). Generatör kontrolörünün, çıkış gerilimini güç yönetim sistemi tarafından belirlenen akü şarj veya deşarj uç gerilimine uygun olarak kontrol edebildiği kabul edilmiştir.

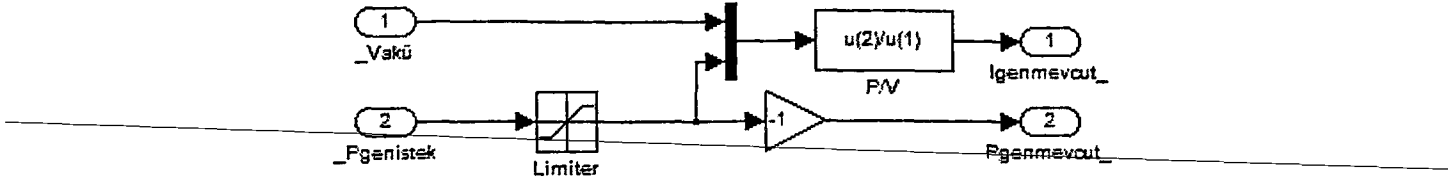


Şekil 5.15 Güç üretim sistemi modeli

Tablo 5.4 Güç üretim sistemi modeli giriş ve çıkışları

Input		Output	
Vakü	Akü gerilimi (V)	Pgenmevcut	Generatör çıkış gücü (W)
Pgenistek	Generatörden istenen güç (W)	Igenmevcut	Generatör çıkış akımı (A)

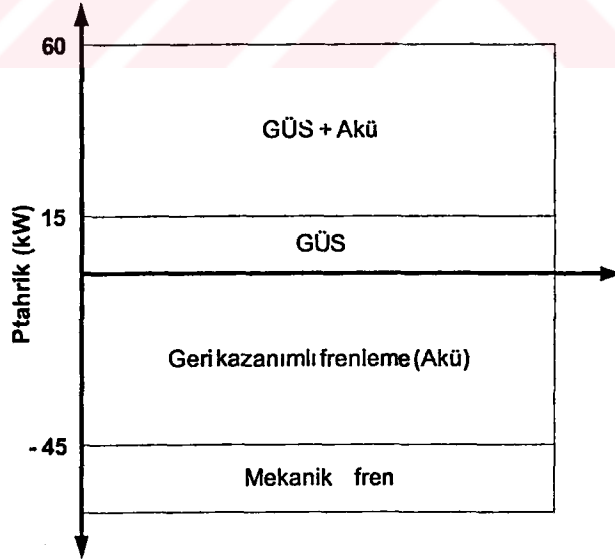
GÜS modelinin içeriği Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Generatörün baraya beslediği akım, generatör gücünün bara gerilimine bölünmesi ile bulunur.



Şekil 5.16 GÜS modeli içeriği

5.5 Güç Yönetim Sistemi

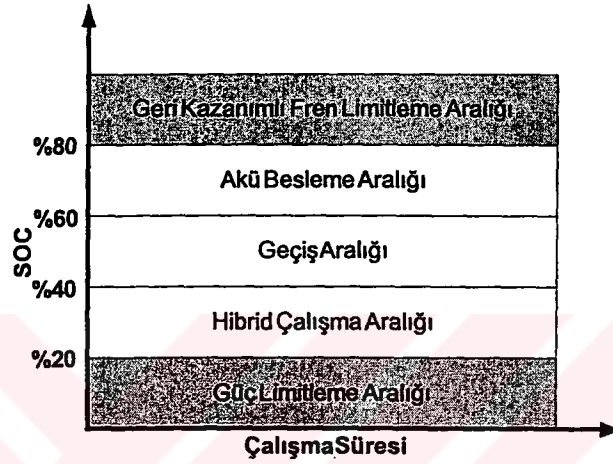
Seri hibrid araçlarda güç yönetim sisteminin kurulmasında iki temel yöntemden söz edilmektedir [14,15]. Bunlardan birincisi güç destek (power assist) olarak adlandırılan metottur. Bu yöntemde güç üretim sistemi ana güç kaynağı olarak seçilir ve bazı özel durumlar dışında sürekli devrede kalır. Güç ihtiyacının generatörün gücünü aşması durumunda akü grubu devreye girerek generatörü destekler. Akü şarj seviyesinin belirlenen düzeyin üzerine çıkması durumunda generatör kapatılır. Şekil 5.17’de güç destek güç yönetim sistemine ilişkin bir örnek verilmiştir.



Şekil 5.17 Örnek güç destek güç yönetim sistemi

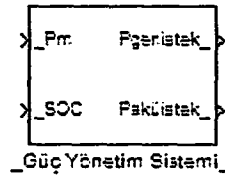
Diğer yöntem yumuşak hibrid (soft hybrid) olarak adlandırılır. Bu yöntemde akü grubu şarj seviyesi çeşitli çalışma bantlarına ayrılır. Şekil 5.18’de yumuşak hibrid çalışma bantlarına ilişkin bir örnek verilmiştir. Tanımlanan minimum şarj seviyesine

inildiğinde, örnekte %40, GÜS devreye girer. GÜS'nin gücünün aküleri şarj etmeye yeterli olmaması durumunda her iki kaynak ta barayı besler. Şarj seviyesi daha da azalırsa, güç limitleme moduna geçilerek maksimum hız sınırlanır. Akü şarj seviyesi %60'a ulaştığında GÜS kapatılarak akü besleme moduna geçilir. Yokuş aşağı sürüş sırasında akü şarj seviyesi %60'ın üzerine çıkabilir. Bu durumda, belirlenen bir seviyeye ulaşıldığında geri kazanımlı frenleme devre dışı bırakılır veya limitlenir.



Şekil 5.18 Örnek yumuşak hibrid güç yönetim sistemi

Güç yönetim sistemi modeli, tüm sistemi kontrol eden ana kontrolör konumundadır. Her iki yönetim sistemine ilişkin güç yönetim sistemi modeli geliştirilmiştir (Şekil 5.19 – Tablo 5.5). Model, tahrik gücü ve akü şarj durumunu izleyerek, generatör ve aküden istenen gücü belirler.

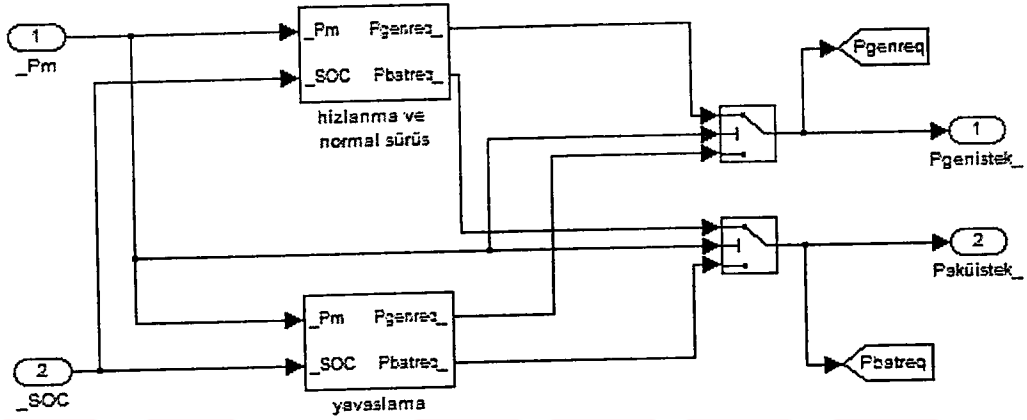


Şekil 5.19 Güç yönetim sistemi modeli

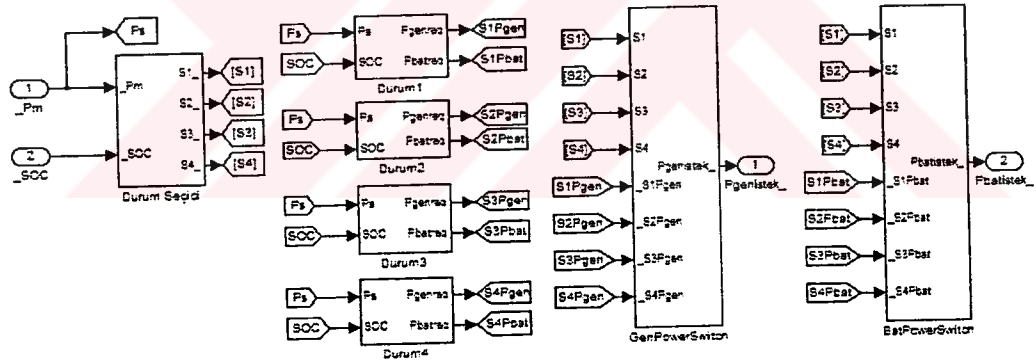
Tablo 5.5 Güç yönetim sistemi modeli giriş ve çıkışları

Input		Output	
Pss	Besleme sisteminden istenen güç (W)	Paküistek	Aküden istenen güç (W)
SOC	Akü şarj durumu	Pgenistek	Generatörden istenen güç (W)

Şekil 5.20, 5.21 ve 5.22’de güç destek güç yönetim sistemi modelinin içeriği görülmektedir. Güç yönetim sistemi modeli hızlanma ve normal sürüş ve yavaşlama alt bloklarından oluşmaktadır. Bu iki blok arasındaki seçim gücün yönüne göre yapılmaktadır.

