

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

HİBRİT ARAÇLARDA ELEKTRİK MOTORU DENETİMİ

YUNUS DEMİRCİ

EYLÜL 2010

Elektrik-Elektronik Anabilim Dalında Yunus Demirci tarafından hazırlanan
HİBRİT ARAÇLARDA ELEKTRİK MOTORU DENETİMİ adlı Yüksek Lisans
Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylım.

Doç Dr. Ediz POLAT
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine
getirdiğini onaylım.

Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Murat LÜY _____

Üye (Danışman) : Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ _____

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tolga EREN _____

22 / 09 / 2010

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek
Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Burak BİRGÖREN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

HİBRİT ARAÇLARDA ELEKTRİK MOTORU DENETİMİ

DEMİRCİ, Yunus

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ

Eylül 2010, 74 Sayfa

Otomotiv teknolojilerinde enerjinin verimli kullanılabilirliği ve temiz enerji kaynakları arayışları paralelinde, hibrit elektrikli araçlara olan ilgi hızlı bir şekilde artmıştır. Bölgenin yol koşulları incelenerek uygun sistem yapılandırması seçilirse, hibrit elektrikli araçlar konvansiyonel araçlara göre yakıt tüketimi ve emisyon değerleri bakımından daha başarılı olmaktadır.

Bu tezde, hibrit bir aracın elektrik motorunun MATLAB ortamında modelleme ve denetimi yapılarak, hibrit ve yalnız içten yanmalı motorlu çalışmalardaki yakıt tüketimlerinin simülasyon sonuçlarına göre karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Tezde ön bilgi olarak hibrit araçların tarihçesi, genel hibrit yapıları ve seri üretimi yapılan bazı hibrit araçlar, elektrik motorları, batarya modelleri ve hibrit araçlardaki transmisyon sistemleri özetlenmiştir. Asıl çalışmada ise model olarak içten yanmalı motor ve elektrik motorunun aynı şaftı paralel olarak sürdüğü bir sistem ele alınmıştır. Batarya olarak Li-ion batarya, elektrik motoru olarak da bir asenkron motor kullanılmıştır. Jeneratör olarak başka makine kullanılmamış, aynı asenkron motor jeneratör modunda çalıştırılarak normal bir araçta frenleme sırasında kaybolan enerjinin bir kısmı geri kazanılmıştır. Asenkron motor denetim yöntemi olarak, alan yönlendirmeli denetim kullanılmıştır. Araç üzerindeki sürtünme ve yol eğiminden gelen kuvvetlerin motora yansması ve motor torkunun tekerlerde kuvvete dönüşme

ilişkisi modellenmiştir. Ayrıca yakıt tasarrufunu ölçmek için batarya şarj durumundaki değişikliğin yakıt karşılığının hesaplanması ile, belli başlı yol ve hız değişimi şartlarında enerji geri kazanımının başarı ölçütleri hakkında bazı tespitlerde bulunulmuştur. Yalnız içten yanmalı motor kullanıldığı durumun simülasyonunda aracın daha hafif olduğu unutulmamış, yakıt tüketimi karşılaştırmasının gerçekçi olmasına dikkat edilmiştir.

Sonuç olarak, modellenen hibrit araç üzerinde hem tekrarlanan dur-kalk, hem de yokuş çıkış-iniş şartlarında önemli oranda yakıt tasarrufu sağlanmıştır. Asenkron motorun alan yönlendirmeli denetiminde kullanılan mıknatıslanma akımı değerinin de enerji geri kazanım oranını önemli ölçüde etkilediği fark edilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Hibrit Elektrikli Araçlar, Elektrikli Araçlarda Motor Kontrolü, Paralel Hibrit Araçlar.

ABSTRACT

ENGINE CONTROL IN HYBRID ELECTRIC VEHICLE

DEMİRÇİ, Yunus

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Electrical and Electronics Engineering, MSc Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ata SEVİNÇ

September 2010, 74 pages

The interest for hybrid electric vehicles has increased rapidly in automotive technologies in parallel to the search for usage of efficient energy and availability of clean energy resources. If the appropriate system configuration is selected by examining the road conditions of the region, hybrid electric vehicles are more successful comparing to conventional vehicles in terms of fuel consumption and emissions.

By modeling and controlling a hybrid vehicle's electric motor in MATLAB environment in this thesis, it is aimed to compare the fuel consumption of hybrid operation with that of only the internal combustion engine operation according to the simulation results.

The history of hybrid vehicles, general hybrid structures, some mass production hybrid vehicles, electric motors, battery models and transmission systems in hybrid vehicles have been summarized in the thesis as background knowledge. A system that modeled for internal combustion engine and electric motor driving the same shaft in parallel has been considered in the main study. Li-ion battery and an induction motor have been used as battery and electric motor. No other machine is used as a generator; by operating the same induction motor in generating mode, the lost energy is partly recovered during braking of a normal vehicle. Field oriented control is used as the induction motor control method. The relations about how the

friction and road slope forces on the vehicle are seen by the motor and transformations of the motor torque into the force in the wheels have been modeled. In addition, some determinations have been carried out about the calculation of equivalent fuel consumption of the change in the state of the battery charge and success criterion of energy recovery in common road and velocity change conditions. It is remembered that the vehicle weight is lighter in the simulation of internal combustion engine alone for careful and realistic fuel consumption comparisons.

Consequently, fuel consumption is reduced significantly both in repeated start-stop and uphill-downhill conditions on the modeled hybrid vehicle. It is also noticed that the magnetizing current value of the induction motor used in field oriented control significantly affects the energy recovery rate.

Keywords: Hybrid Electric Vehicles (HEVs), Electric Vehicles Motor Control, Parallel Hybrid Vehicles.

TEŞEKKÜR

Öncelikle Tezimin hazırlanması esnasında desteklerinden dolayı aileme ve hiçbir yardımcı esirgemeyen ve bizlere büyük destek olan, bilimsel imkânlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine veren, çalışmalarımızda zamanını esirgemeyen tez yöneticisi hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER DİZİNİ	xiii
KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1.GİRİŞ	1
1.1. Problem Tanımı.....	1
1.2. Zorluklar kısıtlamalar.....	1
1.3.Hibrit Araçların Tarihçesi.....	2
1.4. Literatür Özeti.....	4
1.5. Tezin Ana Hatları.....	6
2. HİBRİT ARAÇLAR HAKKINDA GENEL BİLGİLER	7
2.1. Hibrit Araç Türleri	7
2.1.1. Seri Hibrit Model.....	7
2.1.2. Paralel Hibrit Model.....	8
2.1.3. Seri-Paralel Hibrit Model.....	10
2.2. Günümüzdeki Popüler Paralel Hibrit Araç Modelleri ve Genel Özellikleri.....	11
2.2.1. Honda Şirketinin Insight Modeli.....	11
2.2.2. Honda Firmasının Civic Modeli.....	12
2.2.3. Toyota Firmasının Prius Modeli.....	13
2.3. Prototip Ve Deneysel Hibrit Elektrikli Araçlar.....	14
2.3.1. Elit-1 Modeli.....	14
2.3.2. Hibrid Transit Modeli.....	15
2.4. Hibrit Araçlarda Kullanılan Başlıca Elektrik Motorları.....	16
2.4.1. Doğru Akım Elektrik Motorları.....	16

2.4.2. Alternatif Akım Motorları.....	17
2.4.2.1. Asenkron (Endüksiyon) Elektrik Motorları.....	18
2.4.2.2. Senkron Motorlar.....	21
2.4.2.3. Fırçasız Doğru Akım Motorları.....	22
2.4.2.4. Servo Motorlar.....	23
2.5. Pil Modelleri.....	23
2.5.1. Kurşun Asitli Piller.....	25
2.5.2. Nikel Kadmiyum Piller (Ni-Cd).....	25
2.5.3. Nikel Metal Piller (Ni-MH).....	26
2.5.4. Lityum İyon Piller (Li-ion) ve Hibrit Araçlarda Kullanım Sebebi.....	27
2.6. Süper Kapasitörler.....	29
2.7. Eviriciler	29
2.8. Gezegen Dişli Sistemi.....	31
2.9. Sürekli Değişken Otomatik Şanzıman (Continuously Variable Transmission-CVT).....	32
3. MODELLEME VE SİMÜLASYON	34
3.1. Batarya	34
3.2. Motor.....	36
3.2.1. Koordinat dönüşümleri.....	36
3.2.2. Asenkron Motor Modeli.....	38
3.3. Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control(FOC))	41
3.4. Sürücü.....	42
3.4.1. Uzay Vektör Modülasyonu (Space Vector Modulation).....	42
3.5. Transmisyon.....	45
3.5.1. Araca Etkiyen Kuvvetler.....	46
3.5.1.1. Havanın Sürtünmesi.....	46
3.5.1.2. Tekerde Oluşan Sürtünme.....	47
3.5.1.3. Yokuş Direnci.....	48
3.5.2. Katsayı Dönüşümleri.....	49
3.6. Yol Modelleri.....	52
3.6.1. Kalkış ve Duruş Modeli.....	53
3.6.2. Yokuş Çıkışı ve İnişi Modeli.....	54

3.7.Yol Modellerine Göre Simülasyon Sonuçları.....	55
3.7.1. Tasarruf Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	61
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	62
KAYNAKLAR.....	63
EKLER.....	70
EK 1. ASENKRON MOTOR MODELİ.....	70
EK 2. ANA PROGRAM.....	71
EK 3. BATARYA MODELİ.....	74

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>		<u>SAYFA</u>
1.1.	Mixte-Wagen.....	2
1.2.	Dual Power.....	3
2.1.	Seri hibrit sisteminin genel yapısı.....	8
2.2.	Paralel hibrit sisteminin genel yapısı.....	9
2.3.	Seri-paralel hibrit sisteminin genel yapısı.....	10
2.4.	Birinci nesil Honda Insight.....	11
2.5.	2010 model Honda Insight.....	12
2.6.	Honda Civic.....	12
2.7.	Birinci nesil Toyata Prius.....	13
2.8.	2010 model Toyota Prius.....	14
2.9.	Fiat Doblo Hibrid.....	15
2.10.	Ford Hibrit Transit.....	15
2.11.	DC motor ve parçaları.....	16
2.12.	Mıknatıslı bir DC motor tork ve gücünün hıza karşı değişimleri	17
2.13.	3 Fazlı asenkron motorun tipik tork hız eğrisi	19
2.14.	Bilezik tipi rotor.....	19
2.15.	Kafes tipi rotor.....	19
2.16.	Asenkron motorda üç fazda oluşan manyetik alanlar ve giriş voltajları.....	20
2.17.	Dıştan rotorlu fırçasız DC motor.....	22
2.18.	Kurşun Asit Pilin şarj durumu-voltaj eğrisi.	25
2.19.	Nikel-Kadmiyum ve Nikel-Metal Pillerinin şarj durumu-voltaj eğrisi	26
2.20.	Lityum İyon Pilin sarj durumu-voltaj eğrisi	27
2.21.	Lityum-İyon Pilin yapısı	28
2.22.	Süper Kapasitör.....	29
2.23.	Süper Kapasitörlerin araç içi yerleşimi.....	29
2.24.	H-Köprüsü bağlantı şekli.....	30

2.25.	Üç fazlı bir evirici modeli.....	30
2.26.	Gezegen Dişli Sistemi.....	32
2.27.	Modern Tip CVT modeli.....	33
2.28.	Basit yapılı CVT modeli.....	33
3.1.	Hibrit araçlarda elektrik motorunun kontrol blok şeması.....	34
3.2.	Üç fazlı sistemdeki bir uzay vektörünün iki fazlı bileşenleri.....	36
3.3.	Durgun eksenlere göre bir uzay vektörünün dönen eksene göre bileşenleri.....	37
3.4.	Bir asenkron motorun tek faz eşdeğer devre modeli.....	38
3.5.	Asenkron motorun çalışma aralığı	39
3.6.	Asenkron motorda Alan Yönlendirmeli Kontrol şeması.....	42
3.7.	V1(1,0,0) durumunda anahtarların konumu.....	43
3.8.	Durağan referans çatı ve evirici durumlarının ifadesi.....	43
3.9.	Voltaj referans vektörü için anahtarlama sinyalleri ve referans vektörün bileşenleri.....	44
3.10.	Uzay vektör modülasyonu için oluşturulan vektörler ve her sektör için anahtarlama sinyalleri.....	45
3.11.	Bir araca etki eden kuvvetler.....	46
3.12.	Bir aracın üzerindeki hava akışı.....	47
3.13.	Yuvarlanma direncinin gösterimi.....	48
3.14.	Honda'nın resmi sitesine göre Civic modeli için 195/65/15 ebadında bir lastik ile viteslere göre 3000 devire kadar hızlar...	49
3.15.	Kalkış ve duruş modeli.....	54
3.16.	Yokuş çıkışı ve iniş modeli.....	55
3.17.	Asenkron motor modeli için yapılan matematiksel modellemeyle yalnız benzin motoru ve mekanik frenlemeyle kalkış ve duruş yol durumu sonuç grafikleri.....	56
3.18.	Asenkron motor modeli için yapılan hibrit durumda matematiksel modelleme sonuç grafikleri.....	57
3.19.	Hibrit çalışmada kalkış ve duruş modeli için batarya akım grafiği.....	57
3.20.	Asenkron motor modeli kalkış ve duruş yol modeli için batarya şarj oranı.....	58

3.21.	Asenkron model için yalnız benzin motoru ve mekanik frenlemeyle yokuş çıkış ve iniş modeli için sonuç grafikleri.....	59
3.22	Asenkron model için benzin motoru, asenkron motor ve geri kazanımlı frenlemeyle yokuş çıkış ve iniş modeli için sonuç grafikleri	60
3.23	Hibrit çalışmada yokuş çıkış ve iniş modeli için batarya akım grafiği.....	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>SAYFA</u>
3.1. Hibrit sürüş tasarruf oranının çizelgesi.....	62

SİMGELER DİZİNİ

A	Değişken voltaj(V)
B	Değişken kapasite(V)
E_0	Bataryanın başlangıç anındaki voltajı (V)
K	Polarizasyon sabiti veya polarizasyon direnci(Ah ⁻¹)
Q	Maksimum pil kapasitesi (Ah)
$r_{iç}$	Bataryanın iç direnci Ω
E_{batt}	Bataryanın iç direnci üzerindekiyle birlikte anlık voltaj
i	Batarya akımı(A)
i_t	Ayrıştırılmış kapasite(Ah)
r_k	Bataryanın değişken kapasitesi (Ω)
R_1	Stator sargı direnci
L_1	Stator kaçak endüktansı
X_1	Stator kaçak reaktansı
X_2	Rotor kaçak reaktansının statora yansıtılmışı
L_2	Rotor kaçak endüktansının statora yansıtılmışı
R_2	Rotor sargı direnci
X_m	Mıknatıslanma akımına karşılık gelen reaktans
s	Kayma
ω	Açısal frekans
\bar{V}	Uygulanan kaynak gerilimi
\bar{I}	Stator akımı
\bar{I}'_2	Rotorda oluşan akımın statora yansıtılmışı
$Alan$	Aracın havayı yaran yüzey alanı(m ²)
A_{Gen}	Aracın genişliği(m)
$A_{Yüks}$	Aracın yüksekliği(m)
K_{sv}	Hızın karesiyle ve alanla orantılı sürtünme kuvveti katsayısı(Ns ² /m ⁴)
b_2	Araç için hızın karesiyle orantılı havanın sürtünme katsayısı (Ns ² /m ²)
F_c	Tekerlek yuvarlanma sürtünmesi(N)

K_s	Sabit Sürtünme Katsayısı
M_{toplam}	Aracın toplam ağırlığı(kg)
g	Yerçekim ivmesi(m/s^2)
b_1	Hızla orantılı sürtünme katsayısı(Ns/m)
g	Yerçekimi ivmesi(m/s^2)
α	Yokuş eğim açısı
c	Vites dönüşüm oranı
v	Araç hızı[m/s]
ω_m	Rotor mekanik açısal hızı(rad/s)
η	İletim verimi
T_m	Motorun üretilen herhangi bir tork bileşeni
F_t	T_m nin tekere ulaşan kuvvet karşılığı
F_L	Yol eğiminden gelen yük kuvveti

KISALTMALAR DİZİNİ

VTEC	Değişebilir valf zamanlama ve elektronik çekiş kontrol sistemi
DC	Doğru akım
AC	Alternatif akım
IGBT	Yalıtılmış geçitli çift kutuplu transistor
Ni-Cd	Nikel Kadmiyum Pil
Ni-MH	Nikel Metal Pil
Li-ion	Lityum İyon Pil
CVT	Sürekli değişken otomatik şanzıman
FOC	Alan Yönlendirmeli Kontrol

1. GİRİŞ

1.1. Problem Tanımı

Günümüzde araçların büyük bir kısmı petrol türevlerini kullanmaktadır. Otomotiv üreticileri müşterilerinin de talep ettiği gibi daha az yakıt tüketimi olan araçlar üretmeye çalışmaktadır. Araçların yavaşlarken veya iniş sırasında kaybettikleri enerjinin bir bataryada depolanarak gerektiğinde araç sürüşü için tekrar kullanılması, hibrit araçların ana fikridir. Bu sebeple araçlarda mekanik gücün elde edildiği iki kaynak olarak içten yanmalı ve elektrikli motorlar tercih edilmektedir. Elde edilen tasarruf, elektrik motorunun ne kadar iyi kontrol edildiğine bağlıdır. Bu da araçta bulunan motorun, jeneratörün ve güç kaynağının yapısına, yapılan kontrollere ve yol şartlarına göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada seçilen bir araç modelinin hibrit durumda kullanılan bir asenkron motor-jeneratör denetimiyle ne kadar kazançlı olduğu tespit edilmeye çalışılmıştır.

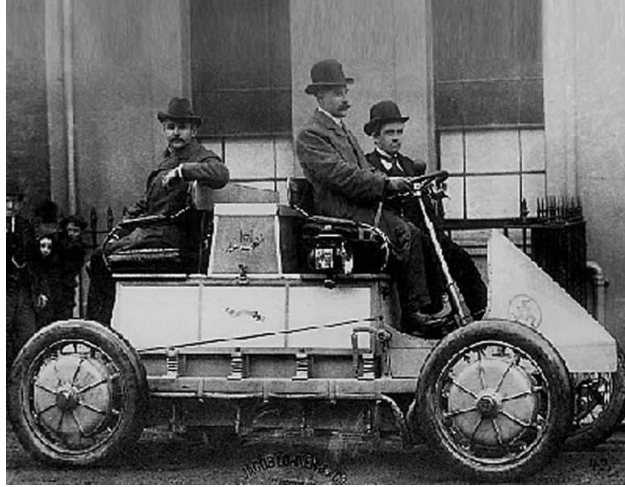
1.2. Zorluklar Kısıtlamalar

Hibrit araçlar birçok şirketin ve kişinin üzerinde yoğun bir şekilde çalıştığı konudur. Ticari bir değeri olması sebebiyle konu hakkında detaylı bilginin temini diğer konulara göre daha zordur. Yapılan çalışma sırasında aracın gerçek kazancının ve sürüş koşullarının tespitinde mekanik hesaplamalarla birlikte elektriksel hesaplarının yapılması gerekmektedir. Bunlarla birlikte bir araca hibrit yapının uygulanmasında yaşanan çeşitli zorluklar da mevcuttur. Hibrit araçların üretim ve bakım maliyetleri diğer araçlara oranla yüksektir. Hibrit araç içerisinde batarya, elektrik motor ve kontrol birimleri çok yer kaplamakta ve araca ilave yük getirmektedir. Araç içerisinde elektrik motorunun kullanılabilirliği bataryanın yapısı ve şarj durumu ile kısıtlanmaktadır. Kullanılan bataryaların kullanılabilir çalışma aralıkları yüksek olmayıp ömürleri kısadır ve düzenli bakıma ihtiyaçları vardır.

1.3. Hibrit Araçların Tarihçesi

1900–1912 arası dönemde araçlar için menzil ve performans artırma düşüncesi oluşmaya başlamıştır. Bu amaçla 1900 yılında French Electroautomobile ve 1903 yılında Krieger elektrikli-benzinli araçları geliştirmeye çalışmışlardır. Bu araçta elektrik motor, benzinli motor ile birlikte kullanılarak ilk hibrit yapı denenmiştir.

Bilinen ilk hibrit araç olarak kabul edilen, istenildiğinde benzinli istenildiğinde elektrik motoruyla ilerleyebilen araç 1902 yılında “Mixte-Wagen” (Şekil 2.1) adıyla 27 yaşındaki Ferdinand Porsche tarafından yapılmıştır. Viyanalı bir fayton üreticisi olan Ludwig Lohner ile birlikte çalışan Porsche, 4 silindirli bir Daimler motoruna aküler, bir jeneratör ve elektrik motorları eklemiştir. Bu haliyle Mixte-Wagen, benzinli motor stop edildiğinde bile akülerin çalıştırdığı elektrikli motoruyla ilerlemeye devam edebilmekteydi. Araçta 5,2 kW anlık güç sağlayabilen elektrik motorları kullanılmıştır. Araç, 50 km/saat maksimum hız ve 50km menzil özelliklerine sahipti.



Şekil 1.1. Mixte-Wagen

1915 te Woods Motor Vehicle şirketi Dual Power (Şekil 1.2) adındaki hibrit aracı ile ilk paralel hibrit aracı yapmıştır. Bu sistemde aküden aldığı elektrikle çalışan elektrik motoru, dört silindirli küçük bir benzinli motor ile şafta direk bağlıdır. 25 km/saat altındaki hızlarda aracı elektrik motoru, üstündeki süratlerde(55 km/saat azami hızı) ise içten yanmalı motor götürmektedir.



Şekil 1.2. Dual Power

1921’de Owen Magnetic Toring isimli araç bataryasız seri hibrit yapıda üretilmiştir. Bu tarihten sonra 1960 yılına kadar araç üreticileri içten yanmalı motora sahip araçların üretimine ağırlık vermişlerdir. Bu nedenle 1920 ile 1960 seneleri arasında hibrit araçlarla ilgili çalışmaların duraksadığı görülür.

1960-1970 seneleri arasında Victor Wouk birçok hibrit araç tasarlayarak hibrit araçların vaftiz babası ismini almıştır. 1976 senesinde Buick Skylark isimli benzinli aracı, 16 kW’lık bir elektrik motor ekleyerek hibrit araca çevirmiştir. Çevresel Koruma Ajansı tarafından desteklenen çalışmaları, ajanstaki bir skandal yüzünden durmuştur.

1978 senesinde David Arthurs, standart bir Opel Gt aracını birbirine bağlı jeneratör ve elektrik motoru ile şarj olabilen aküler ekleyerek, kendi geliştirdiği kontrol sistemi sayesinde, hibrit bir araca çevirerek bir araca geri kazanımlı frenleme sistemini ilk uygulayan kişi olmuştur.

1989 yılında Audi firması, araç üzerinde şarj edilerek kullanılabilme özelliğine sahip(plug-in) paralel hibrit elektrikli Avant Quattro model aracı tasarlayıp prototip olarak yüz adet üretmiştir. Araçta arkadan itiş sağlayan 12,6 beygir gücündeki Siemens marka elektrik motorları bulunmaktaydı. Elektrik motoru için gerekli olan elektrik enerjisi Nikel-Kadmiyum batarya paketi tarafından sağlanmaktaydı. Aracın önden çekişini 136 beygirlik içten yanmalı motor sağlamaktaydı.

Bu araçların üretiminde amaçlanan, araçların şehir içi kullanımında sadece elektrikli motor, şehirlerarası kullanımda ise benzinli motor kullanılarak yakıt tasarrufu sağlanmasıdır. Ancak elektrikli sürüş için gereken sistemin ağır olması istenilen tasarrufun elde edilmesini engellemiştir. Bu projeden iki sene sonra Audi firması benzinli motora bağlı üç fazlı elektrik motoruna sahip arkadan çekişli daha güçlü bir modeli üretmiştir.

1990 ve sonrasında birçok firma hibrit araç modelleri geliştirmiştir. Pazarı Toyota ve Honda firmaları yönlendirmeye başlamışlardır. Honda'nın Insight modeli ile Toyota'nın Prius modeli pazarın ilk ana ve popüler modelleri olmuştur. 1997 de ise Audi Duo Avrupa'nın ilk hibrit seri üretilen olan aracı olmuştur(1).

1.4. Literatür Özeti

Literatür hibrit araçlar üzerine birçok çalışma gözden geçirildiğinde görülen belli başlı bazı gelişmeler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Herwald 1999 senesinde, hibrit araçlarda kullanılan elektrik motorunu farklı sürücüler, kontrol ve modülasyon yöntemleri kullanarak ve yeni bir yöntem geliştirmeye çalışarak en yüksek tasarrufu elde etmeye çalışmıştır. Çalışma sonucunda alan yönlendirmeli kontrol modelinin hibrit araçlarda etkili bir kontrol modeli olduğu tespit edilmiştir(2).

Hironaka vd. 2003 senesinde, hibrit araçlar için yeni bir lityum iyon pil modeli geliştirdiler. Yüksek kapasiteli bu lityum iyon pil modelinde pozitif elektrotlar için manganez, negatif elektrot için ise sert karbon yapı kullanarak 25°C sıcaklıkta mevcut lityum iyon pillerden daha yüksek enerji saklama oranlarına sahip ve tam dolu enerjisine oranla kullanılabilir enerjisinin daha fazla olmasını sağlamışlardır(3).

Washington vd. 2003 senesinde, bulanık mantık ve yapay sinir ağı yöntemleriyle hibrit araçlarda ileri düzeyde elektrik ve benzinli motor kontrolünü sağlamayı hedeflemişlerdir. Bu çalışmalarında en az benzin tüketimi ve emülsiyon çıkışı elde etmeyi amaçlamışlardır. Düzenli olmayan elektrik ve benzin motoru çalışmasını ve

şarj durumunu en uygun düzeye getirmeye çalışmışlardır. Sonuç olarak geliştirdikleri bulanık mantık ve yapay sinir ağı ile çalışan ADVISOR3.2 programı ile hibrit araçlar için hedefledikleri yakıt tüketim seviyesine ve hedefledikleri kontrol yapısını elde etmişlerdir(4).

2007 senesinde Dr. Tom ve Dr. Robert, 2005 model Hibrit Chevrolet Equinox'un değerlerini referans alarak sistemin batarya sistemine bağlı olan süper kapasitörler için yüksek ivmelenmede elektrik enerjisinin temininde süper kapasitörlerden yararlanıp en iyi gerilim kontrolünü amaçlamışlardır. Ayrıca geri kazanımlı frenlemede elde edilen elektrik enerjisinin en az kayıpla süper kapasitörlerde saklanması için çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada denedikleri çeşitli sistemlerle süper kapasitörlerde amaçladıkları motor akı ve gerilim kontrolünü sağlamayı başarmışlardır(5).

2007 senesinde Michael, 2005 model Hibrit Chevrolet Equinox aracını seri-paralel hibrit modele çevirip ve ultra kapasitörleri ekleyerek, paralel hibrit modeli test etmek için geliştirdiği sistemler ile test etmiştir. Yaptığı çalışmalar sonucu seri paralel sistemin aracın düşük süratlerinde bile bataryayı şarj edebildiği ve sağladığı tasarrufun paralel hibrit modele oranla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Burada seri paralel sistemde iki ayrı elektrik motorunun aracın ağırlığına ilave yük getirmesinden dolayı küçük ve yüksek geri kazanımlı motorlar seçilmesi önerilmiştir(6).

Koishikawa vd. 2008 senesinde, hibrit araçlar için en uygun ve en çok kullanılan batarya türü olan Lityum iyon pillerin performansını artırmak için alüminyum plakalarla kaplayarak ısıdan daha az etkilenen ve daha güçlü bir pil modeli meydana getirmişlerdir. Bu batarya sistemi 20 000 saat şarjdan sonra 80°C sıcaklığa kadar ulaşmakta ve sahip olduğu enerjinin kullanılabilirlik oranı %70'lere kadar çıkabilmektedir(7).

Prasad vd. 2008 sensinde, çalışmalarında en uygun donanımlar ile en uygun tork talebine göre, tork üretimini sağlamaya çalışarak hibrit araçlarda en az yakıt tüketimi ve emülsiyon çıkışı sağlamayı amaçlamışlardır. Geliştirdikleri taşıyıcı matematiksel

modeliyle zamana göre besleme oranlarına bakılmış fakat yüksek beslemelerde lineerlik sağlanamamıştır(8).

Emma ve Emma 2009 senesinde, Shell şirketinin Ecomaraton'u için Matlab programıyla QRTECH isimli go-kart için modelleme geliştirmeye çalışarak Shell'in yarışma koşulu olan 255 km de 1 litre yakıt tüketimini amaçlamışlardır. Burada rotorun direncinin sıcaklıktan başka akım frekansı ile de arttığı tespit edilmiştir. Akülerin tam dolu ve boş şarj durumlarıyla çalışma ortamı sıcaklıkları bilinmeden akülerin şarj durumunu tespit etmenin zor olduğu bulunmuştur(9).

Bu tezde ise asenkron motorlu paralel hibrit modeli kullanılmış ve asenkron motor alan yönlendirmeli denetimle denetlenmiştir. Sonraki araştırmalara faydalı olacak bazı transmisyon modelleri ile yakıt tasarrufu başarı ölçütleri verilmiştir.

1.5. Tezin Ana Hatlarını

Bu bölümde hibrit araçların tarihçesi verilmiş ve kısaca daha önce yapılmış çalışmalara değinilmiş, ikinci bölümde ise hibrit araçların genel yapı blokları, günümüzdeki hibrit araçlar hakkında kısa bilgiler, motor modelleri, batarya modelleri ve hibrit araçlarda kullanılan iletim dişli yapısı ve transmisyon sistemi gibi ön bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde tez çalışmasında kullanılan batarya modeli, alan yönlendirmeli denetim yöntemi ve uzay vektör modülasyonu anlatılmıştır. Daha sonra ise bir araca etki eden kuvvetler ile motorun gördüğü büyüklükler arasındaki ilişkiler modellenmiştir. Yol koşullarına göre yapılan modelleme ve simülasyon sonuçları da üçüncü bölümün sonunda verilmiştir. Dördüncü bölümde ise yapılan çalışmanın sonuç yorumları ve bazı öneriler sunulmuştur.

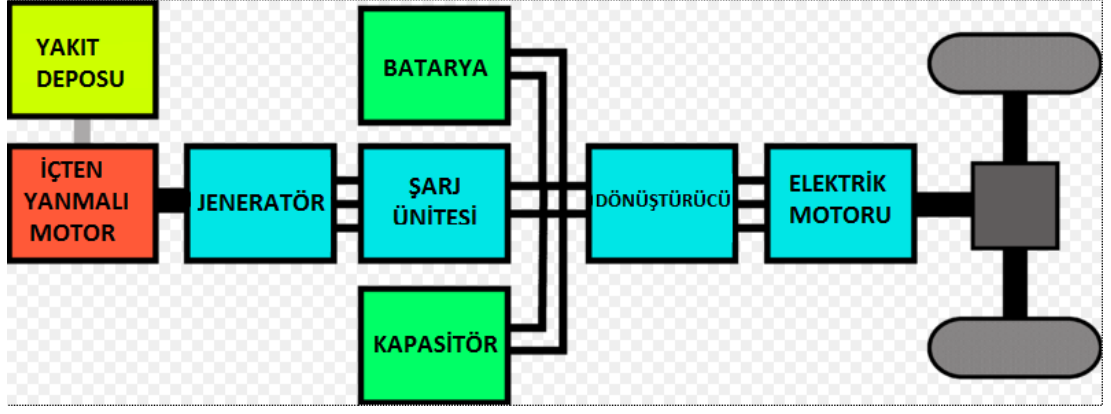
2. HİBRİT ARAÇLAR HAKKINDA GENEL BİLGİLER

2.1. Hibrit Araç Türleri

Hibrit(melez) elektrikli araçlar, en az iki enerji kaynağı bulunan ve bu enerji kaynaklarından en az birisi elektrik enerjisi olan araçlar olarak tanımlanır. Hibrit otomobillerin amacı akaryakıt tüketimini azaltmaktır. Bunun için yoğun trafikte, durkalk ve düşük hızlarda içten yanmalı motor yerine elektrik motorunu kullanarak emülsiyon salınımını azaltmakta ve daha az akaryakıt tüketmektedirler. Elektrik motorunun ihtiyacı olan elektrik enerjisi, içten yanmalı motor çalıştırıldığı zamanlar ile geri kazanımlı frenleme sırasında üretilerek bataryada depolanmaktadır. Bu sebeple elektrikli araçlardan(plug-in) farklı olarak hibrit araçların elektriğe bağlanarak şarj edilmesi gibi bir ihtiyaçları yoktur. Hibrit araçlar güç organlarının yapısına göre sınıflara ayrılırlar, bunlar seri hibrit, paralel hibrit ve seri-paralel hibrit modellerdir.

2.1.1. Seri Hibrit Model

Seri hibrit model hibrit araç modelleri içerisinde en basit yapıya sahip olan model türüdür. Seri hibrit araçlar elektrikli sürüş için tasarlanmışlardır. İçten yanmalı bir motordan alınan torktan elektrik üretilerek bataryalar şarj edilebilir veya elektrik motorundan alınan tork doğrudan tekerlere iletilebilir. Şehir içi sürüşlerde elektrik motoru aküler tarafından beslenerek gürültü ve karbondioksit salınımı olmadan bir sürüş imkânı sağlar. Trafikte bekleme sırasında elektrik motorunun durmasıyla normal içten yanmalı bir araca göre önemli bir enerji tasarrufu sağlanır. Frenleme sırasında da aracın enerjisinin bir kısmı geri kazanımlı frenleme sayesinde bataryalara aktarılarak depolanır. Üzerinde bulunan içten yanmalı motor sayesinde şarj istasyonlarına ihtiyaç duymadan bataryalarını şarj edebilirler. Genellikle bu model araçların bileşenleri araç içerisinde geniş hacim kapladıkları için çoğunlukla daha geniş hacme sahip ve devamlı olarak benzer işler için kullanılan ağır vasıtalarda uygulanması tercih edilmektedir.



Şekil 2.1. Seri hibrit sisteminin genel yapısı

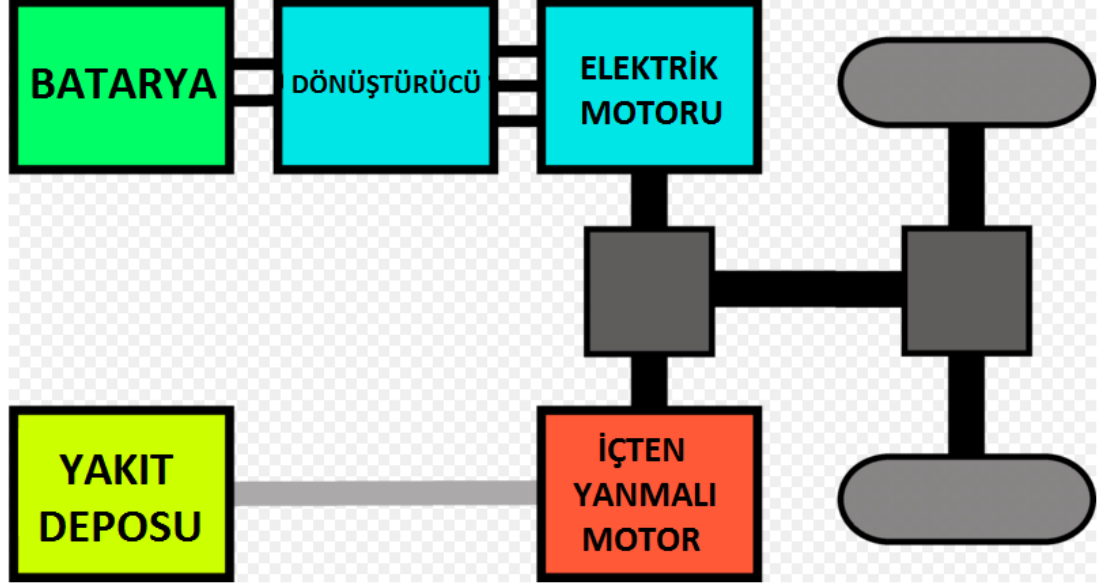
Seri hibrit sistemlerde elektrik motorunun kendisi tekerlerin dönüşünü doğrudan sağladığı için kavrama sistemine veya vitesli bir sisteme gereksinim olmamaktadır. Elektrik motorunun düşük devirlerde momenti yüksek olduğu için vites redüksiyonuna ihtiyaç duyulmamaktadır.