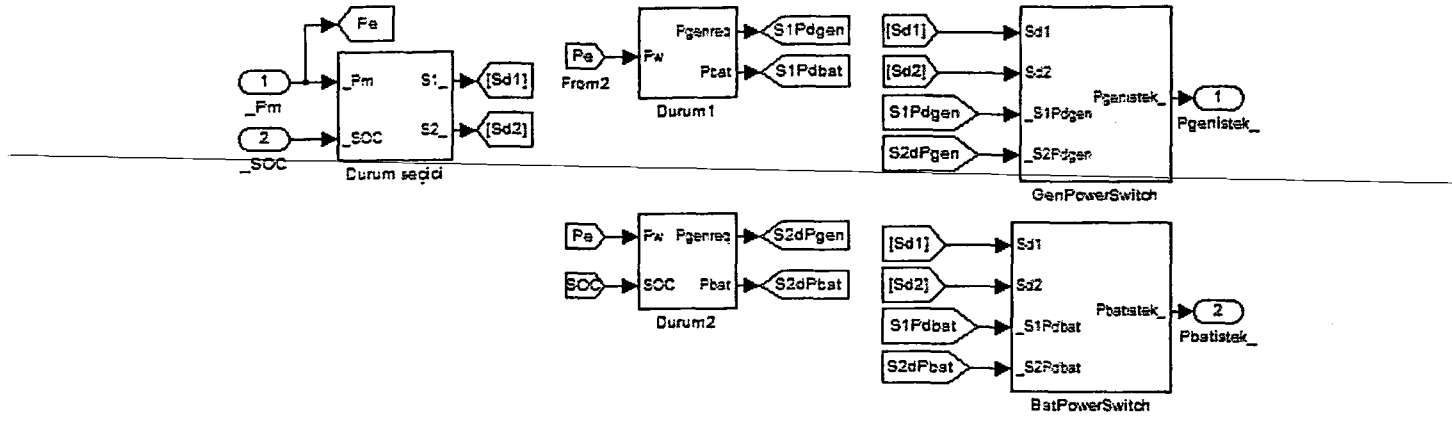


Şekil 5.20 Güç yönetim sistemi içeriği



Şekil 5.21 Hızlanma ve normal sürüş bloğu

Hızlanma ve normal sürüş bloğu ve yavaşlama bloğu çeşitli alt bloklardan oluşmaktadır. Durum seçici bloğu, tanımlanmış durumlardan hangisinin uygulanacağını seçer ve anahtarlama bloklarına (GenPowerSwitch ve BatPowerSwitch) gönderir. Durum bloklarında belirlenmiş olan batarya ve generatör güç seviyelerinden seçimi yapılan güç seviyeleri çıkışa iletilir. Durum bloklarına ilişkin mantıksal seçim kriterleri Tablo 5.6 ve 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.22 Yavaşlama bloğu

Tablo 5.6 Hızlanma ve normal sürüş mantıksal durumları

Mantıksal Durumlar	Girişler		Çıkışlar		Açıklama
	Pm(kW)	SOC	Pgenistek	Pbatistek	
Durum1	≤ 15	≥ 0.8	Pm	0	Ortalama güç
Durum2	≤ 15	< 0.8	Pm+Pbat	SOC $\rightarrow$ Look up tablosu $\rightarrow$ Pbat	Akü şarj
Durum3	> 15	≥ 0.2	15	Pm-15	Güç destek
Durum4	> 15		15	0	Hız limitleme

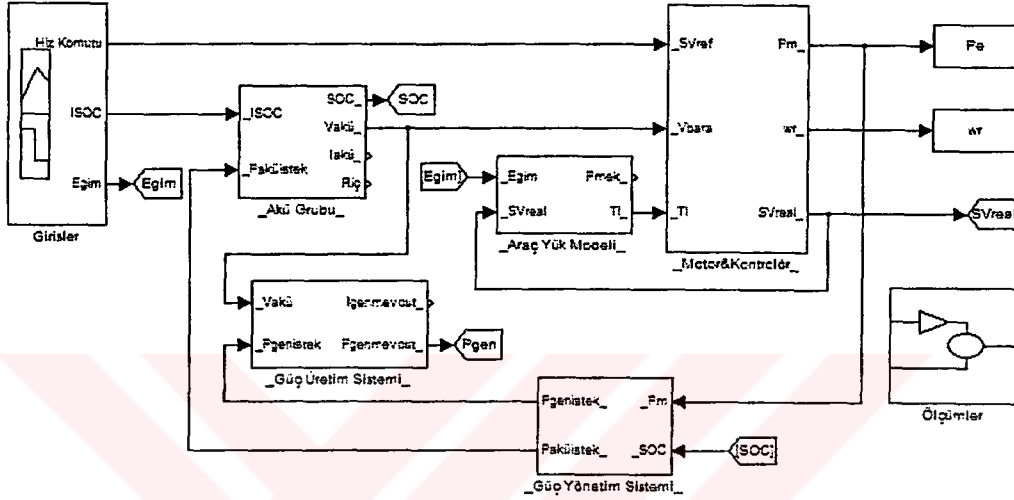
Tablo 5.7 Hızlanma ve normal sürüş mantıksal durumları

Mantıksal Durumlar	Girişler		Çıkışlar		Açıklama
	Pm (kW)	SOC	Pgenistek	Pbatistek	
Durum1	< 0	≥ 0.99	0	0	Mekanik frenleme veya frenleme dirençleri
Durum2	< 0	< 0.99	0	SOC $\rightarrow$ Look up tablosu $\rightarrow$ Pbat	Geri kazanımlı frenleme ve frenleme dirençleri

Yumuşak hibrid güç yönetim sistemi modelide benzer şekilde akü şarj durumu ve motor güç ihtiyacını izleyerek, akü şarj seviyesini %40-%60 aralığında tutmaya çalışır.

Tüm alt sistemlere ilişkin Matlab/Simulink modelleri Ek D Modelleme CD'sinde verilmiştir.

6. SİMÜLASYON



Şekil 6.1 Tüm modellerin entegrasyonu

Geliştirilen modellerin, tanımlanan giriş ve çıkışlarının uygun bir biçimde birbirlerine iliştilmeleri ile seri hibrid elektrikli araca ilişkin sistem modeli tamamlanmıştır. Simülasyonun koşturulabilmesi için EK C’de verilen bir Matlab .m dosyası çalıştırılarak sabit değerler yaratılır. Farklı araç türlerinin simülasyonu bu dosya içerisindeki sabitlerin değiştirilmesi ile gerçekleştirilebilir.

Modeli geliştirilen araç, daha önce tanımlanmış olan her iki güç yönetim sistemi ile iki farklı sürüş çevriminde simüle edilmiştir. Akü grubu başlangıç şarj seviyesi tüm simülasyonlarda %75 olarak alınmıştır.

Sürüş çevrimlerinden birisi ABD Federal test prosedürü FTP-75’in şehir içi sürüş çevrimi olan şehir içi dinamometre sürüş programıdır (UDDS). UDDS sürüş çevrimi kullanılarak yapılan simülasyon sonuçlarına ilişkin grafikler çizdirilerek EK A’da verilmiştir.

Diğer sürüş çevrimi ise ABD FTP otoyol sürüş çevrimi olan US06'dır. US06 sürüş çevrimi kullanılarak yapılan simülasyon sonuçlarına ilişkin grafikler de çizdirilerek EK B'de verilmiştir.

6.1 Şehir İçi Sürüş Çevrim Simülasyonu Sonuçlarının Tartışılması

Şehir içi sürüş çevriminin güç destek güç yönetim sistemi ile simülasyonunun sonuçları Şekil A1,A2 ve A3'te gösterilmiştir. Sürüş çevrimi boyunca, motor gücü genellikle sürekli güç seviyesinin altında kalmıştır. Bu durum motor seçimi açısından önem taşımaktadır. Araçlar için motor güçleri maksimum yüklere göre seçilmesine rağmen, ancak hızlanma ve yokuş yukarı tırmanma sırasında bu yüklerle karşılaşmaktadır. Dolayısıyla elektrikli araçlar için seçilen tahrik motorlarının anlık güç seviyesinin sürekli güç seviyesinin 2-4 katı kadar olması, verim ve araç ağırlığı açısından önem taşımaktadır.