Sistemin çalışmasında içten yanmalı motor, bataryaların sürüş için belirlenen en alt doluluk seviyesine gelmesi ile çalıştırılarak belirlenen en üst doluluk seviyesine kadar bataryaların jeneratör aracılığıyla doldurulması sağlanmış olur. Seri hibrit model, yakıt pili ile çalışan araçlar içinde en çok tercih edilen yapıdır. Özellikle yeni yapılan modellerde elektrik motoru doğrudan aracın tekerleri ile bütünleşik olarak yapılarak mekanik kayıplar en aza indirilmeye çalışılmaktadır. Seri hibrit modelin en büyük dezavantajı sistem içinde kullanılan jeneratördür. Mekanik enerjinin elektrik enerjisine çevriminde ve tekrar bu elektrik enerjisinin mekanik enerjiye çevriminde kayıplar meydana gelmektedir. Jeneratör araca ilave yük getirmesi sebebiyle aracın ağırlığını artırarak ekstra maliyet getirmektedir. Sistemde bulunan elektrik motoru bütün sistemi devamlı olarak taşıyacağı için güçlü, dolayısıyla büyük seçilmekte, bu da sisteme ilave yük ve maliyet getirmektedir. Bu açılardan daha avantajlı bir yapı paralel hibrit modeldir.

2.1.2.Paralel Hibrit Model

Seri hibritten farklı olarak paralel hibrit modelde elektrik motorunun yanı sıra içten yanmalı motor da aynı anda veya farklı zamanlarda tekerlere dönüş sağlamaktadır. Çoğunlukla paralel hibrit sistemlerde elektrik motor ve içten yanmalı motor gezegen

dişli sistemi olarak bilinen bir dişli sistemi sayesinde tekerlere güç iletimi sağlar. Bu dişli sistemi sayesinde istenirse yalnız elektrikli motor, yalnız içten yanmalı motor veya her ikisi birden tekerlere dönüş verebilmektedirler.



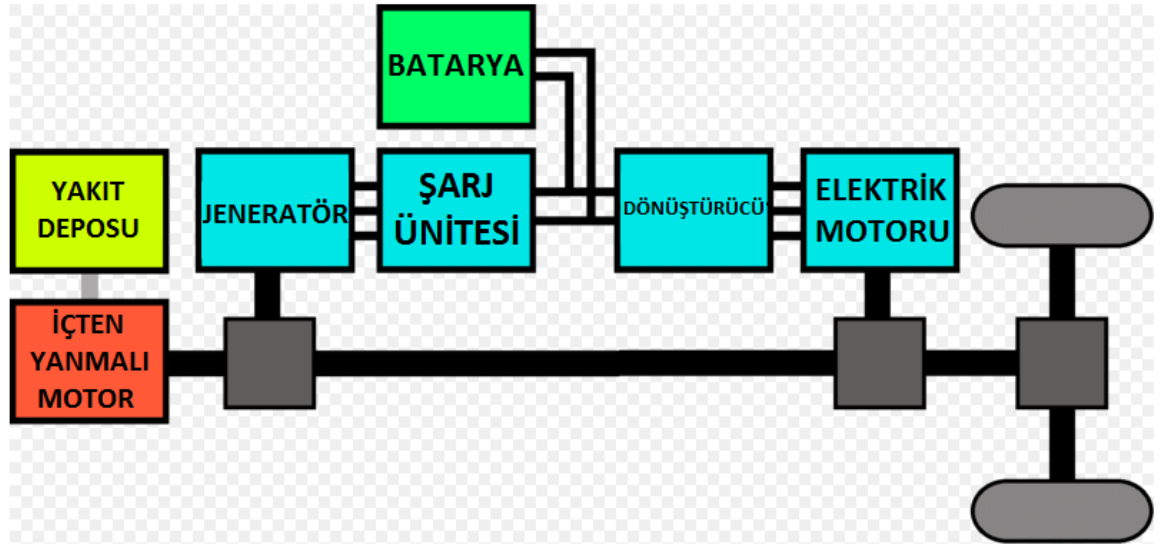
Şekil 2.2. Paralel hibrit sistemin genel yapısı

Paralel hibrit sistemde de seri hibrit sistemde olduğu gibi bataryaların şarjı geri kazanımlı frenleme sayesinde yapılmaktadır. Bununla birlikte seri hibrit sistemden farklı olarak yüksek hızlarda ilerlerken elektrik motoru sistemi şarj edebilmektedir. Paralel hibrit sistemde bataryalara olan ihtiyaç seri hibrit sisteme göre daha az olduğu için elektrik motoru ve batarya sistemi daha küçük ve daha az kapasitelidir. Bu da seri hibrit sisteme göre sistemin maliyetini düşürmektedir.

Paralel hibrit sisteminde düşük hızlarda ve kalkışlarda elektrik motorunun, yüksek hızlarda ise içten yanmalı motorun vermiş olduğu dönüş kullanılmaktadır. Anlık hız ihtiyaçlarının olduğu ve içten yanmalı motorun yetersiz kaldığı durumlarda elektrikli motor da sisteme girerek her iki motor birlikte çalışmaktadır. Böylece seri hibrit sisteme göre daha büyük güçler elde etmek mümkün olmaktadır.

2.1.3.Seri-Paralel Hibrit Model

Seri-paralel hibrit model hem paralel hem de seri sistemin özelliklerini taşımaktadır. Buradaki farklılık paralel sisteme ilave olarak elektrik ve içten yanmalı motorlara şaft ile bağlı bir adet jeneratörün sisteme eklenmiş olmasıdır. Bu sistemde paralel sistemdeki gibi içten yanmalı motor tekerlere dönüş iletimi olmadan bataryaları şarj amaçlı olarak da kullanılabilir. Genellikle bu tip sistemlerde elektrik motorunun gücü içten yanmalı motorun gücüne yakın bir motor seçilir.



Şekil 2.3. Seri-paralel hibrit sisteminin genel yapısı

Sistemde bulunan jeneratör, sistemde dönüş olduğu sürece devamlı olarak akülerin dolmasını ve aküler dolu ise sistemin elektrik ihtiyacını sağlamaktadır. Bu sayede içten yanmalı motorun sağladığı dönüşle hareket halindeyken jeneratörden elde edilen elektrik akımı elektrik motorunu besleyerek içten yanmalı motora tork takviyesi yapmaktadır. Diğer sürüş koşullarında ise sistem paralel hibrit sistemde olduğu gibi, düşük hızlarda elektrik motorunun, yüksek hızlarda ise benzinli motorun dönüşü ile hareket etmektedir. Anlık frenlemelerdeki kazanım, sistemdeki jeneratör sayesinde paralel sisteme göre daha yüksektir. Kısa süreli frenlemelerde bile enerji kazanımı olabilmektedir. Geri kazanımlı frenleme sırasında bataryalar hem elektrik motorundan, hem de jeneratörden beslenmektedir. Bu sistemde jeneratör ve elektrik motorunun büyük olması sisteme ilave yük getirmekte ve aracın yakıt tüketimini etkilemektedir.

2.2.Günümüzdeki Popüler Paralel Hibrit Araç Modelleri ve Genel Özellikleri

2.2.1.Honda Şirketinin Insight Modeli

Honda şirketinin Insight modeli ilk olarak 1999 senesinde 2 kişilik ve 5 vitesli olarak üretilmiştir. Araçta yüksek verimli ve hafif yapıları 4800 devir/dakika hızda 91Nm'lik güç üreten bir benzinli motor ile 60mm lik 0,94kW'lık fırçasız DC motor mevcuttur. Bu araç 0 km/saat'ten 100 km/saat hıza 12 saniyede ulaşabilmekte ve maksimum hızı 160 km/saat'e ulaşabilmektedir. araçta 144V değerinde NiMH batarya bloğu bulunmakta ve üretici şirket tarafından yakıt tüketiminin düz yolda 1 litre benzin ile 28 km olduğu belirtilmiştir(10).



Şekil 2.4. Birinci nesil Honda Insight

Honda şirketi Insight modelinin yeni modellerini beş kişilik olarak üretmeye devam etmektedir. Geliştirmiş olduğu elektrik motoru bütünleşik 8-Valfli SOHC i-VTEC(Değişebilir valf zamanlama ve elektronik çekiş kontrolü) sistemiyle araç yakıt tüketimi 100km'de 4,4 litre değerlerine düşebilmektedir. VTEC sistemi üç-aşama özelliği bulunduran bir yapıda dahili dört silindir motordan oluşur. Honda firması Insight modelinin 10 bin 481 adetle Japonya'da 2009 senesi Nisan ayında en çok satılan otomobil olduğunu duyurmuştur. Böylece ilk kez bir hibrit otomobil, aylık satışlarda en çok satılan otomobil unvanını almayı başarmıştır(11).



Şekil 2.5. 2010 model Honda Insight

2.2.2. Honda Firmasının Civic Modeli

Honda firmasının Insight modeline alternatif olarak ürettiği Civic hibrit modeli 2003 yılında üretilmeye başlamıştır. Bu modelde 4 silindirli 1339 ml VTEC benzin motoru bulunmakta, 5700 devir/dakika'da 85 beygir gücüne ulaşabilen bu motor 8 sübaplı olup çok noktadan enjeksiyon sistemine sahiptir. Araçta sürekli mıknatıslı 4000 devir/dakika'da çalışabilen, 13,4 beygir gücüne sahip bir elektrik motoru bulunmaktadır. Araç 144 hücreden oluşan NiMH batarya sistemine sahiptir. Ülkemizde şu anda satışı yapılmakta olan bu aracın 2010 modelinin yakıt tüketimi 100 km'de 4,6 litreye düşebilmektedir.



Şekil 2.6. Honda Civic

2.2.3. Toyota Firmasının Prius Modeli

Toyota şirketinin Prius modeli dünyanın ilk seri üretim hibrit otomobilidir. Birinci nesil Prius hibrit modellerinde benzinli motor ve elektrik motoru arasındaki güç paylaşımı Honda şirketinin birinci nesil Insight modeline göre eşite daha yakın olmaktadır. Bu paylaşım hibrit transmisyon sistemi ile sağlanmaktadır. Prius modelinde güç paylaşımı sağlayan gezegen dişli sistemi kullanılmaktadır. Benzinli motor mili gezegen dişli taşıyıcısına bağlıdır. Jeneratör tarafından üretilen elektrik enerjisi elektrik motoruna veya bataryanın şarj olabilmesi için eviriciye yönlendirilir. Prius modelinde yüksek performanslı 1,9 kWh kapasiteye sahip NiMH bataryaları kullanılmıştır. Toyota hibrit sistemde kullanılması amacıyla benzinli 1,5 litrelik özel bir motor geliştirmiştir. Bu motorda yüksek sıkıştırma oranının sağlanabilmesi ve bu sayede yüksek yanma veriminin sağlanabilmesi amacıyla çok küçük bir yanma odası kullanılmıştır. Bu motorun devrinin düşük olması sebebiyle hareketli parçaları daha hafif yapılmıştır.



Şekil 2.7. Birinci nesil Toyota Prius

İlk üretilen Prius modellerinde de hem elektrikli hem de benzinli motor aynı anda kullanılabilirdi. Yeni nesil Prius modellerinde kullanılan yeni hibrit sistem, Hybrid Synergy Drive kavramına göre geliştirilen ilk sistemdir. Alman otomobil kulübü ADAC tarafından yapılan ADAC ECO Test'inde 2004 ve 2005 yıllarında birinci seçilen Toyota Prius, karbondioksit (CO₂) ve diğer emisyon ölçümlerinde en düşük değeri alan araç olmuştur.

Amerika’da “2007 yılının en iyi motorları ödülleri” kapsamında da Prius modeli “En İyi Yakıt Ekonomisi Sağlayan Motor” seçilmiştir. İngiltere’de 2007 yılında J.D.Power tarafından yapılan Müşteri Memnuniyeti araştırması sonucunda Prius modeli birinci seçilmiştir. Amerika’da ise özellikle hibrit otomobil modelleri arasında en çok tercih edilen model olmuştur. Toyota şirketi, süreklilik prensibi doğrultusunda, hibrit sistem ile beraber çalışan alternatif yakıt türleri ve yakıt tüketimini düşüren teknolojiler üzerine de çalışmalarını sürdürmektedir(12). Üçüncü nesil Toyota Prius modellerinde aracın tavanına yerleştirilen güneş pili sayesinde araç park halindeyken bile bataryaların şarj olması sağlanmaktadır. Toyota firması Fransa’da geliştirilen egzozdan çıkan sıcak havadan elektrik üretimini amaçlayan sistemi Prius modeline uyarlamaya çalışmaktadır. 2010 model Prius’ların yakıt tüketimi 100 km’de 3,9 litreye kadar düşebilmektedir.



Şekil 2.8. 2010 model Toyota Prius

2.3. Prototip Ve Deneysel Hibrit Elektrikli Araçlar

2.3.1.Elit-1 Modeli

TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezinde ELİT-1 adındaki Elektrikli Taşıt projesinde Doblo marka araç, seri hibrit elektrikli taşıta dönüştürülerek Türkiye’nin ilk hibrit elektrikli taşıt prototipi geliştirilmiştir(13).



Şekil 2.9. Fiat Doblo Hibrit

2.3.2. Hibrid Transit Modeli

Ford Otosan, 'Türkiye'nin ilk hibrit hafif ticari taşıtı olarak TÜBİTAK MAM ve İTÜ işbirliğiyle ürettiği Hibrid Transit'i üretmiştir. Bu araç diğer hibrit modellerinden farklı olarak elektrik motorunu duruş ve kalkışlarda kullanmaktadır. Elektrik motoru mevcut sisteme sonradan eklenmiştir ve bataryalar geri kazanımlı frenleme ile dolmaktadır. Ford Otosan, Kocaeli fabrikasında ürettiği dizel yakıtlı hibrit modelini Avrupa'ya satmayı planlamaktadır(14).

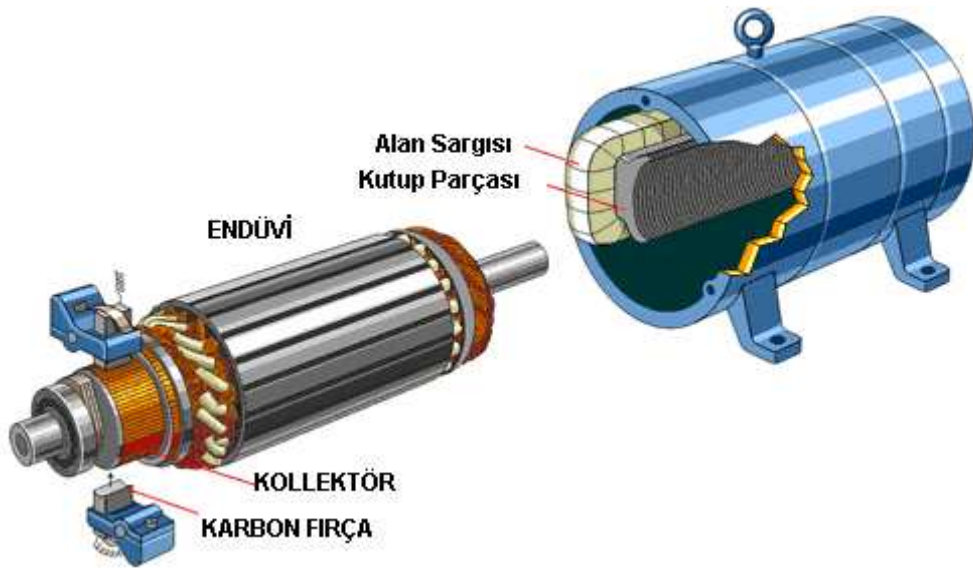


Şekil 2.10. Ford Hibrid Transit

2.4. Hibrit Araçlarda Kullanılan Başlıca Elektrik Motorları

2.4.1. Doğru Akım Motorları

Doğru akım motorlarının kontrolü kolaydır. Hızları rahatlıkla değiştirilebilmektedir. Fakat fırçalı doğru akım motorları çalışırken kolektöre elektrik akımını ileten fırçaları sebebiyle kıvılcım çıkarırlar. Eğer bir motorun sık sık durup çalışması, hassas hız ayarlarına elverişli olması ve yük altında çalışırken ani duruşlar yapması talep ediliyorsa, bu özelliklere sahip bir motorun seçimi kolay değildir. Bu şartlar, büyük torkların istendiği uygulamalarda aranmaktadır. Bunun için, güçleri onlarca MW değerlerine kadar çıkabilen doğru akım motorları tercih edilmektedir.

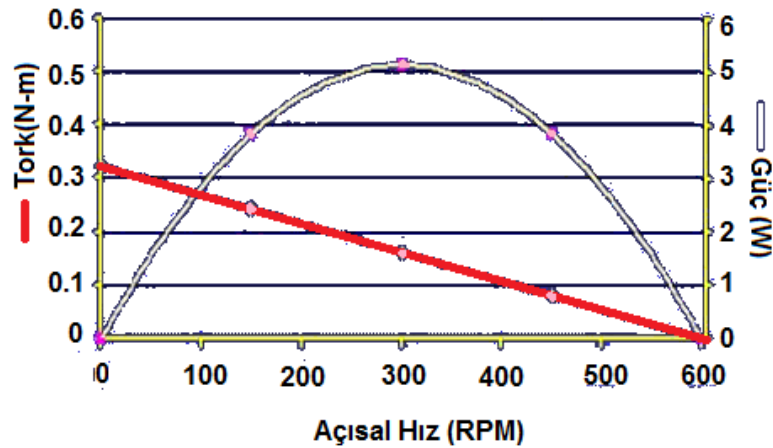


Şekil 2.11. DC motor ve parçaları(15)

Bu motorların en büyük problemi, kolektörü akımla besleyebilmek için fırçalı yapının kullanılması zorunluluğudur. Fırçalar akımı kolektöre sürtünmek suretiyle aktarırlar. Bu yüzden fırçalar kolektörü hem aşındırırlar, hem de temas ettikleri alanda kıvılcım oluştururlar. Bu da temas yüzeyinde ve fırçalarda ısınmaya sebep olur. Bu yüzden doğru akım motorları tamamen kapalı bir yapı içerisinde muhafaza edilir ve bu kapalı yapının içerisine toz ve nem girişine izin verilmemesi gerekir. Petrol gibi ürün depolarının patlama tehlikesi bulunduğu için bu tür depoların çevresinde bu tip motorlar kullanılmamalıdır. Böyle olmasına rağmen, doğru akım motorları sahip olduğu özellikler sebebiyle daha çok tercih edilebilmektedir. Bu tip

motorlar ilk hibrit araç modellerinde kullanılmıştır. Daha sonra yerlerini daha az bakım isteyen ve daha güvenli diğer motor modelleri almıştır.