Akü grubu çok kısa süreler için devreye girmiş ve simülasyon sonunda akü şarj seviyesi başlangıç şarj seviyesinin üzerine çıkmıştır. SHEA'ların şehir içi kullanımlarında güç akışının, güç destek güç yönetim sistemi ile kontrolünün anlamlı olmadığı, aracın gereğinden fazla depolanmış enerji taşımakta olduğu anlaşılmaktadır. Daha yüksek güçlerle şarj edilebilen, daha hafif akülerin kullanımı güç sisteminin optimize edilmesine katkıda bulunacaktır.

Aynı sürüş çevriminin yumuşak hibrid güç yönetim sistemi ile kontrolüne ilişkin grafikler Şekil A4,A5 ve A6'da verilmiştir. Bu sürüş çevriminde barayı akü grubu beslemiş, GÜS'i devreye girmemiştir. 23 dakikalık sürüş çevriminde araç yaklaşık olarak 12 km yol almış ve akü şarj seviyesi % 8 oranında azalmıştır. Sürüş çevrimi boyunca motor gücünün genellikle 20 kW'ın altında kaldığında göz önünde bulundurulduğunda, 15 kW'lık GÜS'nin akü şarj seviyesini istenen aralıklarda tutmayı başarabileceği anlaşılmaktadır.

Simülasyon sonuçlarına göre, tanımlanmış olan araca ilişkin şehir içi sürüş çevriminde yumuşak hibrid güç yönetim sisteminin kullanılmasının daha uygun olacağı görülmüştür.

6.2 Otoyol Sürüş Çevrim Simülasyonu Sonuçlarının Tartışılması

Otoyol sürüş çevriminin güç destek güç yönetim sistemi ile simülasyonunun sonuçları Şekil B1,B2 ve B3'te gösterilmiştir. Bu sürüş çevriminde tahrik motorunun daha zorlu çalışma şartlarına maruz kaldığı görülmüştür. Öte yandan bara gerilimi 290-360 V arasında dalgalanmıştır. Yaklaşık 25 km'lik sürüş çevrimi sonucunda akü şarj seviyesi % 15 oranında azalmıştır.

Aynı sürüş çevriminin yumuşak hibrid güç yönetim sistemi ile kontrolüne ilişkin grafikler Şekil B4,B5 ve B6'da verilmiştir. Yumuşak hibrid güç yönetim sistemi kontrolünde, akü şarj seviyesi 25 km'lik sürüş sonunda % 35 oranında azalmıştır. Bara geriliminin ise 250-360 V arasında değiştiği görülmüştür.

Daha uzun bir otoyol sürüş çevrimi uygulanması durumunda, otoyol güç ihtiyacının daha fazla olması yumuşak hibrid yönetim biçimi ile şarj seviyesini istenen aralıkta tutulamamasına neden olacaktır. Bara geriliminin oldukça düşmesi çekilen akımın ve dolayısıyla ısı kayıplarının artmasına neden olur.

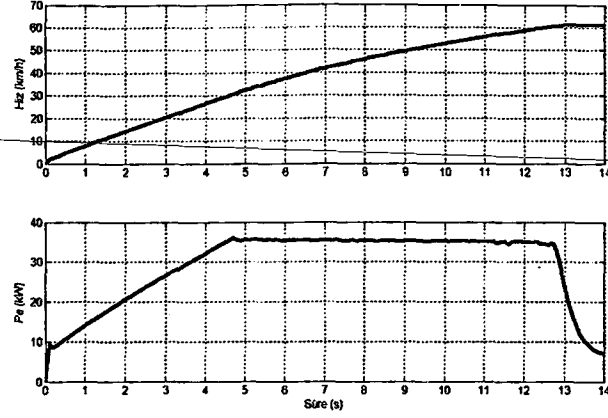
SHEA'nın otoyol sürüş çevriminde güç akışının, güç destek yönetim sistemi ile sağlanması gerektiği görülmüştür.

6.3 Geliştirilen Modelin Deneysel Sonuçlar ile Karşılaştırması

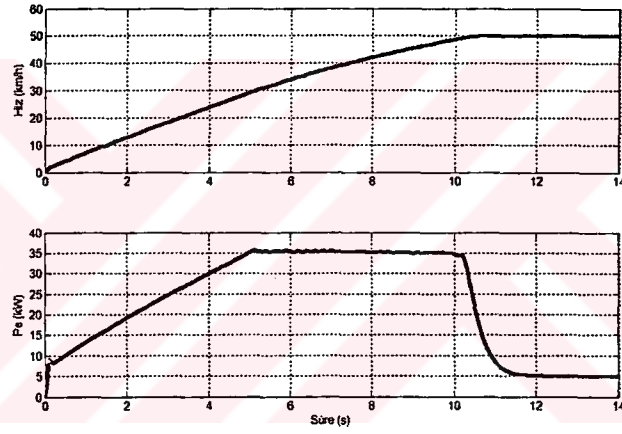
Daha önce geliştirilmiş olan bir seri hibrid elektrikli araç prototipinin elektrikli versiyon performans testleri, laboratuvar şartlarında dinamometre üzerinde yapılmıştır.

Yapılan 0-60 km/h hızlanma testi sonucunda araç 0'dan 60 km/h hıza 14.4 saniyede çıkmıştır. Aynı araca ilişkin yapılan simülasyonun sonucunda aracın ivmelenme süresi 13 s olarak bulunmuştur (Şekil 6.2).

Dinamometre üzerinde prototip 50 km/h hızla sürülmüş ve menzil testi yapılmıştır. 50 km/h sabit hızda giderken tahrik motoru 5.9 kW güç çekmiştir. 50 km/h sabit hız simülasyonu sonucunda sabit hızda tahrik motorunun 5 kW güç çektiği görülmüştür (Şekil 6.3).



Şekil 6.2 Ptototip Araç 0-60 km/h hızlanma simülasyonu



Şekil 6.3 50 km/h sabit hız sürüş simülasyonu

Simülasyon sonuçları dinamometre test sonuçlarıyla bire bir örtüşmemekle birlikte yakın sonuçlar vermiştir. Testler ve simülasyon sonuçları arasında %10-15 oranında fark mevcuttur. Bu farkın, transmisyon ve elektrik motoru verimlerinin tahmini değerler olarak girilmesinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Bir diğer neden de araç test ağırlığının EURO 3 Emisyon Standardına göre belirlenmiş olması ve bu ağırlık değerinin de gerçek araç ağırlığından fazla olmasıdır.

Aracın hibrid versiyonu üzerinde yeterli veri olmadığından karşılaştırma yapılamamıştır.

SONUÇ

Bu tez çalışmasında elektrikli araç teknolojileri tanımlanmış ve bir seri hibrid elektrikli araca ilişkin tasarım ve modelleme çalışmaları yürütülmüştür.

Var olan elektrikli araç simülasyon programları, elektriksel sistemin davranışını göz ardı etmekte ve programa dışarıdan müdahale etmeye sınırlı olarak izin vermektedir. Geliştirilen Matlab/Simulink modelleri tamamen esnektir. Tüm alt sistemlerin verileri değiştirilebilir veya volan, yakıt pili gibi farklı alt sistemlerin modelleri sisteme entegre edilebilir. Yeni geliştirilecek güç yönetim sistemi modelleri kolaylıkla simülasyon ortamında denenebilir.

Yapılan simülasyonlar sırasında modele yalnızca hız referansı girilmesine rağmen farklı yol koşullarında, eğim, asfalt, patika v.b., simülasyon yapılması olanağı mevcuttur.

Geliştirilen model ile 3 farklı çalışma yapmak mümkündür;

- Tasarlanan araca ilişkin performans simülasyonları
- Güç sisteminin optimize edilmesi
- Güç yönetim sistemi stratejilerinin geliştirilmesi

Farklı sürüş çevrimlerinde iki farklı güç yönetim sistemi ile tasarlanan araç simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları, aracın kullanım amacının, besleme sistemi tasarımı ve güç yönetim sistemi stratejisinin belirlenmesinde öneme sahip olduğunu göstermiştir. Şehir içi sürüş ve şehirler arası sürüş gereksinimlerinin birbirinden farklı olduğu ortaya konulmuştur.

Son olarak, bir prototipe ilişkin deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Gelecekte, simülasyonda kullanılan alt sistem modellerinin daha gerçekçi modeller ile değiştirilmesi, simülasyona ısıl yönetim sisteminin ve içten yanmalı motor emisyon değerlerindeki eklenmesi ile seri hibrid elektrikli araçların tasarım ve analizine yönelik tam bir simülasyon ortamının geliştirilmesi hedeflenmektedir.



KAYNAKLAR

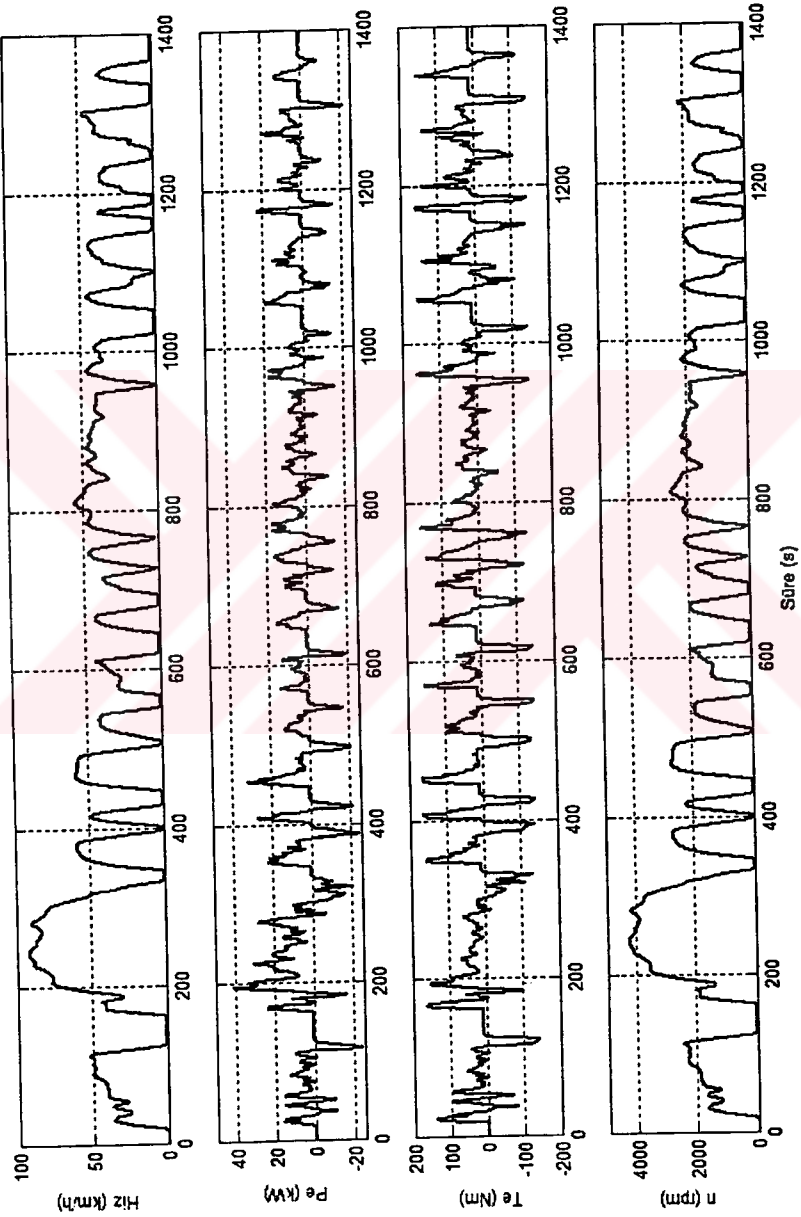
- [1] Van den Bossche, P., Van Mierlo, J., Maggetto, G., 2002, Energy Sources for Hybrid electric Vehicles: Comparative Evaluation of The State of The Art, *AECV conference*, Noordwijkerhout/The NETHERLANDS
- [2] Andersson, C., 2001, Observations on Electric Hybrid Bus Design, *Licentiate Thesis*, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, Lund, Sweden
- [3] Chan C.C ve Chau K.T., 2001, Modern Electric Vehicle Technology, Oxford University Press, New York
- [4] Uçarol H., 2003, Karma Elektrikli Araç, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, İ.T.Ü., İstanbul
- [5] Chan, C.C., 2002. The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles, *Proceedings of the IEEE*, 90, 247-275
- [6] Husain, I., 2003, Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals, CRC Press, Florida
- [7] Field Oriented Control of 3-Phase AC-Motors, 1998, Texas Instruments Europe, www.ti.com
- [8] Ünlü, N., Karahan, Ş., Tür, O., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A., Turhan, L., Akgün, F., Tırıs, M., 2003, Elektrikli Araçlar, TÜBİTAK Yayınları, Gebze/Kocaeli
- [9] Yazar, A., Tunçay, R.N., Uçarol, H., Tür, O., Kiraz, H., 2002. ELİT-1 Elektrikli Araç Projesi Sonuç Raporu, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, Gebze, Kocaeli, Türkiye

- [10] **Fleming F.A., Schumard P., Dickinson B.**, 1999, Rapid Recharge Capability of Valve-Regulated Lead-Acid Batteries for Electric Vehicle and Hybrid Electric Vehicle Applications, *Journal of Power Sources*, Elsevier Science, 78, 237-243
-
- [11] **Ehret Ch., Piller S., Schroer W., Jossen A.**, “State of Charge Determination for Lead-Acid Batteries in PV-Applications”
- [12] “Bosch CAN Specification Version 2.0”, www.bosch.com
- [13] **Song, S.H., Jeong, S.J., Min, B.M., No, T.S., Ham, Y.Y., Lee, K.H., Kim, C.S.**, 2002, Modelling and Control of Coupled Engine and Generator System, Electric Vehicle Symposium 19, Busan/KOREA, October
- [14] **Barsali, S., Pasquali, M., Pede, G.**, 2002, Definition of an Energy Management Technique for Series Hybrid Vehicles, Electric Vehicle Symposium 19, Busan/KOREA, October
- [15] **Lee, Y.K., Jung, J.H.**, 2002, Optimal Power Distribution Strategy for Series Hybrid Electric Vehicle Using Diesel Engine and Battery System, Electric Vehicle Symposium 19, Busan/KOREA, October