Bir doğru akım motorunun elektronik hız kontrol ünitesinin yapısı basittir, hız değişim komutlarına ve ani yüklere kolayca cevap verirler. Doğru akım motorları, düz yapılı malzemelerin yüksek bir duyarlılıkla sarılması veya açılmasının gerektiği her alanda kullanılabilirler. Çalışma konumları, kesinliliği ve düzenli hareket tekrarının önemli olduğu alanlarda doğru akım motorlarından yararlanılmaktadır. Şekil 2.12’de örnek bir mıknatıslı DC motorun tork ve gücünün hıza karşı değişim eğrileri görülmektedir. Otomobil endüstrisinde, son derece gelişmiş delme tezgâhlarında, açılıp kapanan otoyol köprülerinde ve teleferiklerde doğru akım motorları kullanılmaya devam etmektedir. Çok duyarlı ve hassas bir denetim sistemi gerektiren çalışma alanlarında doğru akım motorları tereddüt edilmeksizin tercih edilmektedir(16).



Şekil 2.12. Mıknatıslı bir DC motor tork ve gücünün hıza karşı değişimleri(17)

2.4.2. Alternatif Akım Motorları

Alternatif akım motorları dalgalı akımla çalışmakta ve çoğunlukla bir kontrol sistemine ihtiyaç duymaktadır. Yapısına göre birçok çeşidi bulunur. Başlıca iki ana grupta toplanabilir: Asenkron motorlar (indüksiyon motorları) ve senkron motorlar. Bu motorların asenkron modelleri basit yapılı ve çok ekonomiktir. Senkron modelleri ise, büyük güç gerektiren alanlarda tercih edilir. Bu motorların temel çalışma ilkesi,

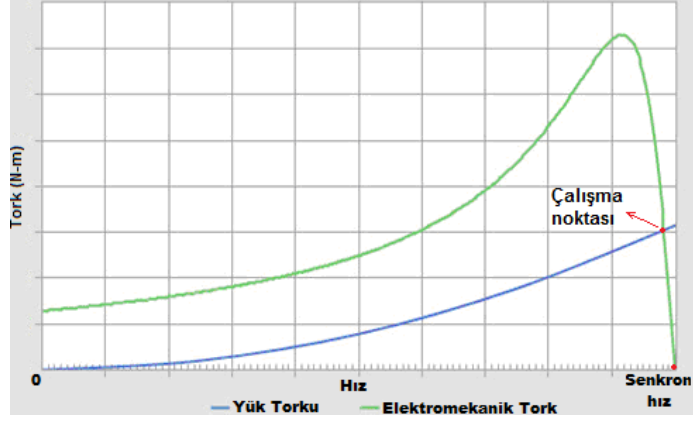
metalden yapılmış bir kütlenin(rotor), döner bir elektromanyetik alan yardımıyla sürüklenmesine dayanır.

Bu iki grup motorlarda da ortak eksenli iki yapı bulunur: Sabit stator ve hareketli rotor. Senkron motorların statorları asenkron motorların statoruyla aynı yapıya sahiptir. Stator birbirlerinden yalıtılmış kat kat manyetik saclardan bir paket şeklindedir. Bu paket üzerindeki kanallara üç fazlı akımlarla beslenen sargılar yerleştirilir. Senkron motorda rotordaki manyetik alanı, ya rotor sargısını besleyen bağımsız bir doğru akım kaynağı oluşturur, ki bu tip motorların başlıca sıkıntısı rotorun kendi başına harekete geçmemesidir, ya da rotorda sargı yerine sabit mıknatıslar kullanılır.

Asenkron motorun rotor yapısı daha farklıdır. Rotordaki sargı 3 fazlıdır ve stator tarafından oluşturulan akı değişimiyle akım indüklenir. Bu indüksiyon akımları üzerinde döndürme kuvveti oluşur. Rotor başka bir enerji kaynağına ihtiyaç duymaz. Düzenli çalışma sırasında hız motorun yüküne bağlı olarak senkron hızdan (yani döner alan hızından) farklılık gösterir(18).

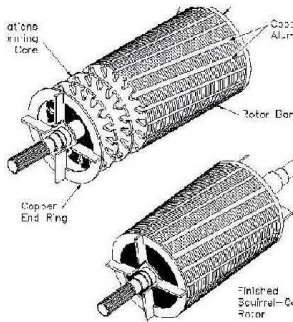
2.4.2.1.Asenkron (Endüksiyon) Elektrik Motorları

Statorun oluşturduğu endüksiyonla rotorun dönmesi sebebiyle asenkron motorlara endüksiyon motorları da denir. Asenkron motorlar dönüş esnasında elektrik arkları oluşturmazlar. Ayrıca diğer motor çeşitlerine göre maliyetleri daha düşüktür ve daha az bakıma ihtiyaç duyarlar. Bu özellikleri, asenkron motorların sanayide en çok tercih edilen motor modeli olmalarına sebep olmuştur. Asenkron motorlar endüstride çoğunlukla motor olarak tercih edilir; fakat jeneratör modunda da çalıştırılabilirler. Asenkron motorları senkron motorlardan ayırt eden en büyük farklılık, sabit frekansta dönme hızlarınının sabit olmamasıdır. Bu hız motor modunda senkron hızdan küçük olup yük arttıkça azalır. Bu motorlara asenkron denilmesi, döner manyetik alan vektörüyle eş zamanlı olmayan bu dönüşünde dolaydır.

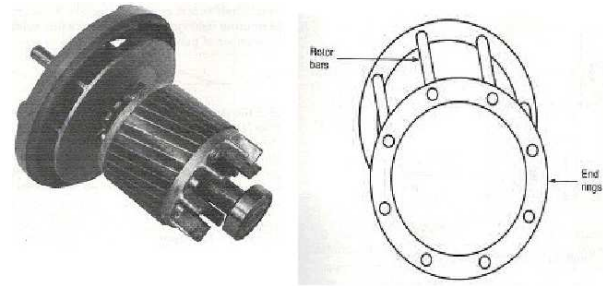


Şekil 2.13. 3 Fazlı asenkron motorun tipik tork hız eğrisi(19)

Asenkron motorlar, kısa devre rotorlu (sincap kafesli) ve sargılı rotorlu (bilezikli) olmak üzere iki çeşittir. Her iki tipte rotorlu asenkron motorun da statorları aynı şekilde yapılır. Asenkron motorun stator kısmı gövde, stator-sac gurupları ve stator sargılarından oluşmaktadır. Rotor kısmı stator içinde yataklanır. Bilezikli asenkron motorun rotor milinin üzerinde rotor sac bloğu ve döner bilezikler bulunmaktadır. Rotor sac bloğu üzerine açılmış kanallara üç fazlı rotor sargıları yerleştirilir. Bu sargılar çoğunlukla yıldız şeklinde, çok nadir olarak üçgen şeklinde bağlanırlar. Bazı durumlarda rotorlarda, iki fazlı sargı yapısına da rastlanır. Bu tür sargılar motorun içerisinde V-devresi şeklinde bağlanırlar. İster üç fazlı, ister iki fazlı yapıda olsun, sargıların uçları rotorun üzerinde bulunan döner bileziklere bağlanırlar. Döner bilezikler sayesinde, sargılarla dış akım devresi arasındaki bağlantı kömürden fırçalar yardımıyla sağlanır. Sincap kafesli asenkron motorda rotor sac bloğu kanallarındaki sargıların yerine alüminyumdan veya bakırdan yuvarlak ve kanatlar şeklinde çubuklar bulunur. Bu çubukların her iki ucunda kısa devre bilezikleri kullanılarak kısa devre edilmişlerdir.

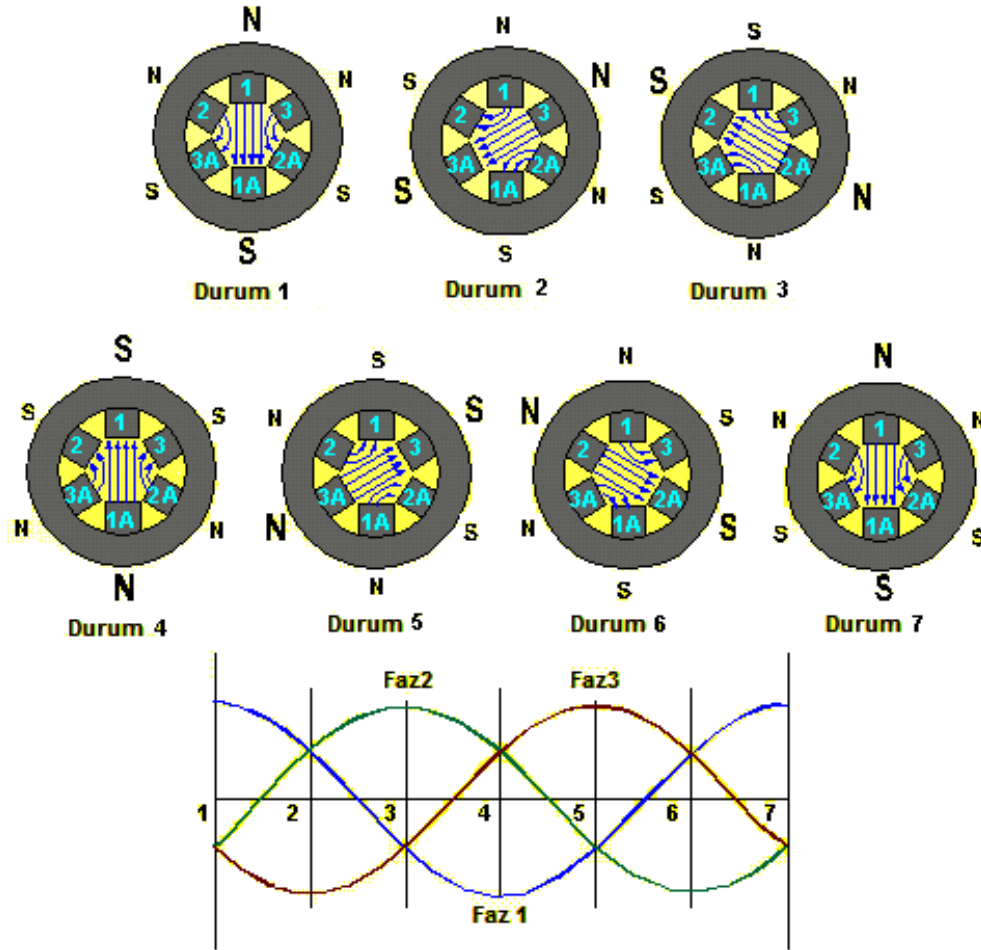


Şekil 2.14. Bilezik tipi rotor



Şekil 2.15. Kafes tipi rotor

Asenkron motorların kullanılacağı yere göre birçok özel yapımları mevcuttur. Bir çeşidi rotor kısmı dışarısında, statoru kısmı içerisinde bulunan dıştan rotorlu asenkron motorlardır. Diğer bir çeşidi rotor sargısı olmayan kütleli rotorlu asenkron motorlardır. Bir diğeri iki fazlı asenkron motorlardır. İki fazlı asenkron motorlar, eylemsizlik momentinin çok küçük olması istenen durumlarda tercih edilir. Rotoru bakır veya alüminyumdan oluşan boş bir silindir yapı olan ferraris motoru gibi çeşitleri de bulunmaktadır. Sincap kafesli ve bilezikli asenkron motor dahil, bütün türlerinin çalışma ilkesi aynıdır.



Şekil 2.16. Asenkron motorda üç fazda oluşan manyetik alanlar ve giriş voltajları(21)

Sanayide ve diğeri birçok alanda kullanılan sincap kafesli asenkron motor yapımı en kolay, en dayanıklı, işletme güvenliği en yüksek, bakım gereksinimi en az ve en yaygın olarak tercih edilen elektrik motorudur. Normal kafes yapıları asenkron motorun sakıncası kalkış momentinin nispeten küçük ve kalkış anında akım ihtiyacının büyük olmasıdır. Bu sorunu giderilen akım yığılmalı asenkron motorlarda

ise kafes uzun çubuklu yapıya sahip, çift çubuklu yapı gibi özel biçimlerde yapılmaktadır. Çok küçük yapılı ve küçük güçler için tasarlanan tek fazlı asenkron motorlar da çoğunlukla sincap kafeslidir.

Bilezikli asenkron motorların yararı ise, ek dirençler kullanılarak kalkışta ihtiyaç duyulan akımın arzu edildiği şekilde azaltulabilmesi ve kalkış ve frenleme momentinin artırılabilir olmasıdır(20).

2.4.2.2. Senkron Motorlar

Senkron motor, asenkron motordan farklı olarak frekans sabitken belirli bir yüke kadar sabit hızda çalışan bir alternatif akım motor çeşididir. Bu yüzden sanayide motor olarak pek tercih edilmezler. Senkron motorlar, jeneratör modunda elektrik üretimi amacıyla, santrallerde ve benzeri elektrik üretim merkezlerinde en çok tercih edilen motor modelidir. Bu tip jeneratörler 2000 MVA güç seviyelerine kadar üretim yapabilmektedir. Büyük güçlerde üretilebilmesi, birim güç başına maliyetlerinin diğer motor çeşitlerine göre düşük olması, artan güç ile verimlerinin yükselmesi, ayrıca bakım ve kontrol ihtiyacının az olması jeneratör olarak tercih edilme nedenleridir.

Senkron motorlar diğer AC motorlar gibi stator ve rotor olmak üzere iki kısma sahiptir. Rotor yapılarına göre iki gruba ayrılır: Stator ve rotor arasındaki hava boşluğu motorun her yerinde sabitse silindirik rotorlu, statorun çevresel yapısının düzgün olmasına karşın rotor dış çevresi düzgün değilse de çıkık kutuplu senkron motorlar denir. Silindirik rotorlu senkron jeneratörler çoğunlukla az kutuplu ve yüksek senkron hızlar için üretilmekte ve yüksek devirli buhar türbinlerinde daha çok tercih edilmektedir. Çıkık kutuplu senkron jeneratörler ise genellikle çok kutuplu olarak ve düşük senkron hızlar için üretilmektedir. Bu tip senkron motorların rotor boyları kısa, çapları geniş olmaktadır. Düşük hızlarından dolayı hidroelektrik santrallerde tercih edilirler.

2.4.2.3.Fırçasız Doğru Akım Motorları

Fırçasız doğru akım motoru, sargılarının anahtarlanması fırçalı motorlardan farklı olarak mekanik değil elektronik olarak sağlanan bir motor çeşididir. Elektronik bir denetleme mekanizmasında, yüksek akımı anahtarlama görevi gören transistörler (IGBT) ve anahtarlama zamanını ayarlayan mikrodenetleyici bulunmaktadır. Motorun dönüşü sırasında bir sorun olmaması için denetleme mekanizmasının uygun bir süratle rotorun takibini yapması gerekir. Bunun için rotorun anlık pozisyonunun tespit edilmesi gerekir. Birçok uygulamada Hall-effect sensörleri kullanılmak suretiyle rotor pozisyonu rahatlıkla belirlenir.

Fırçasız doğru akım motorları iki ayrı tasarım yapısına sahiptir. İlk yapıya göre, rotor içeride stator dışta; diğerinde ise stator içeride rotor dışta bulunur. Bu yapıdaki motorlar birçok yerde kullanılmaktadır. Özellikle doğrudan tekerden tahrikli seri hibrit araçlarda teker sisteminin içine yerleştirilerek en az mekanik kayıpla araç sürüşü sağlanmaktadır.



Şekil 2.17. Dıştan rotorlu fırçasız DC motor

Fırçasız doğru akım motorlarının verimleri fırçalı doğru akım motorlarından daha yüksektir. Aynı elektrik gücü uygulandığında fırçasız motorlarda daha yüksek tork ve devir alınmaktadır. Fırçasız motor sahip olduğu özellikler sebebiyle birçok

uygulamada kullanılmaktadır. Yüksek güç gerektiren uygulamalarda ise doğrudan sürüş(direct drive) olarak adlandırılan yöntemle, sanayide ve elektrikli araçlarda kullanılırlar. Bu şekilde kullanımlarda besleme gerilimindeki dalgalanmalardan (düşüş ve yükselişlerden) kaynaklanan sorunların giderilmesi sağlanmaktadır. Bu tip motorlar az yer kaplamaları, birçok hız aralığında çalışabilmeleri, diğer motorlara oranla aynı besleme değerlerinde daha fazla güç sağlamaları ve jeneratör konumundaki kazanımlarının birçok motor modelinden daha iyi olmaları sebebiyle hibrit araçlarda ana elektrik motoru olarak çok tercih edilmektedirler.

2.4.2.4. Servo Motorlar

Servo motorlar genellikle bir sistemde son kontrol elemanı olarak kullanılırlar. Servo motorlar programlanabilir bir milin sahip küçük motorlardır. Servoya gönderilen belirli kodlarla bu milin pozisyonu istenilen açıda değiştirilerek kontrol edilir. Giriş hattındaki kodlu sinyal var olduğu sürece, kontrol ünitesi servo milin pozisyonunu kodun istediği şekilde sabit tutar. Kodlar değiştikçe milin açısal pozisyonu da değişir. Servo motorlar çoğunlukla belli hızlar ile belli güce göre tasarlanan motorlardan farklı olarak, farklı hız aralıklarında dönmeye göre tasarlanırlar. Servo motorlar sistemlerde kullanıcının farklı pozisyon ve hız gibi komutlarını aynı anda yerine getirebilirler. Servo motorlar geniş bir hız aralığı içerisinde devir sayılarını düzgün hızlı ve kararlı bir şekilde değiştirerek büyük momentlere ulaşabilirler. Hibrit araçlarda mekanik sistemlerin kontrolünde bunlardan yararlanılır(22).

2.5. Pil Modelleri

Piller kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen ve çeşitlerine göre elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürerek depolayabilen cihazlardır. Pil veya batarya olarak adlandırılırlar. Bu kimyasal dönüşüm tek taraflı ise pil primer yapıda yani tek kullanımlık veya şarjı mümkün olmayan bir yapıya sahiptir. Dönüşüm her iki taraflı olabiliyorsa, yani elektrik enerjisi tekrar kimyasal enerjiye çevrilebiliyorsa ve bu şekilde uzun süreli enerji kullanımı sağlanabiliyorsa pil sekonder yapıda veya diğer adıyla şarj edilebilirdir.

Pil teknolojisi hibrit araçların geçmişten günümüze gelişimini önemli ölçüde etkilemiş ve etkilemeye devam etmektedir. Hibrit araçlar kendi sistemlerinde üretilen elektriğin depolanıp, tekrar kullanılabilmesi için içerisinde birçok pilin bulunduğu batarya bloğuna ihtiyaç duyarlar. Bu batarya bloklarında kullanılan pillerin verimliliği hibrit araçların verimliliğini doğrudan etkilemektedir.

Pil 1800 yılında bulunmuştur. Galvani, 1780 yılında yaptığı deneylerin sonuçlarını 1791'de açıklayarak "hayvansal elektrik" teorisini ortaya atmıştır. Bu teorisini, ölü bir kurbağanın bacağındaki sinirlerin neşter ile kesildiğinde kasıldığını gözleyerek oluşturmuştur. Buna göre, canlıları oluşturan hücreler elektrik enerjisine sahiptir.