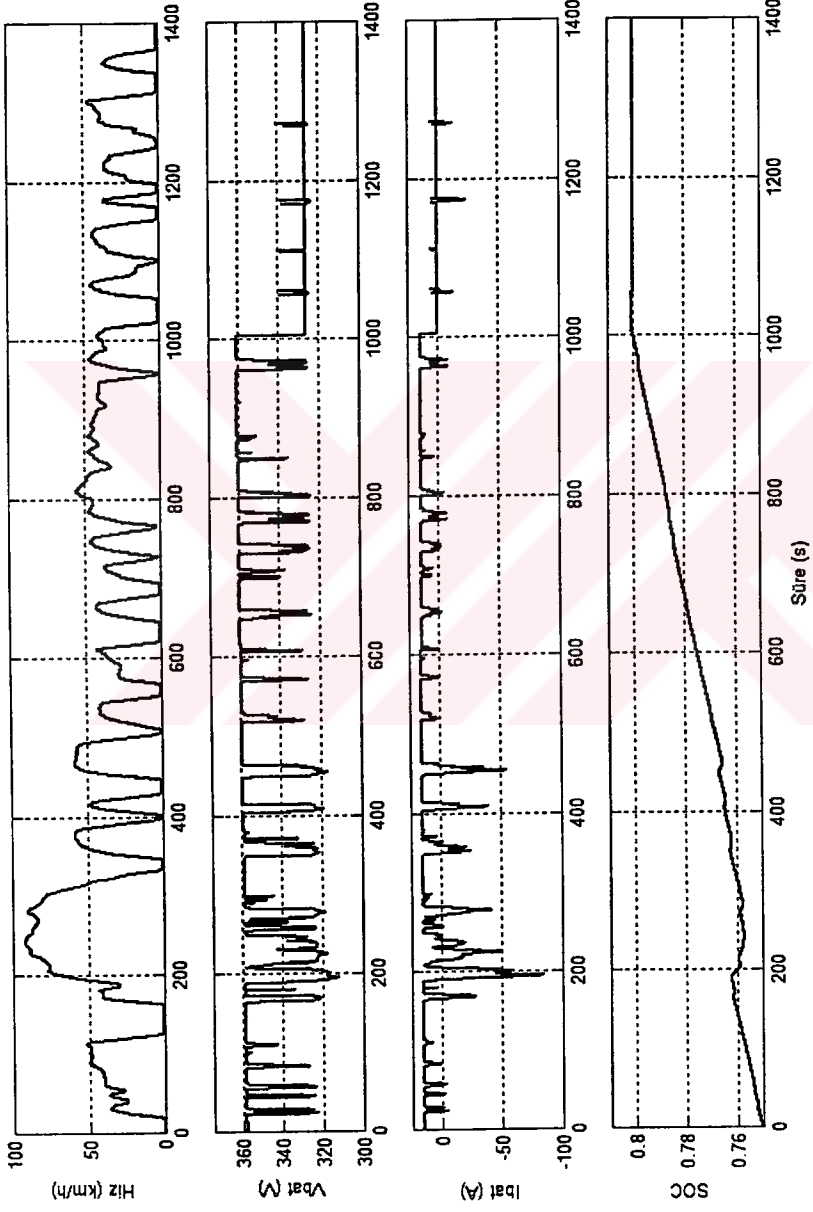
EK A UDDS ŞEHİR İÇİ SÜRÜŞ ÇEVİRİMİ SONUÇLARI



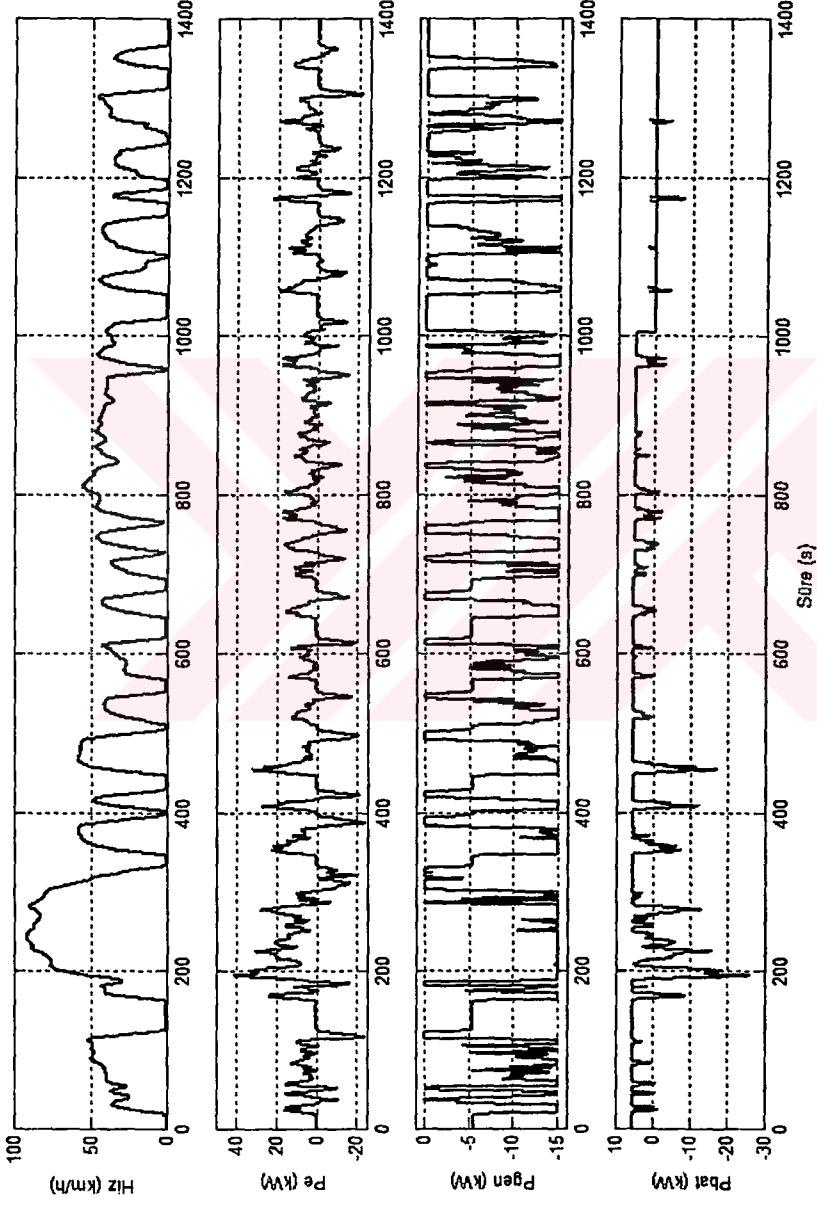
a1) Güç Destek



Şekil A. 1 UDDS güç destek motor sonuçları

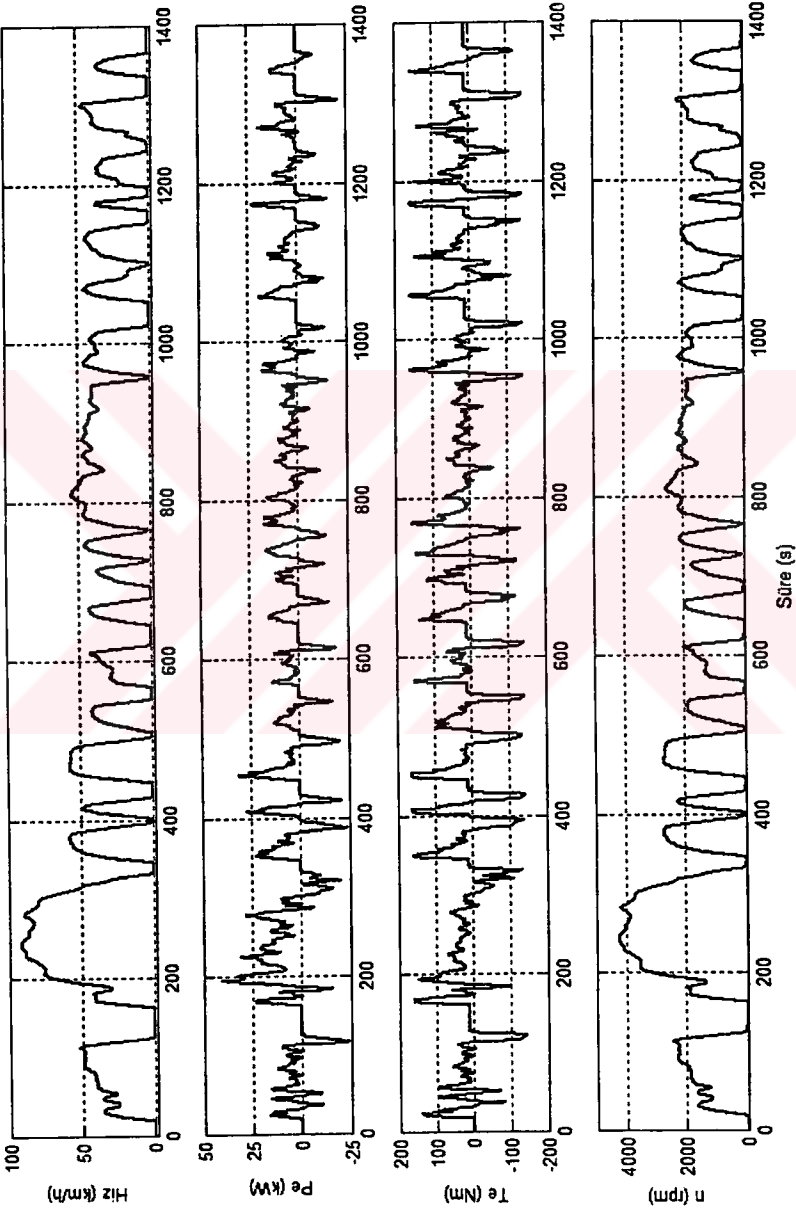


Şekil A. 2 UDDS güç destek akü sonuçları

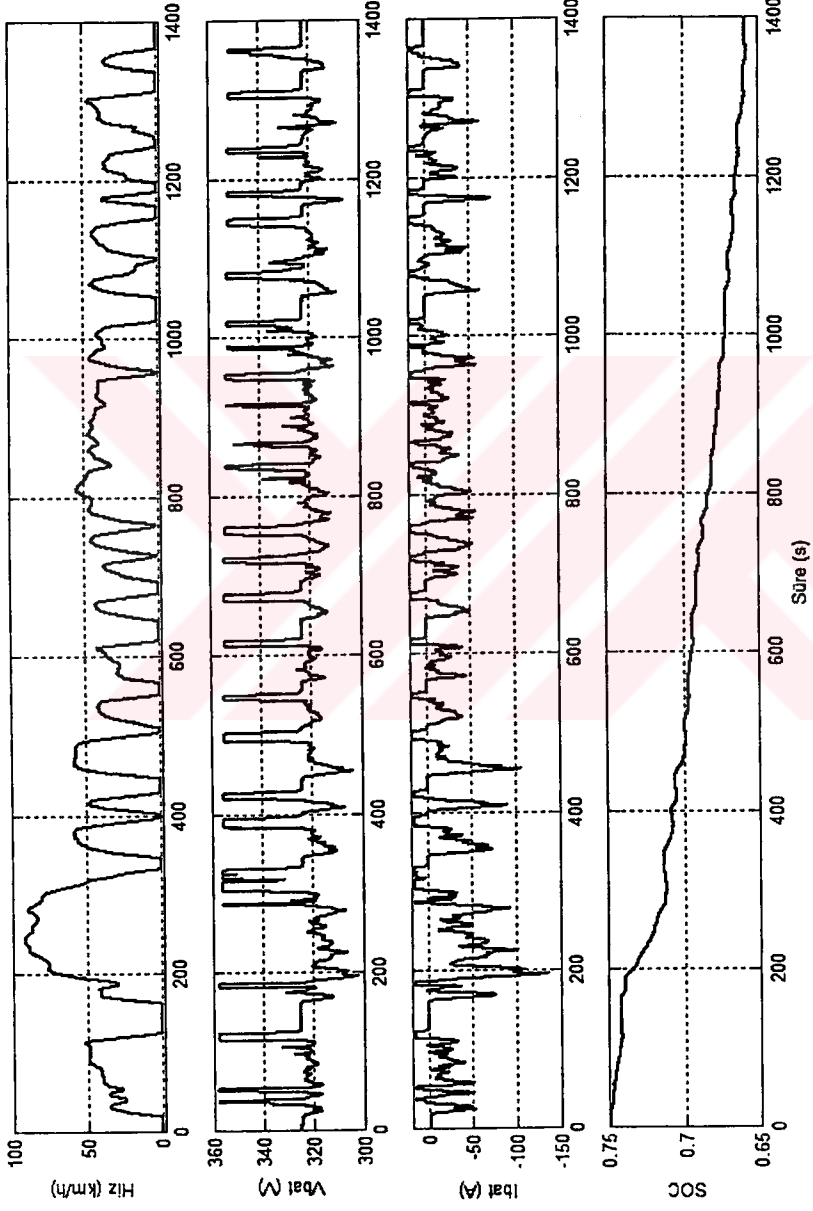


Şekil A. 3 UDDS güç destek besleme sistemi sonuçları

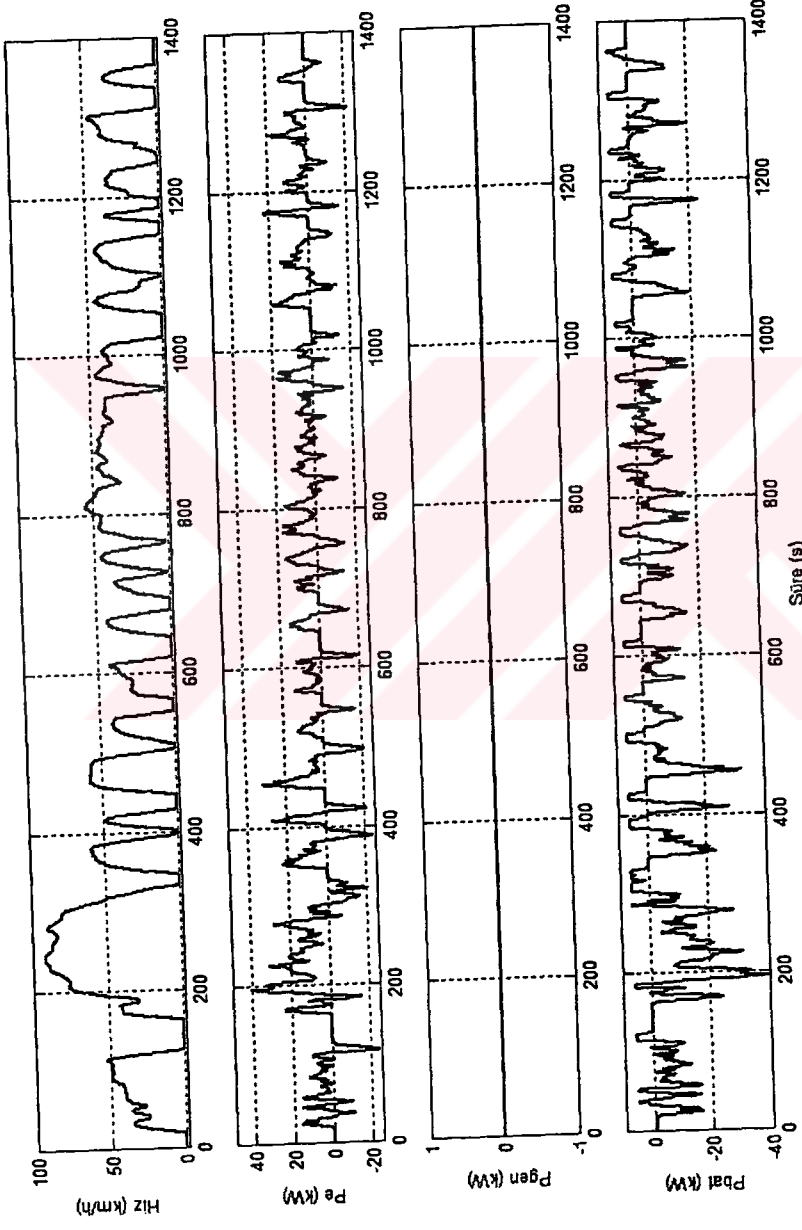
a2) Yumuşak Hibrid



Şekil A. 4 UDDS yumuşak hibrid motor sonuçları



Şekil A. 5 UDDS yumuşak hibrid akü sonuçları

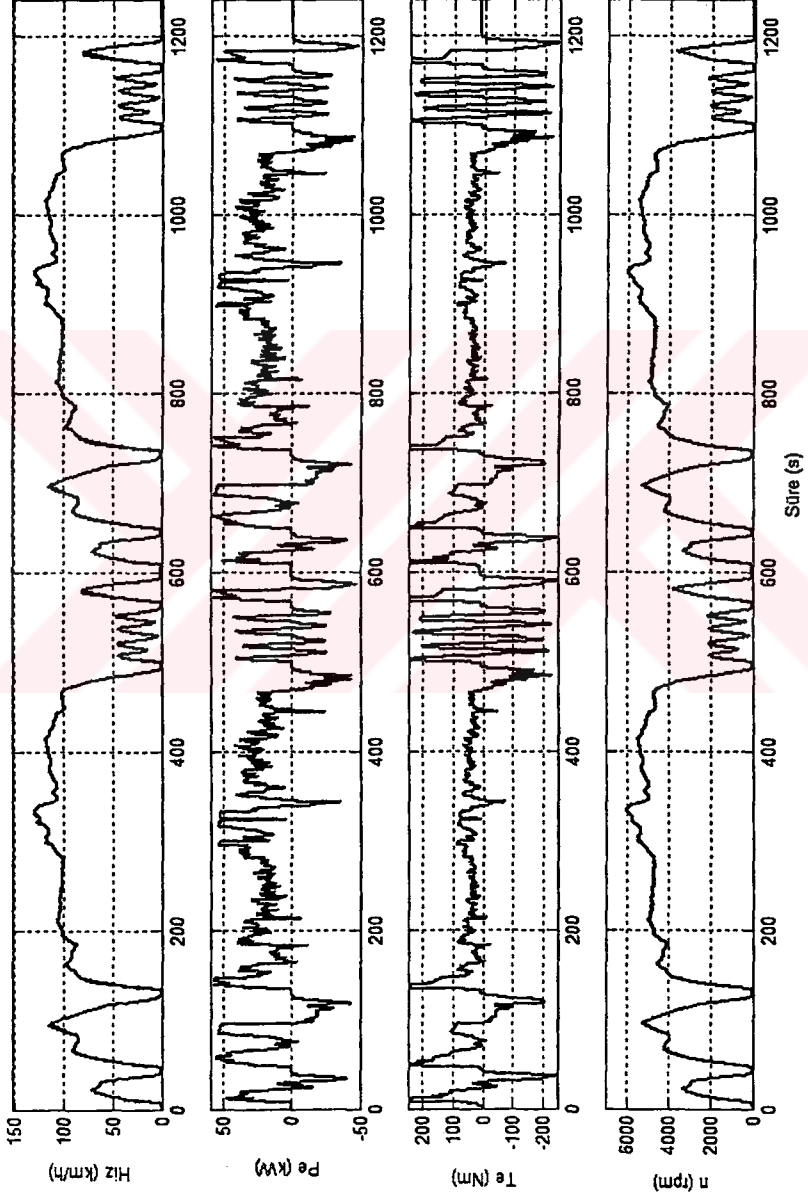


Şekil A. 6 UDDS yumuşak hibrid besleme sistemi sonuçları