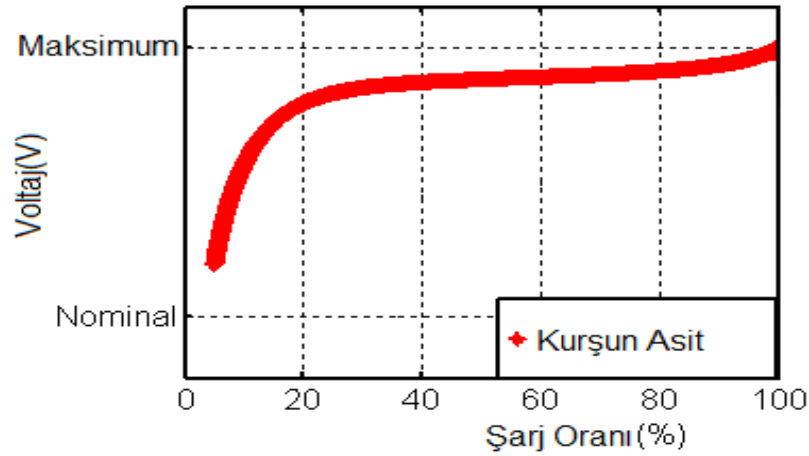
1793'de Galvani'nin deneylerine devam eden Alessandro Volta, kurbağa bacağı kasılmalarının farklı iki metalden kaynaklandığını bulur. Bacağın uyarılmasının, birbirine benzemeyen iki farklı metalden ve hücrelerin sıvı içermesinden kaynaklandığını tespit eder. Elektrik elde edebilmek için iki farklı metale ve sıvıya ihtiyaç olduğunu bulur. Bundan yararlanarak bakır ve çinko madenleri ararak aralarına tuzlu suya batırılmış süngerler yerleştiren Volta, elektrik akımını elde etmeyi başarır. Böylece Volta Pili adı verilen pili bulmuş olur(1800). Ölümünden 54 yıl sonra 1881'de Volt adı, elektrik potansiyel birimi olarak onun anısına ithafen kullanılmaya başlanır(23).

Pillerin sahip oldukları elektrik enerjilerinin kullanımları sonucunda azalmasına boşalım veya deşarj denir. Pillerin tam dolu iken sahip oldukları enerjinin hepsini kullanmak normal şartlarda mümkün değildir. Pillerin tam dolu iken sahip oldukları enerjisinin kullanılabilirlik oranı her pil modeli için farklılık gösterir. Bu orana aynı zamanda boşalım oranı da denir ve genellikle yüzde(%) ile belirtilir. Şarj edilebilen pillerde her pil için yapısına göre sahip oldukları enerjinin, tamamına yakınının kullanımı pili tekrar kullanılamaz hale getirebilmekte veya verimlerini çok düşürmektedir. Bu sebeple pillerin doluluk oranına göre verimli kullanım aralıkları bulunmaktadır.

Günümüzde yapısına göre birçok şarj edilebilir pil çeşidi mevcuttur. Hibrit araçlarda genel olarak en çok tercih edilen piller; kurşun asit pilleri, nikel-kadmiyum piller, nikel-metal piller ve lityum-iyon piller olarak sıralanabilir.

2.5.1. Kurşun Asitli Piller

Kurşun asit pilleri çoğunlukla sıralı altı adet hücre şeklinde, akü ismiyle otomobillerde yaygın olarak kullanılırlar. Bu tür pillerde anot kurşundan, katot kısmı ise bir metal levha üzerine oturtulmuş kurşun dioksitten oluşmaktadır. Katot ile anot, elektrolit görevi yapan sülfürik asit çözeltisi içerisinde bulunur. Standart koşullarda bir hücre 2V'luk doğru gerilim üretebilir. Kurşun asit pilleri tekrar dolabilen bir yapıya sahiptir. Eğer pile dışarıdan bir voltaj uygulanırsa, bataryanın kullanımı sırasında reaksiyonda oluşan ürünlerin elektrolizi olur. Bunun sonucunda pilin çalışmasını sağlayan maddeler yenilenir. Kurşun asit pillerinin belirli bir kullanım ömürleri vardır. Zaman içerisinde asit seviyelerinde azalmalar gösterirler. Verdikleri gerilimler bulunduğu ortamın sıcaklığından etkilenir. Şarj durumundaki kazanım oranları diğer pil modellerine göre daha düşüktür(24).



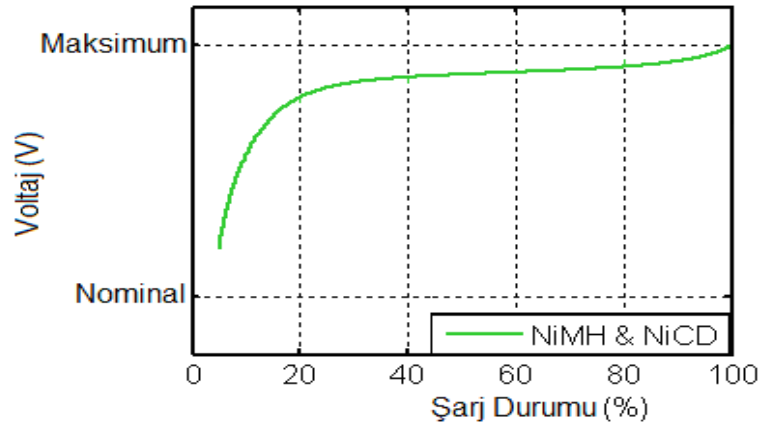
Şekil 2.18. Kurşun Asit Pilin şarj durumu-voltaj eğrisi(25)

2.5.2. Nikel-Kadmiyum Piller (Ni-Cd)

Nikel ve kadmiyumdan yapılmış pillerdir. Tam dolu iken en çok 1,44 Volt değerine ulaşabilirler. Her seferinde 1,2 voltluk boşalma değerine düşmelerinden sonra ve

belli sıcaklık aralığında kullanıldığında 10000 defa dolun ömürleri vardır. Bu pil modeline herhangi bir gerilim uygulandığında tam dolun olmasa da dolun ömürlerinden düşmektedir. Uzay sanayinde uzun yıllar bu piller kullanılmıştır. Boş durumdayken 1,2 Voltun altında düşürülmemesi gerekir. Verimlerinin azalmaması için 1,1 Volt geriliminde mutlaka şarj edilmelidir. Bunun sağlanması için özel şarj sistemleri mevcuttur. Bu pillerin güç eğrilerinde keskin düşüş görülür. Yani kullanımları sırasında güçleri birden düşer. Birçok cihazda, özellikle elektrikli traş makinelerinde kullanılan nikel-kadmiyum pillerinin 220 V kondansatörlü şarj devreli akım düzenleyicileri bu piller için iyi bir şarj sağlamaktadır. Bu pilleri şarj etmek için yapılacak şarj cihazının voltaj değerini yüksek tutmak ve akım düzenlemesi yapmak gerekmektedir. Bu pillerin şarjı esnasında değişik metotlar kullanılır. Bunlar pilin ömrünü uzatmak için yapılan yöntemlerdir. Tam boşalmamış durumdayken şarj edilmesi tavsiye edilmez. Aksi durumda pil hafızasında tuttuğu bu noktadan ileriye doğru şarj olur bu da kapasitesini düşürmüştür olur. Bu tip piller önce şarj makinelerindeki bir sistem sayesinde boşaltılmakta, daha sonra şarj edilmektedir.

2.5.3. Nikel-Metal Piller (Ni-MH)



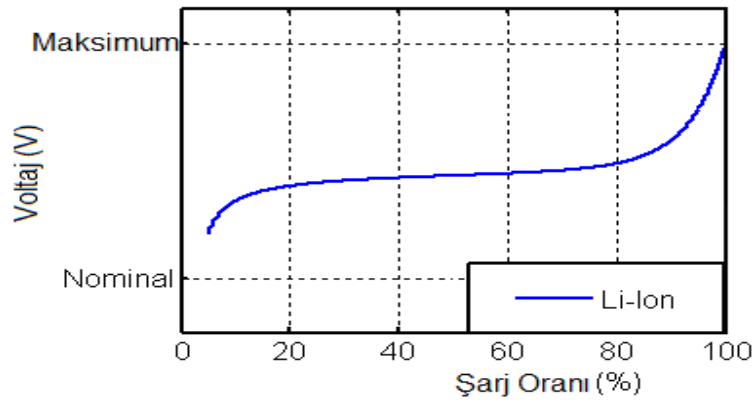
Şekil 2.19. Nikel-Kadmiyum ve Nikel-Metal Pillerinin şarj durumu-voltaj eğrisi (25)

Nikel-metal piller nikel kadmiyum pillerden sonra geliştirilmiş bir pil çeşididir. İsmi bileşenlerinden almıştır. Bu pillerde kadmiyum elementinin yerine metal(krom, kobalt mangan ve demir) bileşeni kullanılmıştır. Ni-Cd pillere göre daha yüksek enerji saklama kapasitesine sahiptir. Şarj edilmeleri Ni-Cd pillerdekine çok benzer. İç direnç Ni-Cd pillerde daha yüksektir. Bu nedenle kullanılmadığında

bu piller kendi içinden bir sızıntı akımıyla zaman içerisinde boşalır. Bu olay Ni-MH pillerde daha hızlı gerçekleşir ve daha kısa sürede boşalır(26).

2.5.4.Lityum-İyon Piller (Li-ion) ve Hibrit Araçlarda Kullanım Sebebi

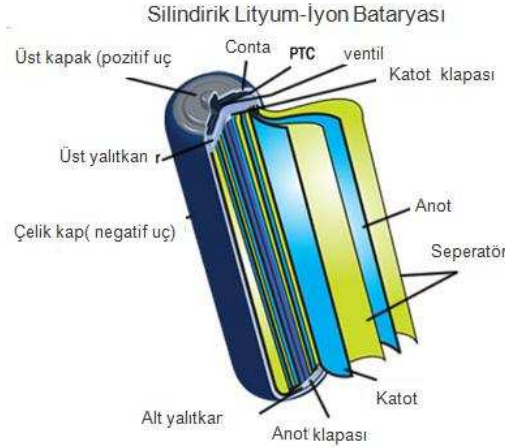
Bu pil türü de ismini diğer pillerde olduğu gibi bileşeninden (Lityum) almıştır. Diğer şarj edilebilen pillere göre daha yüksek kapasiteli ve daha verimlidir. Hafiftirler ve kendi kendine boşalmaları çok yavaştır. Hafıza etkisi bulunmamaktadır; yani istenildiği zaman şarj edilebilirler. Boşalmaları düzgündür ve bir anda boşalmazlar. Şarj olmaları Ni-Cd ve Ni-MH pillere göre biraz daha zordur. Buna rağmen bir yandan kullanılıp bir yandan da şarj edilebilirler. Hem voltaj hem de akım ayarlaması ile şarj olabilirler.



Şekil 2.20. Lityum İyon Pilin sarj durumu-voltaj eğrisi(25)

Lityum-iyon piller çoğunlukla diğer pillerden daha hafiftir. Elektrotlar hafif lityum ve karbondan üretilmektedir. Lityumun aktif bir element olması sebebiyle atomik bağlarının arasında bol miktarda enerji depolanabilir. Bu da yüksek enerji yoğunluğuna sahip piller olmasını sağlar. Standart bir kilogramlık Lityum iyon pili içerisinde 150 Wh enerji depolamak mümkündür. Aynı ağırlıkta standart bir Nikel Metal pilde ise ortalama 60-70 Wh civarında bir enerji depolamakta birlikte, en fazla 100 Wh'e kadar çıkılabilmektedirler. Kurşun asit pilde ise bu enerji saklama oranı 25 Wh yani Lityum-iyon pilin 1/6 oranındadır. Lityum-iyon piller hiç kullanılmadan bir ay beklediği durumda sahip oldukları enerjinin %5'ini kaybederler. Bu oran Nikel Metal pillerde %20 oranındadır. Lityum-iyon pillerde diğer pillerden farklı olarak

hafıza etkisi bulunmaması sebebiyle herhangi bir doluluk oranında şarj edilebilirler ve kullanılabilirler. Bu durum kullanım ömürlerini ve kullanılabilir kapasitelerini etkilememekte, diğer pillere göre daha uzun ömürlü olmalarını sağlamaktadır.



Şekil 2.21. Lityum-İyon Pilin yapısı(27)

Lityum iyon pillerin olumsuz yönleri ise öncelikle üretildikleri andan itibaren özelliklerini kaybetmeye başlamalarıdır. En çok 2 ila 3 yıl içerisinde kullanılsa da, kullanılsa da bütün özelliklerini kaybederler. Sıcaklık, özelliklerini kaybetmesini hızlandırır. Tamamen boşalması durumunda bozulabilirler. Bozulduğu durumlarda patlama ihtimalleri vardır.

Bu piller verimli çalışma aralığı ve ortalama %40 doluluk oranına kadar boşalmalarında sabit gerilim verip, her doluluk oranında şarj olabilmeleri, yüksek miktarda enerji biriktirebilmeleri ve ömürlerinin diğer pil modellerine göre daha uzun olması sebebiyle hibrit araçlarda en çok tercih edilen batarya modelleridir. Bu pillerin hafızalı yapıda olmaması en küçük kazanımlı frenleme sırasında bile kazanılan enerjinin bataryalarda saklanabilmesini sağlamıştır.

Genellikle modern hibrit araçlarda Li-ion batarya blokları, motorun ısisından en az etkileneceği arka bagaj kısmının altına yerleştirilirler. Bu sayede çalışma performansları ile kullanım ömürlerinin daha uzun olması sağlanmış olur.

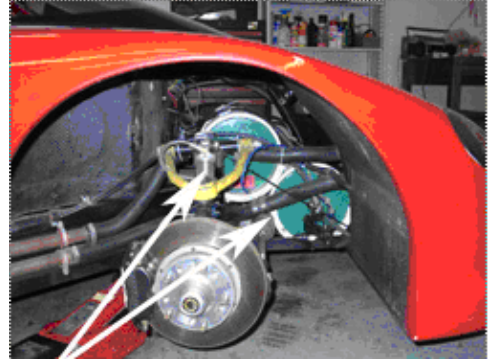
2.6. Süper Kapasitörler

Kapasitörler bir çeşit enerji biriktirme araçlarıdır. Süper kapasitörler, bilinen kapasitör modelinin geliştirilmiş daha büyük halidir. Enerji yoğunlukları bataryalara göre daha azken(15 Wh/kg gibi) güç yoğunlukları yüksektir(4,000 W/kg gibi). Şarj olma süreleri kısa ve çevrim ömürleri bataryalara göre daha fazladır. Bir süper kapasitörde plakaların arasındaki boşluk katı polimerden oluşan elektrolitle doludur. Burada plakalar, bataryalarda olduğu gibi elektrotlu olmasına rağmen bataryalardaki gibi kimyasal reaksiyonlar meydana gelmez, sadece elektrot yüzeylerinde iyonlaşma gerçekleşir. Elektrotlar çok yüksek yüzey alanına sahip delikli malzemeden yapılmıştır. Süper kapasitörlerde elektrostatik yükler iyonlar şeklinde elektrolitte depolanmaktadır.

Süper kapasitörlerin dolumu hızlı olduğu için anlık elektriksel kazanımları bataryalara göre daha iyi saklayabilmekte ve aracın kalkış gibi anlık yüksek enerji ihtiyaçlarına bataryalardan daha iyi cevap verebilmektedir. Bu sebeple günümüzde birçok hibrit araç üreticisi batarya sistemine destek enerji kaynağı olarak süper kapasitörler kullanmaktadır.



Şekil 2.22. Süper Kapasitör(28)

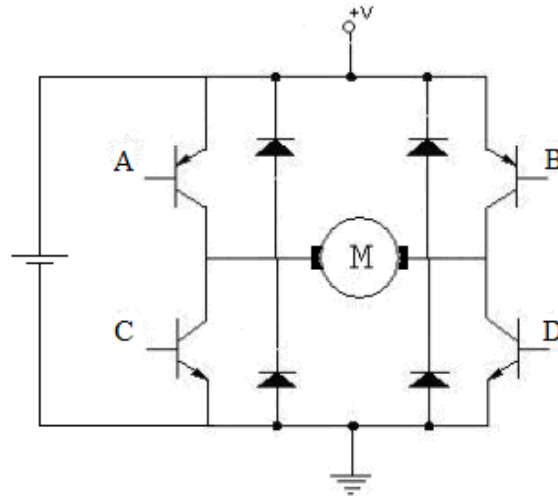


Şekil 2.23. Süper Kapasitörlerin araç içi yerleşimi(29)

2.7. Evirciler

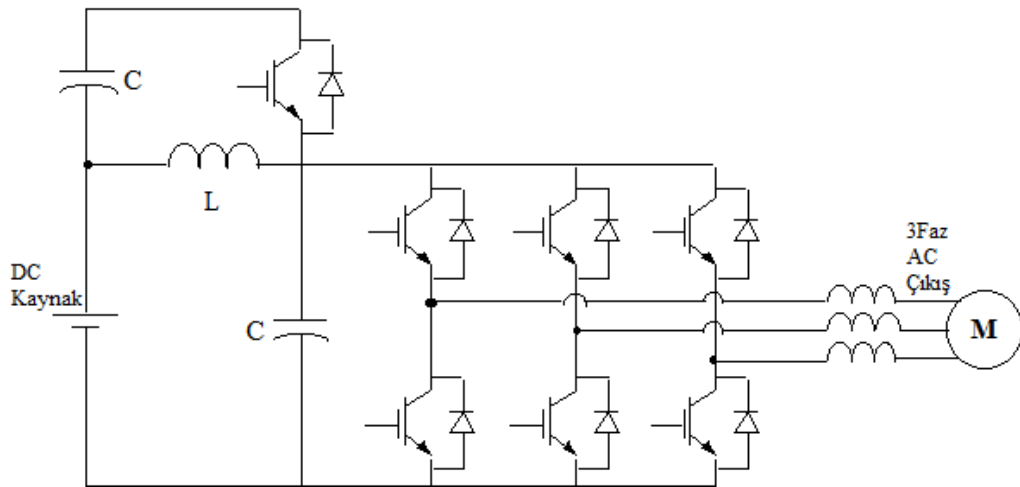
Gerilim kaynağı armatüre ters yönlü bağlandığında motorun dönüş yönünün tersine değiştiği görülür. DC motorlarda yön kontrolünü sağlayabilmek için H köprüsü denilen bir yapı geliştirilmiştir. H köprüsü genelde 4'er adet transistor ve diyot ile

yapılmakta ve motorun iki yönde de dönüşü sağlanmaktadır. Hem DC kaynaktan motora doğru, hem de jeneratör modunda kaynağa doğru enerji iletimi mümkündür.



Şekil 2.24. H-Köprüsü bağlantı şekli

Eviriciler doğru giriş gerilimini dalgali çıkış gerilimine çeviren güç elektroniği devreleridir. Elektrikli taşıt tahrik sistemlerinde, 3 fazlı gerilim beslemeli PWM (Darbe genişlik modülasyonu) eviriciler, asenkron ve sürekli mıknatıslı motor kontrollerinde kullanılmaktadır. Günümüzde anahtarlama elemanı olarak çoğunlukla yüksek güç ve frekansta anahtarlama yapabilen IGBT'ler (yalıtılmış geçitli çift kutuplu transistörler) tercih edilmektedir. Genel olarak tüm güç elektroniği devrelerinde kullanılan anahtarların nominal gerilimi, anahtarlama sırasında oluşan gerilim yükselmeleri nedeniyle, bara geriliminin iki katı kadar seçilir.



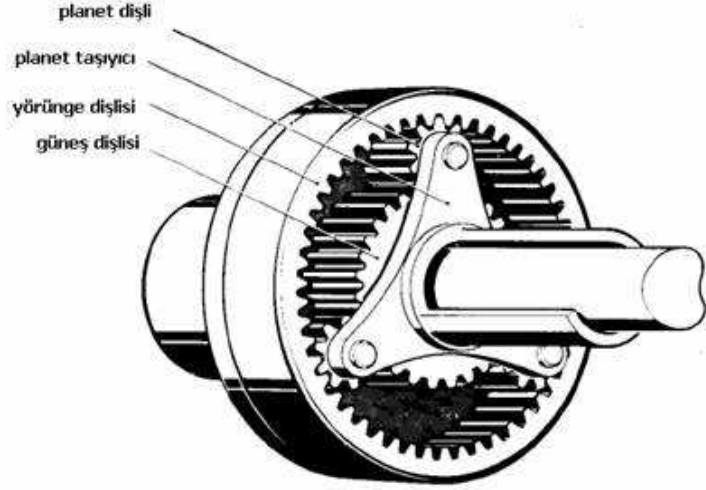
Şekil 2.25. Üç fazlı bir evirici modeli(30)

İdeal eviricinin çıkış akımı sinüzoidal dalga şeklinde olmalıdır. Ancak uygulamada tam sinüzoidal olmayıp harmonikler içerir. Çıkış akımındaki harmonikler, yüksek hızlı yarı iletken anahtarların çeşitli anahtarlama teknikleri kullanılarak kontrol edilmesiyle azaltılabilmektedir(31).

2.8. Gezegen Dişli Sistemi

Dişli çarklardan oluşan gezegen mekanizmasında, bir ya da daha çok sayıda dişlinin merkezi, bir başka dişlinin çevresinde bir çember çizerek dolaşır. Gezegen dişli sisteminin avantajı, fazla yer kaplamadan ve dişlilerin birbirlerine geçirilip ayrılmasına gerek kalmadan, bir dizi dişli oranı sağlamasıdır. Bunlar, otomatik transmisyon sistemlerinde çok kullanılan bir yapıdır. Göbekten vitesli yapıya sahip bisikletlerin göbek dişlisi de gezegen mekanizması biçiminde çalışmaktadır.

Gezegen dişli mekanizması üç ana parçadan oluşur. Bunlardan birincisi merkezdeki güneş dişli, ikincisi bir taşıyıcı üstüne monte edilmiş bir ya da daha çok sayıda gezegen dişli, son parçası ise çevredeki bir çember dişlidir. Güneş dişli bir şafta bağlanır. Planet dişli taşıyıcısı da, aynı ekseninde yer alan başka bir şafta takılır. Planet dişli taşıyıcısı, şafta dik duran bir ya da daha çok koldan meydana gelen bir direğe benzer. Bu kollardan her birinde, şafta paralel bir mil bulunmaktadır. Millerin üstüneyse, serbestçe dönebilen birer planet dişli takılıdır. Genellikle, yükü dağıtmak için, üç planet dişliden de yararlanır. Ama bunlar birbirinin aynıdır ve sayılarının artması, sistemi etkilemez. Planet dişliler, şafttan ve birbirlerinden eş uzaklıkta yer alırlar; güneş dişliye geçmek suretiyle, onun çevresinde dönerler. Çember dişliyse, iç yüzeyinde dişler bulunan bir jant ya da halkadır. Çember dişli, sistemi bütünüyle içine alır ve planet dişliler, bir yandan güneş dişlinin çevresinde dönerken, bir yandan da çember dişli üstünde dönerler. Çember dişliye yörünge dişlisi de denir.



Şekil 2.26. Gezegen Dişli Sistemi(32)

Sistemin içindeki parçalardan birinin çevrilip, ikinci bir parçadan çıkış gücünün alınması ve üçüncü parçanın dönmeyecek biçimde kilitlenmesiyle, değişik dişli oranları elde edilir. Sözelimi, güneş dişli çevrilip çember dişli kilitlenirse, planet dişli taşıyıcısı, güneş dişliyi aynı yönde ve daha düşük bir hızla izleyecektir. Planet dişli taşıyıcısı kilitlenirse, çember dişli, güneş dişliyle aynı hızda, ancak ters yönde dönecektir. Planet dişli taşıyıcısı çevrilip güneş dişli kilitlenirse, çember dişli aynı yönde daha hızlı olarak dönecektir. Bütün sistemin olduğu gibi kilitlenip, hareketin şafta benzer biçimde doğrudan iletilmesi gibi başka düzenlemeler de yapılabilir.

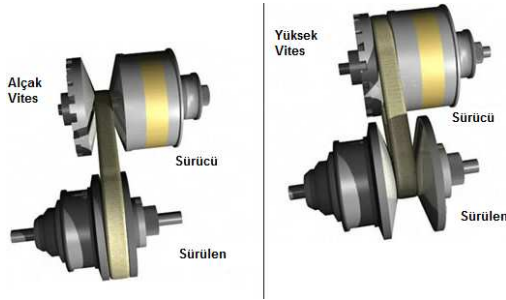
Hibrit araçlarda gezegen dişli sistemi farklı mekanik enerji kaynaklarında üretilen torkların paylaşımını sağlamaktadır. Örneğin aracın duruşu sırasında gezegen dişli sistemi vasıtasıyla içten yanmalı motordan elde edilen dönüşün tekerleklere iletimi kesilip, dönüşün elektrik motoruna iletimiyle aracın bataryalarının şarj olması sağlanır. Bununla birlikte geri kazanımlı frenleme sırasında tekerlerdeki dönüşün elektrik motoruna iletimini ve ani güç ihtiyaçlarında elektrikli motorun dönüşü ile içten yanmalı motorun dönüşünün aynı anda tekerlere iletimini sağlamaktadır(10).

2.9. Sürekli Değişken Otomatik Şanzıman (Continuously Variable Transmission-CVT)

Sürekli değişken otomatik şanzıman, motorda oluşan dönüşü tahrik miline belirli bir aralık içerisinde istenilen değerlerde ileten ve yeni modellerinde hidrodinamik

prensipleri kullanarak çalışan bir güç iletim sistemidir. Bu sistemde mekanizmaların ve kasnak çaplarının değişmesi prensipleri kullanılmaktadır. Modern CVT sistemleri, temas yüzeyleri fazla derin olmayan koni şeklinde ve genişlikleri değişken bir çift kasnak arasında çalışan, çok sayıda plakalardan meydana gelen bir kayıştan oluşmaktadır. Taşıt hızı ne olursa olsun motor hızının ayarlanabilmesi, CVT sistemlerin rahatlıkla gerçekleştirebildiği bir işittir. Bu özellik CVT sistemlerinin birçok otomobil üreticisi tarafından tercih edilme nedenidir.

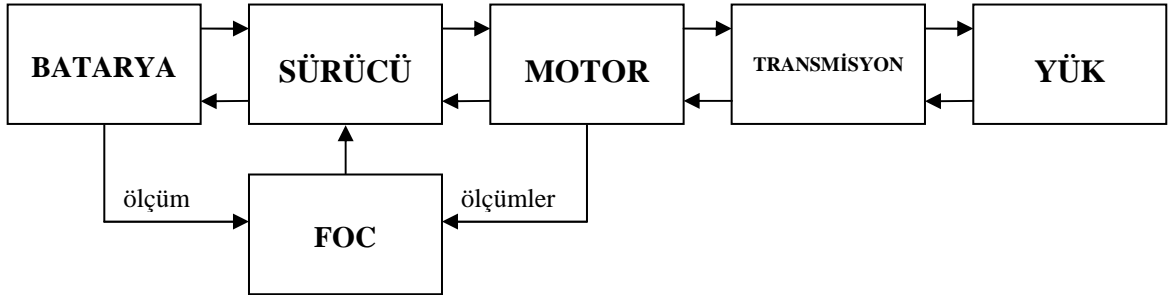
CVT sistemi diğer dişli geçiş sistemlerinde oluşan, vites değişikliği sırasında araçtaki sarsıntı ve anlık motor yüklemelerini ortadan kaldırmaktadır. CVT sistemi yeni model hibrit araçlarda en çok tercih edilen transmisyon sistemidir. Bu sistem sayesinde motordaki devir belirli oranlar içerisinde tutularak aracın hızını artırmak ya da azaltmak mümkündür. Bu da senkron motorların hibrit araçlarda kullanımı kolaylaştırmaktadır(33).



Şekil 2.27. Modern tip CVT modeli(34) **Şekil 2.28.** Basit yapılı CVT modeli(35)

3. MODELLEME VE SİMÜLASYON

Bu tezdeki hibrit araç elektrik motoru denetim modeli Şekil 3.1'deki gibi bir blok şemaya sahiptir. Batarya, jeneratör modunda çalışan motorun ürettiği elektriği depolar ve aracın elektrik ihtiyacını sağlar. Bu çalışmada Lityum-iyon batarya modeliyle çalışılmıştır. Motor olarak asenkron motor kullanılmış olup bazen motor bazen jeneratör modunda çalıştırılmaktadır. Kontrol bloğu asenkron motor için alan yönlendirmeli kontrol kullanmakta olup sürücünden belirli bir referans voltajı gerçekleştirmesini talep eder. Sürücü bloğunun ise uzay vektör modülasyonu ile bu referans voltajını motora uyguladığı varsayılmıştır. Transmisyon bloğunda aracın dişli geçiş oranlarıyla, araca etki eden kuvvetlerin motor tarafından tork, sürtünme katsayısı, ve eylemsizlik momenti cinsinden algılanma biçimi modellenmiştir. Yük olarak ise yol şartlarına göre araç üzerindeki kuvvetlerin modellenmesi yapılmıştır.



Şekil 3.1 Hibrit araçlarda elektrik motorunun kontrol blok şeması

Buradaki her bir bloğun ayrıntılı kullanımı sırayla anlatılacaktır.

3.1.Batarya

Batarya hibrit araçlarda en önemli parçalardan birisidir. Araçta bulunan elektrik motorunun elektrik ihtiyacını araçta bulunan bataryalar karşılar. Bu da elektrik motorun çalışma süresini ve performansını belirleyen önemli unsurlardan birisidir. Geri kazanımlı frenleme sırasında üretilen elektrik bu batarya sistemi içerisinde depolanmaktadır.

Modelde Li-ion batarya kullanılmıştır ve bunun matematiksel model denklemleri şu şekildedir(25):

Akünün boşalma modeli ($i^* > 0$) :

$$f_1(i_t, i^*, i) = E_0 - K \times \frac{Q}{Q - i_t} \times i^* - K \times \frac{Q}{Q - i_t} \times i_t + A \times \exp(-B \times i_t) \quad (3.1)$$

Filtrelenmiş akım :

$$i^* = \frac{E_{batt}}{R_y + r_{iç}} \quad (3.2)$$

Akünün dolun modelinde ($i^* < 0$) ise

$$f_2(i_t, i^*, i) = E_0 - K \times \frac{Q}{i_t + 0.1 \times Q} \times i^* - K \times \frac{Q}{Q - i_t} \times i_t + A \times \exp(-B \times i_t) \quad (3.3)$$

filtrelenmiş akım

$$i^* = \frac{E_{batt} - U}{r_{iç} + r_k} \quad (3.4)$$

Batarya modelimiz toplam 300 adet 6,5 Ah'lik Li-ion pilin seri bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Bunların bütününe ait eşdeğer parametre değerleri şöyle alınmıştır:

$A = 38,88$ V değişken voltaj

$E_0 = 388,86$ V bataryanın başlangıç anındaki voltajı

$K = 0,020622$ Ah⁻¹ polarizasyon sabiti veya polarizasyon direnci de kullanılabilir.

$Q = 6,5$ Ah maksimum pil kapasitesi

$B = 2.5387$ Ah⁻¹ değişken kapasite

$D_{verim} = \%90$ dolma verimi

$E_{tam} = 2780,31$ KW tam dolu enerji

$r_{iç} = 1,38462$ Ω bataryanın iç direnci

E_{batt} :Bataryanın iç direnci üzerindekiyle birlikte anlık voltajı

U :Bataryanın dış uçlarındaki anlık voltajı

i :Batarya akımı(A)

i_t :Ayrıştırılmış kapasite(Ah)

r_k :Bataryanın değişken kapasitesi (Ω)

Bu modelin Matlab programı EK 3'te verilmiştir.

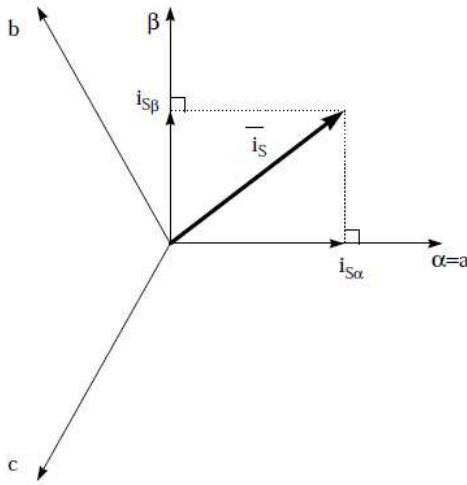
3.2.Motor

Hibrit araçlarda en çok tercih edilen motorlardan birisi sincap kafesli asenkron motor modelidir. Çalışma sırasında alan yönlendirmeli kontrol ile asenkron motor modeli kontrol edilerek motorun hem jeneratör hem de motor modlarında güvenli akım sınırları içinde çabucak ve iyi bir enerji geri kazanımıyla istenilen hız referansına ulaşması amaçlanmıştır.

3.2.1. Koordinat dönüşümleri

Üç fazlı bir sistemin iki fazlı hale dönüştürülmesi ile durgun referans çerçevesinden dönen bir referans çerçevesine dönüşümleri içerir. Asenkron motorların denetiminde de iki faz eşdeğerlerinin kullanılması kolaylık sağlar.

Üç fazdan iki faza dönüşümde, voltaj, akım, akı gibi motora uygulanan üç fazlı herhangi bir vektörel büyüklüğün üç faz eksenini (a,b,c) bileşenleri cinsinden ifadesinden, iki faz eksenini (α,β) bileşenleri cinsinden ifadesine geçiş yapılır. Clarke dönüşümü denilen bu dönüşümün tersinin de alınabilmesi için $\alpha\beta$ bileşenlerinden başka bir de "o" bileşeni tanımlanır. Burada a ve α 'nın aynı yönlü oldukları varsayılarak Şekil 3.2'ye göre dönüşüm elde edilir.

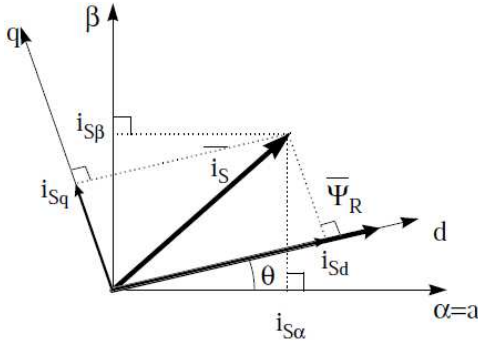


Şekil 3.2. Üç fazlı sistemdeki bir uzay vektörünün iki fazlı bileşenleri

Üç fazdan iki faza ($abc \rightarrow \alpha\beta$) dönüşüm ilişkisi örnek olarak stator akım vektörü (i_s) üzerinde şöyle gösterilebilir:

$$\begin{pmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{so} \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

$\alpha\beta$ eksenleri durgun olduğu ve motor vektörel büyüklükleri hızla döndüğü için vektörlerin $\alpha\beta$ bileşenleri hızlı değişirler. Bazen vektörlerle aynı hızda dönen bir koordinat sistemine göre hesap yapmak kolaylık sağlar. Bu eksene göre bileşenler yavaş değişir. $\alpha\beta$ eksenlerinden d ve q eksenleri olarak adlandırılan bu eksenlere dönüşüm Park dönüşümü olarak adlandırılır ve Şekil 3.3'te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.3. Durgun eksenlere göre bir uzay vektörünün dönen eksene göre bileşenleri

Burada θ , d ekseninin α eksenine göre açısı olup dönüşüm şöyle uygulanır:

$$\begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Bu dönüşüm ortogonaldir. Yani dönüşüm matrisinin tersi transpozuna eşittir. Diğer bir ifadeyle de şu şartı sağlar:

$$i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2 = i_{sd}^2 + i_{sq}^2 \quad (3.7)$$

Alan yönlendirmeli kontrolde bulunan ve dq eksenlerinde hesaplanmış voltaj referans vektörünün durgun $\alpha\beta$ eksenlerine dönüşümü Park dönüşümünün tersiyle yapılır:

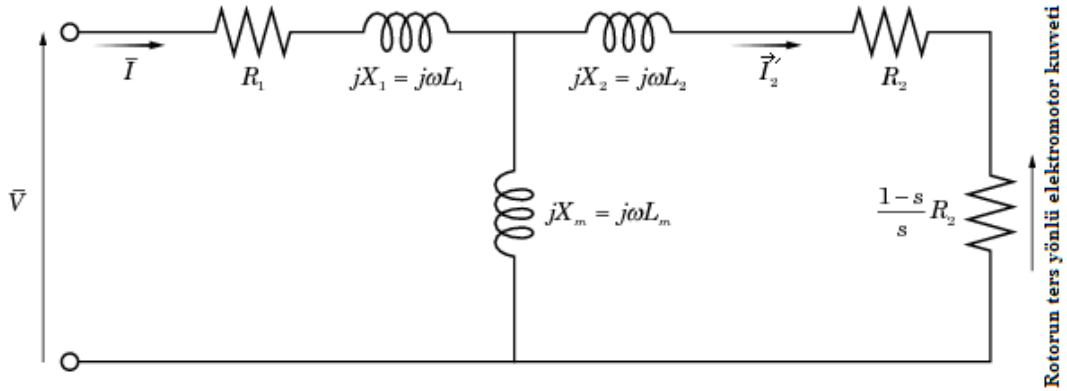
$$\begin{pmatrix} v_{S\alpha ref} \\ v_{S\beta ref} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{Sd ref} \\ v_{Sq ref} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Denklem (3.8)'deki hesap bloğunun çıkışı motorun fazlarına uygulanan referans voltaj uzay vektörünün bileşenleridir.