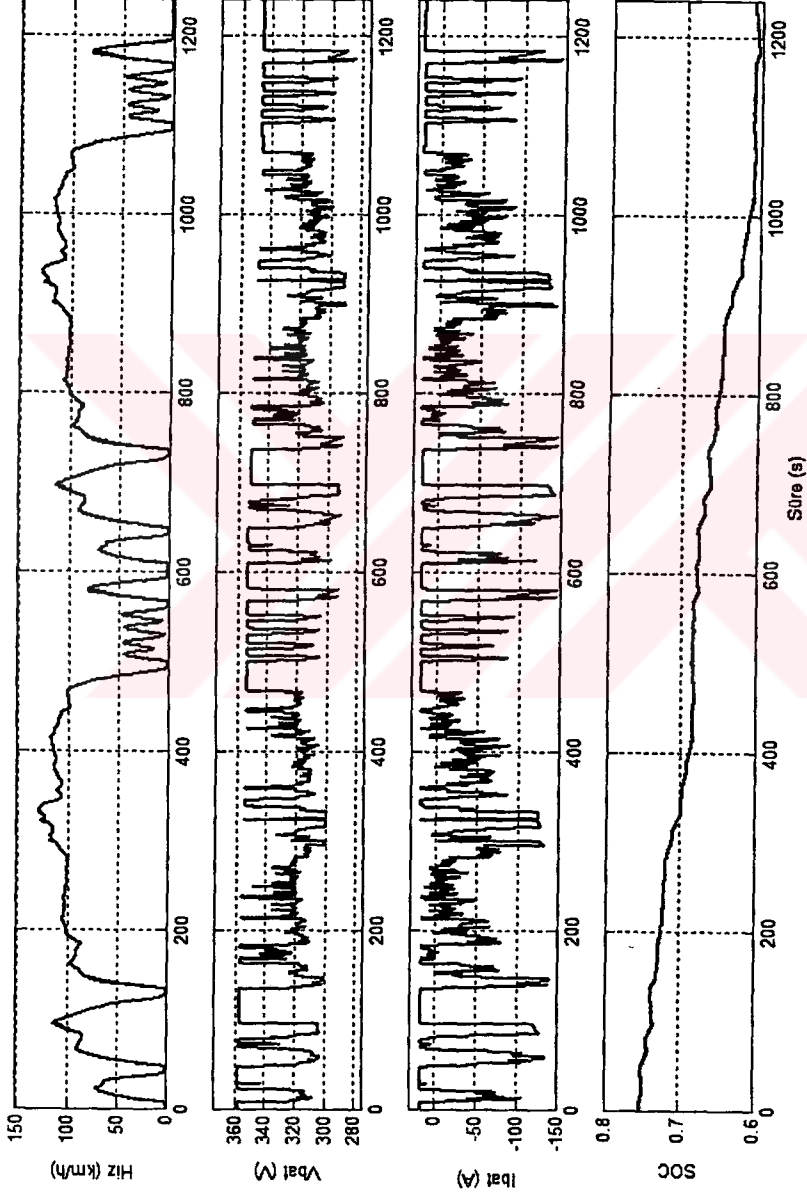
EK B US06 OTOYOL SÜRÜŞ ÇEVİRİMİ SONUÇLARI



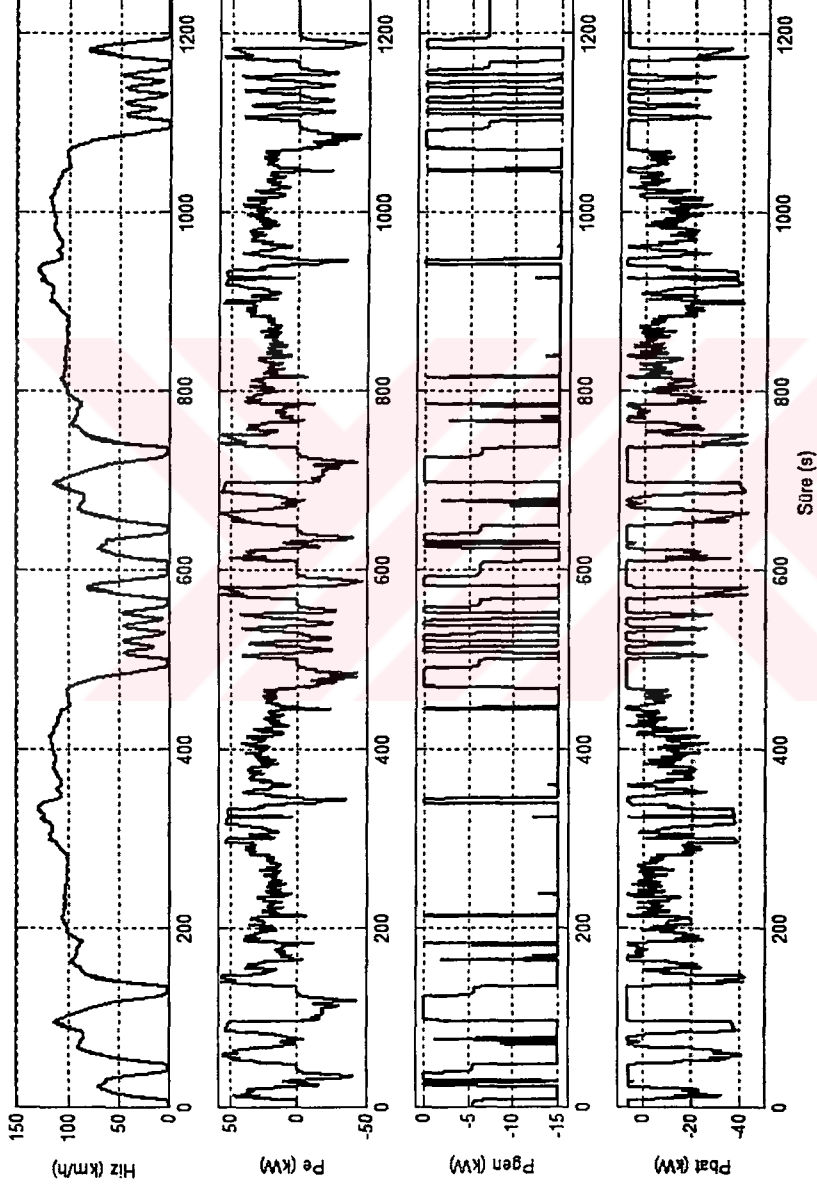
b1) Güç Destek



Şekil B. 1 US06 güç destek motor sonuçları

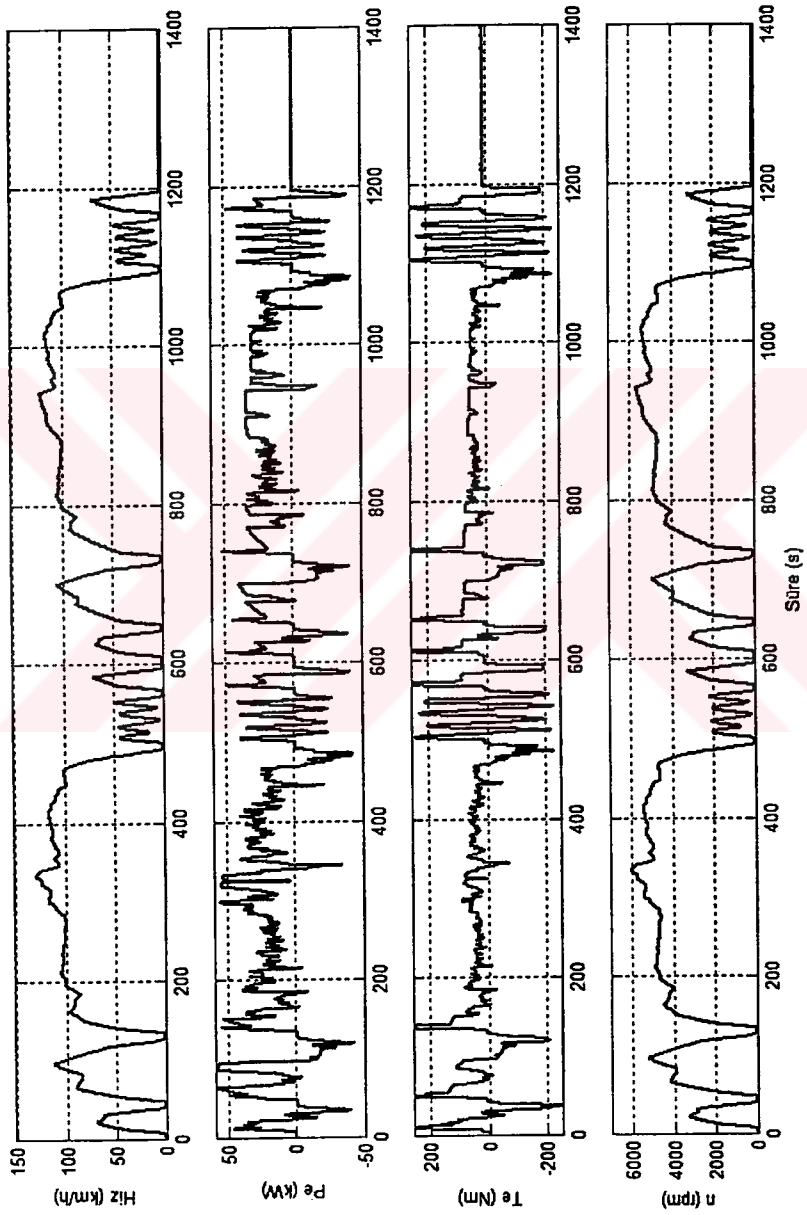


Şekil B. 2 US06 güç destek aktı sonuçları

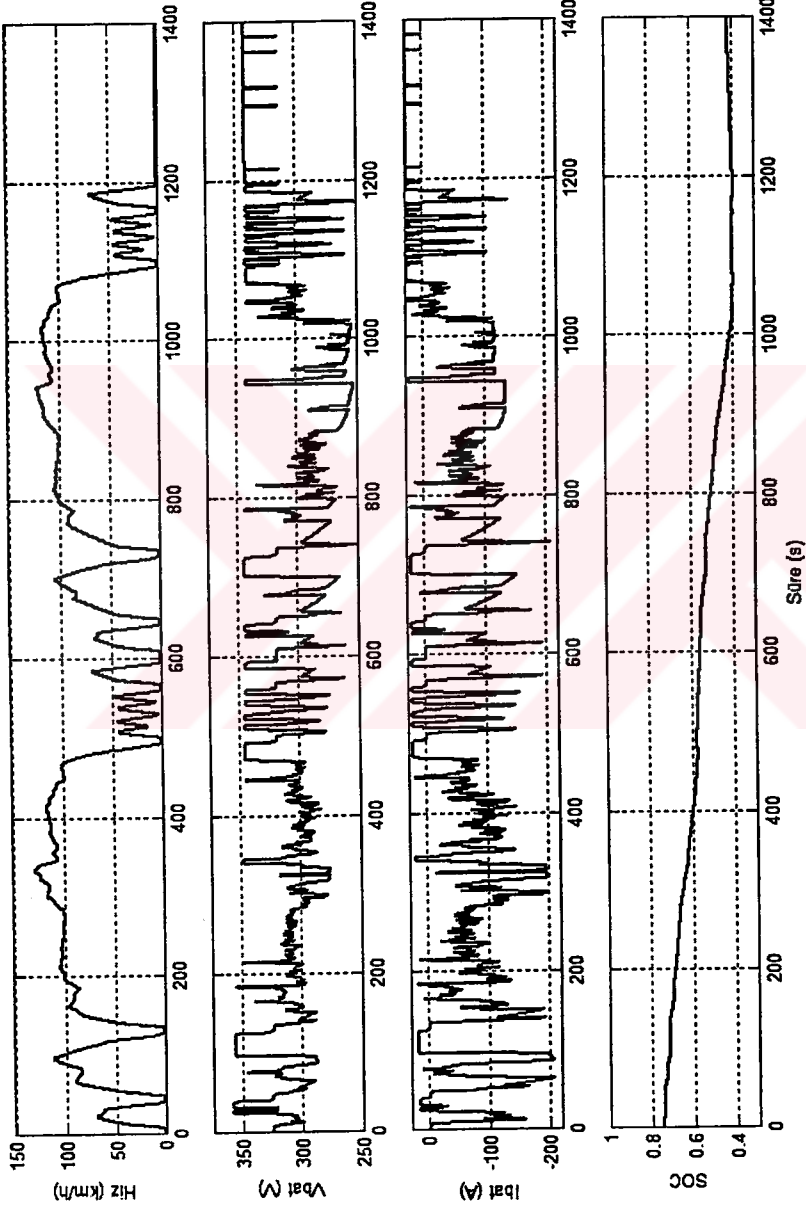


Şekil B. 3 US06 güç destek besleme sistemi sonuçları

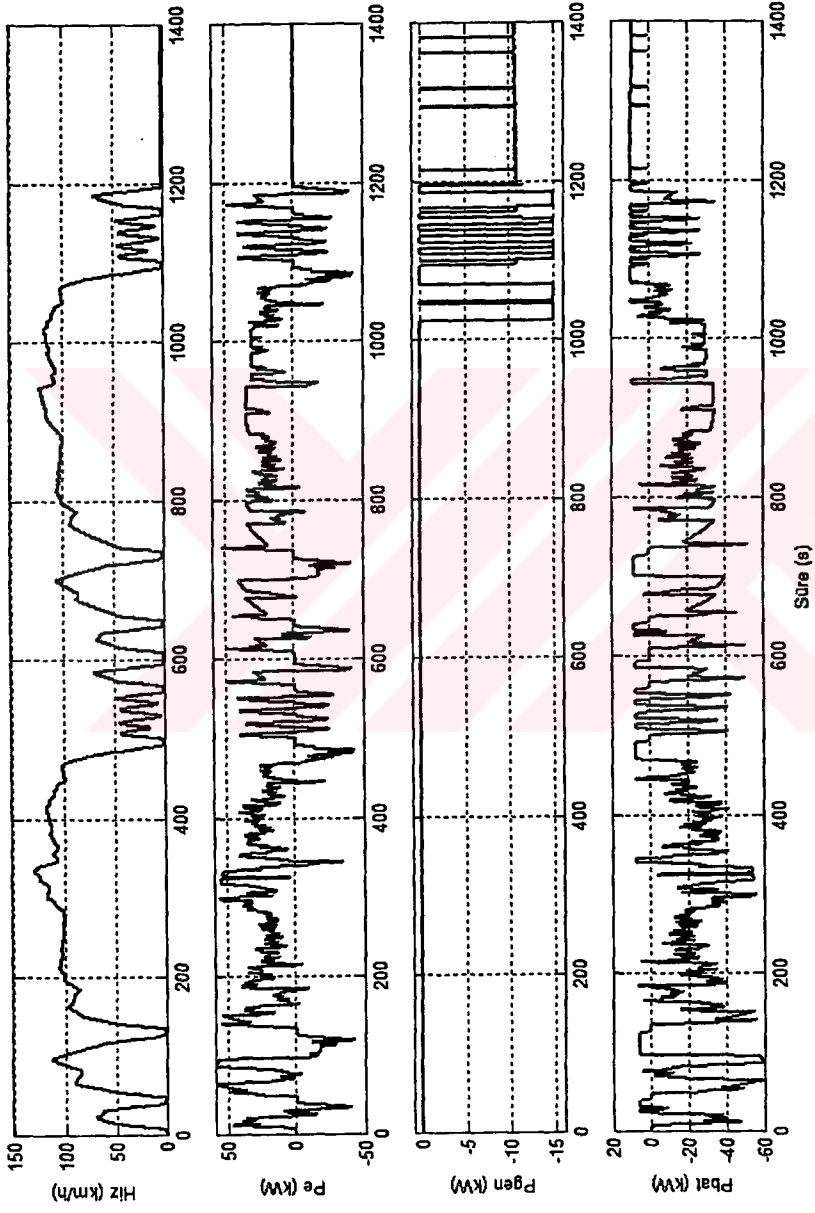
b2) Yumuşak Hibrid



Şekil B. 4 US06 yumuşak hibrid motor sonuçları



Şekil B. 5 US06 yumuşak hibrid akü sonuçları



Şekil B. 6 US06 yumuşak hibrid besleme sistemi sonuçları

EKC SİMÜLASYON SABİTLERİ

Sabitler.m