3.2.2. Asenkron Motor Modeli

Asenkron motorlar farklı hız aralıklarında çalışabilmeleri, ucuz olmaları ve bakımlarının diğer motorlara nazaran daha az olmaları nedeniyle hibrit araçlarda tercih edilmektedir. Bu tip motorların büyük güçler için boyutlarının ve ağırlığının biraz büyük olmaları dezavantajlarıdır. Araç tasarımcılarının en çok yaşadıkları sorun hacim problemidir. Ağırlık ise bir araçta yakıt tüketimini etkileyen en büyük unsurlardan biridir. Bu dezavantajlara rağmen bazı hibrit araç modellerinde sahip oldukları yukarıda bahsedilen iyi özellikleri sebebiyle sincap kafesli asenkron motorlar tercih edilmektedir.

Asenkron motorun sürekli durum modeli tek faza indirgenmiş olarak şöyle bir eşdeğer devreyle verilir:



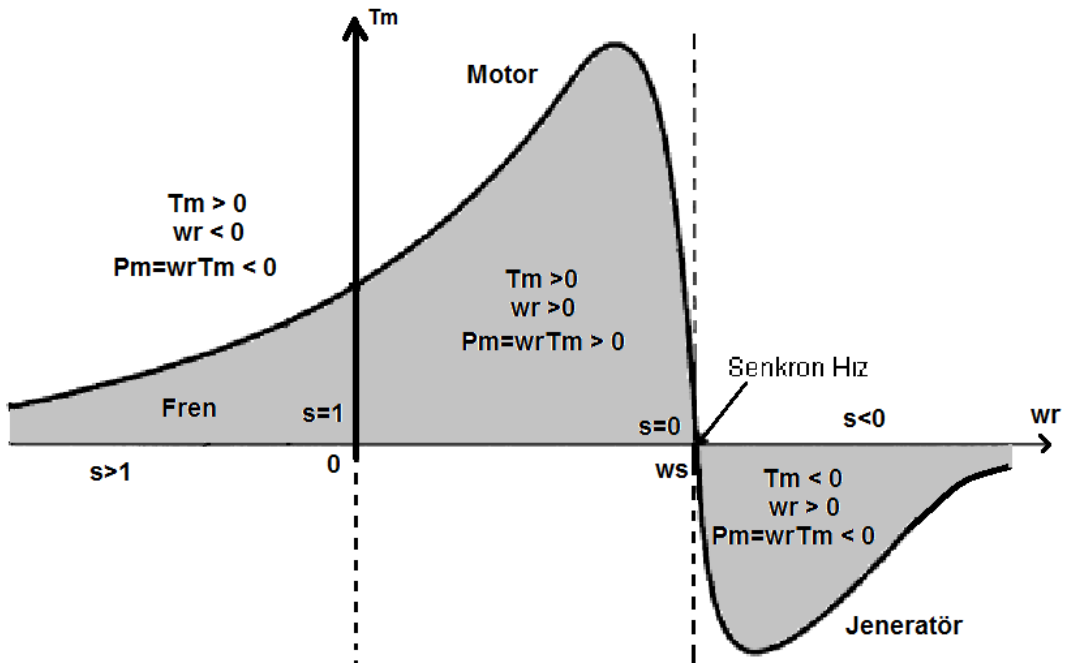
Şekil 3.4. Bir asenkron motorun tek faz eşdeğer devre modeli

Burada,

- R_1 : Stator sargı direnci
- L_1 : Stator kaçak endüktansı
- X_1 : Stator kaçak reaktansı
- X_2 : Rotor kaçak reaktansının statora yansıtılmışı
- L_2 : Rotor kaçak endüktansının statora yansıtılmışı

R_2	:Rotor sargı direnci
$\frac{1-s}{s}R_2$:Elektromekanik güce karşılık gelen direnç
X_m	:Mıknatıslanma akımına karşılık gelen reaktans
s	: Kayma
ω	:Açısal frekans
\bar{V}	:Uygulanan kaynak gerilimi
\bar{I}	:Stator akımı
\bar{I}'_2	:Rotorda oluşan akımın statora yansıtılmışı

Asenkron motorun sürekli çalışmadaki tork-hız eğrisi de Şekil 3.5'da gösterilmiştir. Tork ve hız değerine göre üç ayrı modda çalışır. Bunlar frenleme, motor ve jeneratör bölgeleridir. Hibrit araçlarda arzu edilen, motor ve jeneratör bölgelerinin şoförün talebine göre en iyi şekilde ayarlanarak en kazançlı araç sürüşünün ve yakıt tüketiminin sağlanmasıdır. Hibrit araçlarda asenkron motorun fren modunda çalışması pek istenmez; çünkü motorun fren modunda kullanılması için motora enerji verilmesi gerekir. Bu yüzden frenleme için mümkün olduğunca jeneratör bölgesi tercih edilir.



Şekil 3.5. Asenkron motorun çalışma aralığı

Asenkron motorun herhangi bir ω_g açısal hızıyla dönen dq eksenlerine göre 5. mertebeli modeli şöyledir(41):

$$\dot{i}_d = -\frac{L_r R_s + M^2 / \tau_r}{\sigma L_s L_r} i_d + \omega_g i_q + \frac{M}{\tau_r \sigma L_s L_r} \psi_d + \frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega_r \psi_q + \frac{1}{\sigma L_s} v_d \quad (3.9)$$

$$\dot{i}_q = -\frac{L_r R_s + M^2 / \tau_r}{\sigma L_s L_r} i_q - \omega_g i_d + \frac{M}{\tau_r \sigma L_s L_r} \psi_q - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega_r \psi_d + \frac{1}{\sigma L_s} v_q \quad (3.10)$$

$$\dot{\psi}_d = \frac{M}{\tau_r} i_d - \frac{1}{\tau_r} \psi_d + (\omega_g - \omega_r) \psi_q \quad (3.11)$$

$$\dot{\psi}_q = \frac{M}{\tau_r} i_q - \frac{1}{\tau_r} \psi_q - (\omega_g - \omega_r) \psi_d \quad (3.12)$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{3 n_p^2 M}{2 J L_r} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) - \frac{B_1}{J} \omega_r - \frac{B_2}{n_p J} \omega_r^2 - \frac{n_p}{J} T_c - \frac{n_p}{J} T_L \quad (3.13)$$

Burada sırasıyla L_r , L_s ve M , rotor, stator ve ortak endüktans, R_r ve R_s rotor ve stator direnci, n_p kutup çifti sayısı, J eylemsizlik momenti, T_L yük torku (yolun eğiminin motor üzerinde algılanan etkisi), $\tau_r = L_r / R_r$ rotor zaman sabiti, $\sigma = (L_r L_s - M^2) / (L_s L_r)$ kaçak katsayısı, B_1 ise mekanik açısal hız ω_m ile orantılı sürtünme torku katsayısıdır. Aslında tek başına asenkron motor modelinde bulunmayan ve mekanik açısal hızın karesiyle orantılı olan sürtünme torku katsayısı B_2 , taşıtlarda baskın olan sürtünme kuvveti bileşeninin hızın karesiyle orantılı olmasından dolayı bunun motor tarafından algılanmasını temsil etmek için modele eklenmiştir. T_c ise hareket halindeyken hız yönünde (başındaki eksi işareti ile hıza zıt yönde) sabit olan, durgun halde iken ise hareketin başlaması için aşılması gereken sürtünme torku olup Coulomb sürtünmesi diye adlandırılır ve tekerlerin yuvarlanma sürtünmesinden de kaynaklanır. Ayrıca i_d ve i_q stator akımının, v_d ve v_q statora uygulanan gerilimin, ψ_d ve ψ_q rotor akısının d ve q bileşenleri, ω_r ise rotor elektriksel açısal hızıdır. (3.13) denklemi, mekanik açısal hıza bağlı şu ifadeden türetilmiştir:

$$T_e = \frac{3 n_p M}{2 L_r} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = J \dot{\omega}_m + B_1 \omega_m + B_2 \omega_m^2 + T_c + T_L \quad (3.14)$$

Matlab programında hazırlanan motor modeli EK 1’de verilmiştir. Ana program EK 2’de verilmiştir.

3.3. Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control(FOC))

Bu çalışmadaki üç fazlı asenkron motor, alan yönlendirmeli kontrol (FOC) yöntemiyle kontrol edilmektedir. Bu yöntem bazı koordinat dönüşümleri sonucunda asenkron motorun bir doğru akım motoru gibi kontrol edilmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu, stator akımının akı oluşturan ve tork oluşturan iki bileşene ayrılmasıyla sağlanır. Stator akımının rotor akısıyla aynı yönlü bileşeni akı üreten bileşendir. Buna dik olan ise tork üreten bileşendir. Bunlar sırasıyla DC motorlardaki uyarım ve armatür akımlarına benzer.

Tork ifadesine bakılarak, alan yönlendirmeli kontrolde amaçlandığı gibi stator akımının bileşenlerinden birini mıknatıslanma akımı, diğerini de tork akımı haline getirmek için d ekseninin rotor akı vektörüyle hizalanması, yani $\psi_q = 0$ olması istenir. Böylece T_e ile i_q orantılı olacağından i_q tork akımı bileşeni olacaktır. Aynı zamanda 3.11’e göre ψ_d ’nin denge değeri de Mi_d olur; yani i_d akı üreten bileşen (mıknatıslanma akımı) olur. Bu yüzden mıknatıslanma akımı referansı i_d^* , akı referansından (ψ_d^*) şöyle hesaplanır:

$$i_d^* = \frac{\psi_d^*}{M} \quad (3.15)$$

d eksenini rotor akı vektörüyle hizalamanın doğrudan yolu, rotor akısını ölçerek veya tahmin ederek onun açısına göre α ve d eksenleri arasındaki θ açısına karar vermektir. Ancak bu çalışmada dolaylı yol tercih edilmiştir. Buna göre θ açısı, motora uygulanan açısal frekansın (ω_s) integraliyle bulunur. ω_s ise

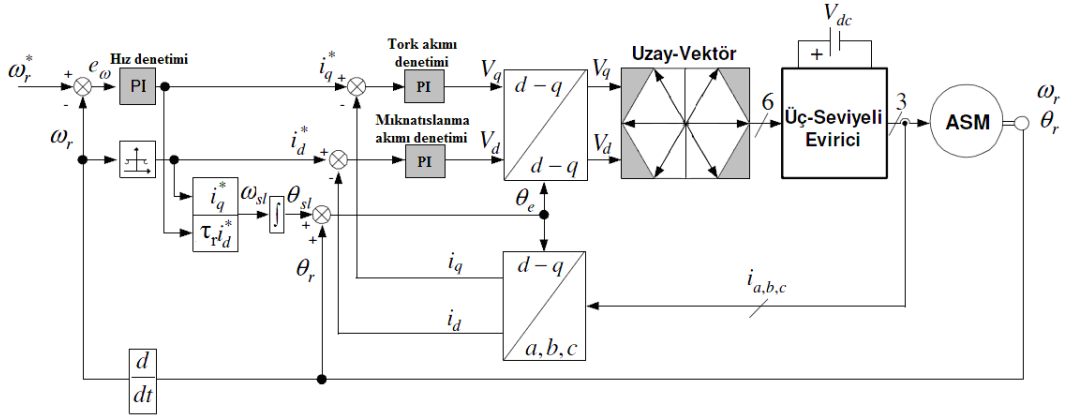
$$\omega_s = \omega_r + \frac{i_q}{\tau_r i_d^*} \quad (3.16)$$

formülüne göre belirlenir ki bu $\omega_r + \frac{Mi_q}{\tau_r \psi_d}$ ’nin denge değeridir. dq eksenlerinin

senkron hızda dönmesi $\omega_g = \omega_s$ seçimiyle sağlanarak(3.12)’e göre $\dot{\psi}_q = -\frac{1}{\tau_r} \psi_q$

elde edilir, ki bu da başlangıçta istediğimiz gibi kısa sürede $\psi_q = 0$ denge noktasına ulaşılmasını sağlar.

Mıknatıslanma akımı referansı akı talebine göre, tork akımı referansı ise hız hatasıyla çalışan bir PI denetleyicinin hesapladığı tork talebine göre belirlenir. Aynı birer PI denetleyici bu referans akımları gerçek stator akımı bileşenleriyle karşılaştırarak gereken voltajın dq bileşenlerini hesaplar. Tersine Park dönüşümüyle bu değerler $\alpha\beta$ eksenlerine dönüştürülür ve uzay vektör modülasyonlu sürücüden bu değerlerin gerçekleştirilmesi istenir. Ölçülen akım bileşenleri de önce Clarke dönüşümüyle $\alpha\beta$ eksenlerine, sonra da Park dönüşümüyle dq eksenlerine dönüştürülerek kullanılır.



Şekil 3.6. Asenkron motorda Alan Yönlendirmeli Kontrol şeması

3.4.Sürücü

Alan yönlendirmeli kontrol ve doğrudan tork kontrolü ile üç fazlı elektrik motorlarını sürebilmek için motor sürücülerine ihtiyaç vardır. Motoru süren (a,b,c) anahtarlama sinyallerini üretebilmek için darbe genişlik modülasyonundan yararlanılır. Uzay vektör modülasyonu en çok kullanılan darbe genişlik modülasyon türlerinden birisidir.

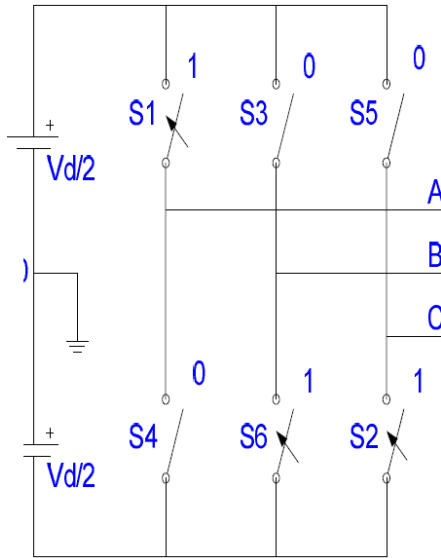
3.4.1.Uzay Vektör Modülasyonu(Space Vector Modulation)

Uzay vektör modülasyonu bir çeşit dijital modülasyon tekniğidir. Kolay uygulanabilmesi, çıkış gerilimi için geniş bir lineer modülasyon alanına sahip olması ve düşük anahtarlama kayıplarına sahip olmasından dolayı çokça tercih edilen bir

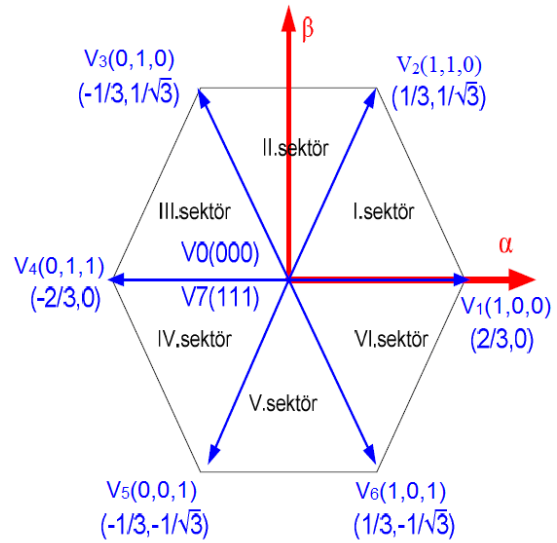
modülasyon tekniği olmuştur. Bu modülasyon tekniğinin çalışması üç fazlı gerilim kaynağı olan eviriciyle, mümkün olan sekiz çalışma durumu için \vec{V}_{ref} gerilim vektörünün durağan eksenlerde sıfır olmayan komşu iki vektör ve iki sıfır vektörü ile ortalama olarak üretilmesi esasına dayanmaktadır.

$$\vec{V}_{ref} = V_{\alpha} + jV_{\beta} = \frac{2}{3} \left(V_a + V_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + V_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) \quad (3.17)$$

Durağan eksenlerde belirtilen referans gerilim vektörü ω_s açısal hızı ile dönmektedir. Üç fazlı bir eviricinin 8 olası durumu mevcuttur. Bunlardan ikisi sıfır vektörü, altısı ise aktif durum vektörü olup bir altıgen şekli oluşturmaktadırlar. (Şekil 3.8.) Uzak vektör modülasyonu her bir anahtarlama döngüsünde kendisine en yakın olan iki aktif durum vektörünü ve sıfır-durum vektörlerini anahtarlama suretiyle ortalama olarak dönen referans vektör elde edilmektedir. Uzak vektör modülasyonu ile elde edilebilir maksimum çıkış gerilimi evirici DC giriş geriliminin yüzde doksan değerine çıkarılır.