%Araca İlişkin Parametreler

ct = 0.01; % Yuvarlanma sürtünme katsayısı
sig = 1.17; % hava yoğunluğu (kg/m³)
cw = 0.3; % rüzgar sürtünme katsayısı
Af = 3.1; % araç ön yüzey alanı (m²)
nt = 0.90; % transmisyon verimi
rw = 0.325; % tekerlek yarıçapı
g = 9.81;
mt = 1600; %Araç toplam ağırlığı

%Elektrik Motoruna İlişkin Parametreler

w1 = 230; %baz hızı
w2 = 942; %maksimum hız
wnom = w2;
nmeff = 0.80; % motor verimi
Vnom = 250;
Inom = 249.17;
R = 0.1; % Endüvi sargı direnci (ohm)
J = 0.1; % Motorun eylemsizliği (kg.m²)
L = 4.7e-2; Endüvi sargı endüktansı (H)

%Elektriksel Degerler

Vbus = 300; %Nominal bara gerilimi

%Vites Kutusu Oranları

GR = 1.48 * 3.87; % 3.vites x transmisyon

%Kontrolör Parametreleri

%Hız regülatörü

Kpv = 200;
Kiv = 0.1;

%Akım regülatörü

Kdc = 0;
Kpc = 8;
Kic = 0.05;

ÖZGEÇMİŞ

Okan TÜR 1977 yılında Balıkesir’de doğdu. Lise öğrenimini Karşıyaka / İzmir Lisesi’nde tamamladıktan sonra 1995 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’ne girdi. 2001 yılında Elektrik Mühendisi ünvanı ile mezun oldu ve aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği bölümünde yüksek lisans programına başladı. 2001 yılından beri TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü’nde Araştırmacı olarak görev yapmaktadır.