Şekil 3.7. V1(1,0,0) durumunda anahtarların konumu



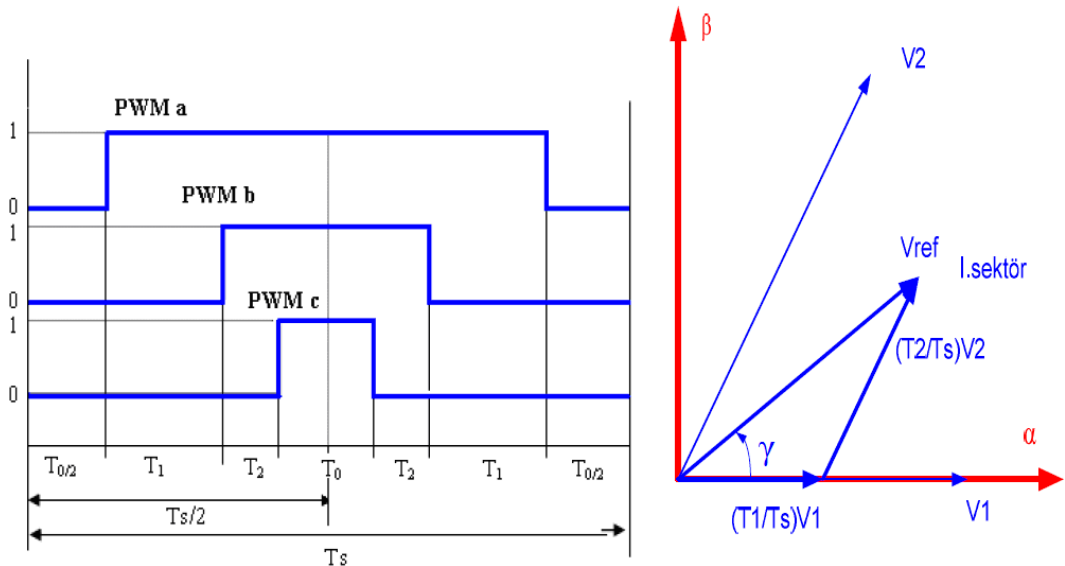
Şekil 3.8. Durağan referans çatı ve evirici durumlarının ifadesi

Şekil 3.7 teki anahtarların açık ve kapalı olma durumuna göre 6 aktif durum vektörü V_1, \dots, V_6 olarak, 2 adet sıfır vektörü ise V_0 ve V_7 ile gösterilir. Bu aktif vektörler düzenli altıgen içerisinde oluşmakta ve bu altıgen şekil altı eşit sektöre bölünmektedir. Her bir T_s anahtarlama periyodunda ortalama uzak vektörü \vec{V}_{ref}

olarak tanımlanır. Eğer T_s yeteri kadar küçük olursa, bu zaman aralığında \vec{V}_{ref} de sabit kabul edilebilir. En iyi harmonik performansı ve her yeni bir referansı minimum sayıda anahtarlama ile elde edebilmek için, anahtarlama sıralaması öyle ayarlanır ki bir durumdan bir sonraki duruma geçişte eviricinin sadece bir anahtarı konum değiştirir. Örneğin \vec{V}_{ref} tek numaralı bir vektörde iken uygulanan vektör düzeni $\vec{V}_0 \vec{V}_k \vec{V}_{k+1} \vec{V}_7 \vec{V}_7 \vec{V}_{k+1} \vec{V}_k \vec{V}_0$ şeklinde uygulanır. Çift numaralı bir sektör durumunda ise aktif vektörlerin yerleri değiştirilerek $\vec{V}_0 \vec{V}_{k+1} \vec{V}_k \vec{V}_7 \vec{V}_7 \vec{V}_k \vec{V}_{k+1} \vec{V}_0$, şeklinde uygulanır. Böylece her anahtarlama yalnız bir anahtar konum değiştireceği için anahtar kayıpları az olur. Uzay vektör modülasyonunun en önemli bölümü aktif ve sıfır durum sürelerinin her bir anahtarlama periyodunda hesaplanması stratejisidir. T_s periyodu boyunca T_k süresi \vec{V}_k vektörünün uygulama süresinin yarısını, T_0 süresi de sıfır durum vektörünün uygulama süresinin yarısını göstermektedir.

$$\begin{bmatrix} T_k \\ T_{k+1} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3} |\vec{V}_{ref}| T_s}{2 V_{dc}} \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{k\pi}{3} - \gamma\right) \\ \sin\left(\gamma - \frac{(k-1)\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

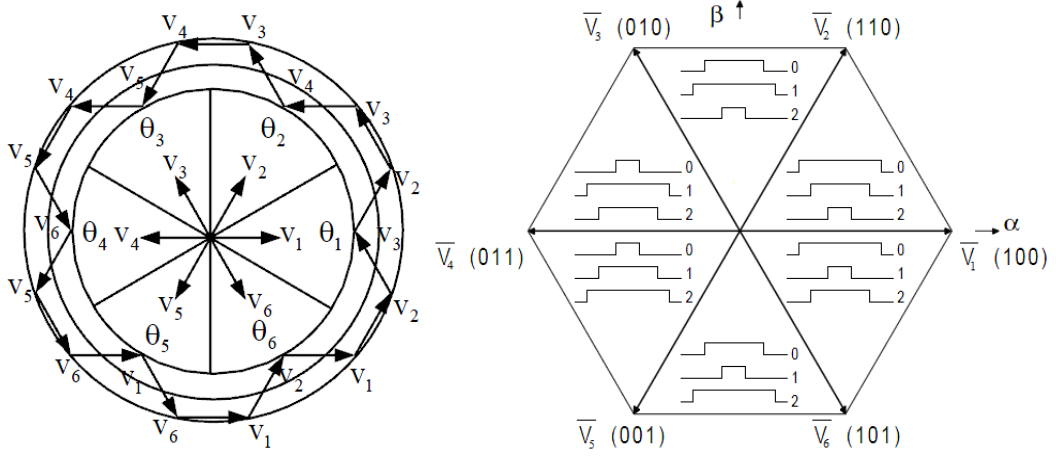
$$T_0 = \frac{T_s}{2} - T_k - T_{k+1} \quad (3.19)$$



Şekil 3.9. Voltaj referans vektörü için anahtarlama sinyalleri ve referans vektörün bileşenleri

Referans vektörünün sektör 1 içerisinde bulunması durumunda $\left(0 \leq \gamma \leq \frac{\pi}{3}\right)$ referans vektör bileşenleri şekil 3.9. de gösterildiği gibi olur. T_1 ve T_2 süreleri yine aynı şekilde gösterildiği gibi referans vektörün sektördeki V_1 ve V_2 aktif durum vektörlerinin uygulama süreleridir. İstenen temel bileşen genliğinin altı adım çalışmadaki temel çıkış bileşen maksimum değerine oranı modülasyon indeksi olarak tanımlanır(36).

$$m = \frac{\pi V_{ref}}{2 V_{dc}} \quad (3.20)$$



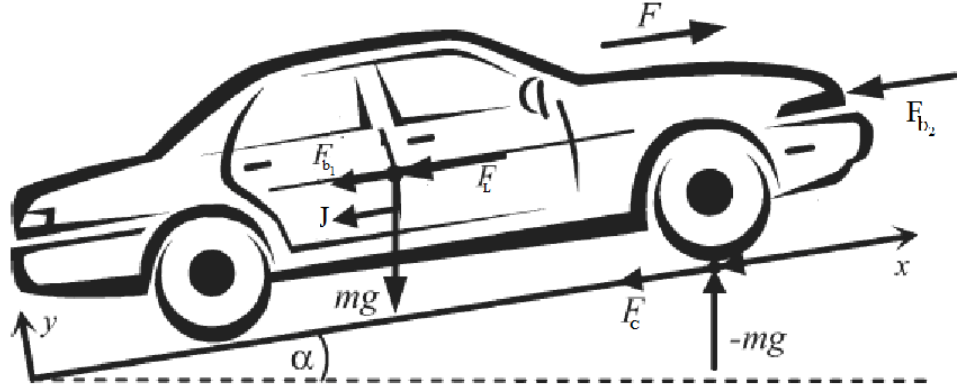
Şekil 3.10. Uzay vektör modülasyonu için oluşturulan vektörler ve her sektör için anahtarlama sinyalleri

3.5. Transmisyon

Transmisyon sistemi aracın motorundan elde edilen dönüşü dişli dönüşüm oranıyla tekerlere aktaran kısımdır. Modern hibrit araçlarda sürekli değişken otomatik şanzıman sistemi kullanılmaktadır. Sürekli değişken otomatik şanzımanda aracın elektronik donanımı tarafından belli geçiş oranları belirlenerek sürücüler için vites aralıkları belirlenmiştir. Transmisyon dişlilerinin yanında motorla tekerler arasında sürtünme sonucunda oluşan yükler vardır. Bunlar motorun üzerine binen yük ile tekere aktarılan dönüş kuvvetine bağlı olarak aracın hızını etkilemektedirler.

3.5.1.Araca Etkiyen Kuvvetler

Bir araç hareketi sırasında birçok kuvvetin etkisi altına girmektedir. Genel olarak bu kuvvetleri havanın sürtünme kuvveti, tekerlerde oluşan sürtünme kuvveti, yokuş direnci altında toparlayabiliriz. Ayrıca motorun itiş veya çekiş kuvveti, bazı iç sürtünme(transmisyon) kayıplarıyla araç üzerinde etkir.



Şekil 3.11. Bir araca etki eden kuvvetler(37)

3.5.1.1.Havanın Sürtünmesi

Havanın sürtünme kuvveti aracın hareketi sırasında oluşan hareketin tersi yönde hızın karesi ve yüzey alanı ile yüzey yapısına bağlı olarak artıp azalan bir yapıya sahip olan kuvvettir. Her zaman aracın hareketinin tersi yönde etki eder.

Yapılan modelleme çalışmasında rüzgâr gibi dış etmenler göz önüne alınmamıştır. Çoğunlukla modern araçların dış gövdesi tasarlanırken havanın sürtünmesi ve aracın çevresinde oluşan rüzgârın etkisinden en az etkilenecek şekilde tasarlanır. Bu da araca önemli oranlarda yakıt tasarrufu sağlar.

$Alan$:Aracın havayı yaran yüzey alanı(m^2)

A_{Gen} :Aracın genişliği(m)

$A_{Yüks}$:Aracın yüksekliği(m)

$$Alan = A_{Gen} \times A_{Yüks} \quad (3.21)$$

K_{sv} :Hızın karesiyle ve alanla orantılı sürtünme kuvveti katsayısı(Ns^2/m^4)

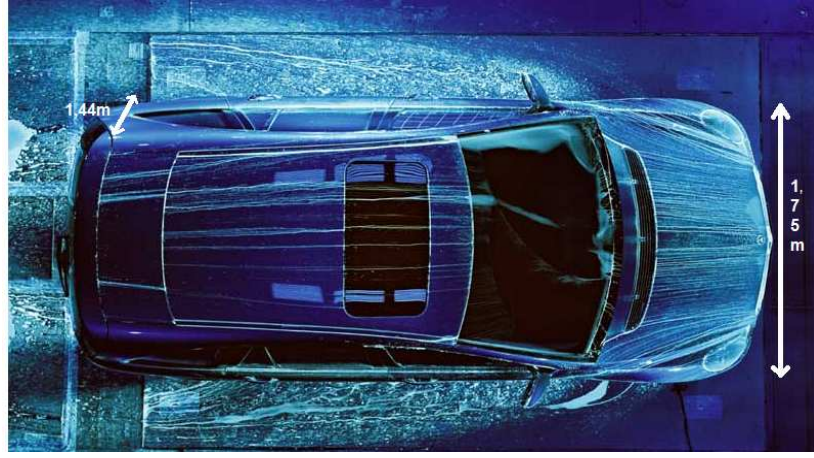
b_2 :Araç için hızın karesiyle orantılı havanın sürtünme katsayısı (Ns^2/m^2)

$$b_2 = K_{sv} \times Alan \quad (3.22)$$

$b_2 v^2$:hızın karesiyle orantılı sürtünme kuvveti

Örneğin Honda Civic için genişlik 1,75m ve yükseklik 1,44 m ve $K_{sv} = 0.1951$
 Ns^2/m^4 .

$$b_2 = 0.1951 Ns^2/m^4 \times (1,75 m \times 1,44 m) = 0,4916 Ns^2/m^2$$



Şekil 3.12. Bir aracın üzerindeki hava akışı(38)

3.5.1.2.Tekerde Oluşan Sürtünme

Tekerler araçta oluşan dönüş kuvvetini aracın da ağırlığı vasıtasıyla zemine iletirler. Bu iletim anında bir sürtünme kuvveti oluşur ve üretilen dönüş enerjisinin bir kısmı bu sürtünme sırasında kaybolur. Teker ile yol arasında oluşan sürtünme sayesinde araç ilerleyişini veya frenlemeyle duruşunu sağlayabilmektedir. Bu sürtünme oranı aracın ağırlığına ve yola bağlıdır(39). Aslında yolun eğimine de bağlı olduğu gibi, aracın ilk kalkış anı ve hareketli anları için değerleri farklıdır. Ancak modelimizde bu farklılıklar ihmal edilmiştir. Tekerlek yuvarlanma sürtünmesi de denilen bu kuvveti, motor sabit bir sürtünme torku olarak görür ki buna Coulomb sürtünmesi denir.

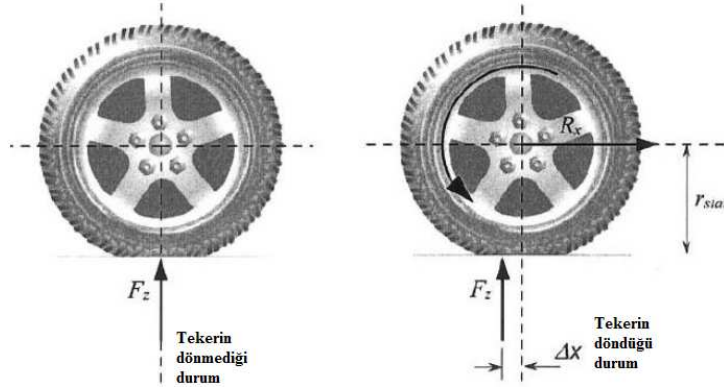
$$F_c = K_s \times M_{toplam} \times g \quad (3.23)$$

F_c :Tekerlek yuvarlanma sürtünmesi(N)

K_s :Sabit Sürtünme Katsayısı

M_{toplam} :Aracın toplam ağırlığı(kg)

g :Yerçekim ivmesi(m/s^2)



Şekil 3.13. Yuvarlanma direncinin gösterimi

Ayrıca taşıtlarda genellikle b_2v^2 yanında ihmal edilen, ancak motor modelinde dönüş hızıyla orantılı olan sürtünme torkunun($B_1\omega_m$) araç üzerindeki karşılığı da dikkate alınabilir:

b_1v :hızla orantılı sürtünme kuvveti(genellikle ihmal edilmektedir)

b_1 :Hızla orantılı sürtünme katsayısı(Ns/m)

b_1 katsayısı, sabit hızdaki test şartlarındaki yakıt sarfiyatı ile motor ve iletim verimini dikkate alarak, diğer sürtünmelerin neden olduğu sarfiyatla arasındaki farktan hesaplanabilir.

3.5.1.3.Yokuş Direnci

Yol eğimine ve araç ağırlığına bağlıdır. Hareket yönünden bağımsızdır.

Şekil 3.11' ye göre $\tan \alpha = egim$ ve

$$\sin \alpha = \frac{egim}{\sqrt{1+egim^2}} \quad (3.24)$$

olmak üzere,

$$F_L = M_{toplam} \times g \times \sin \alpha \quad (3.25)$$

F_L : Yokuş direnci(N)

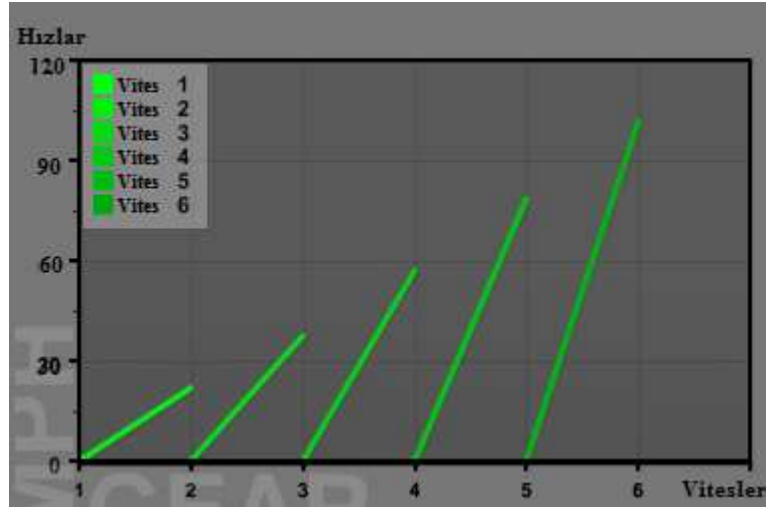
M_{toplam} :Aracın toplam ağırlığı (kg)

g :Yerçekimi ivmesi(m/s^2)

α : Yokuş eğim açısı

3.5.2. Katsayı dönüşümleri

Motor ile teker arasındaki iletimleri hesaplayabilmemiz için dönüşüm oranlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Modelleme çalışması sırasında bu dönüşüm hesapları ve parametreler için Honda firmasının üretmiş olduğu Civic hibrit aracının değerleri kullanılmıştır.



Şekil 3.14. Honda'nın resmi sitesine göre Civic modeli için 195/65/15 ebadında bir lastik ile viteslere göre 3000 devire kadar hızlar

Yapılan modellemede Honda firmasının Civic Modeline göre motordan tekere dönüşüm oranları şöyle bulunmuştur.

$$c = \frac{\omega_m}{v} \quad (3.26)$$

c :Vites dönüşüm oranı

v :Araç hızı[m/s]

ω_m :rotor mekanik açısal hızı(rad/s)

Örneğin 3000 devir ile birinci viteste giderken görülen hız = $23,52km/h$ olduğu için

$$c_1 = \frac{\omega_{m1}}{V_1} = \frac{3000 \text{devir} / \text{dakika}}{23,52 \text{km} / \text{h}} \times \frac{60 \text{dakika}}{\text{h}} \times \frac{\text{km}}{1000 \text{m}} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{\text{devir}} = 48,08 \text{rad} / \text{m}$$

3000devir / dakikadaki araç hızı, ikinci vites için 40.24km/h, üçüncü vites için 61.17km/h, dördüncü vites için 84.05km/h ve beşinci vites için 108.9150km/h olduğu için benzer şekilde ikinci vites için $c_2=28,105\text{rad/m}$, üçüncü vites için $c_3=18,488\text{rad/m}$, dördüncü vites için $c_4=13,445\text{rad/m}$, beşinci vites için $c_5=10,384\text{rad/m}$ bulunur.

Araç üzerindeki sürtünme ve yol eğimi kuvvetlerinin, sürtünme katsayılarının motor tarafından görülen değerleri ile motorun ürettiği torkun tekerlere kuvvet olarak iletilen değeri ve araç kütesinin motor tarafından eylemsizlik momenti olarak algılanan değeri motor gücünün, iletim verimi oranında azalarak araç üzerinde görülmesinden yola çıkarak bulunur:

$$\eta \times T_m \times \omega_m = F_t \times v \quad (3.27)$$

η :iletim verimi

T_m :Motorun üretilen herhangi bir tork bileşeni

F_t :Tm nin tekere ulaşan kuvvet karşılığı

$$c\eta = \frac{F_t}{T_m} \quad (3.28)$$

Buna göre Coulomb sürtünme torku T_c

$$c\eta = \frac{F_c}{T_c} \Rightarrow T_c = \frac{F_c}{c\eta} \quad (3.29)$$

bulunur. Ayrıca motorun kendi Coulomb sürtünmesi buna eklenerek modelde kullanılır.

F_c : Tekerlek yuvarlanma sürtünmesi(N)

Motorun araç kütesinden dolayı gördüğü eylemsizlik momenti J

$$\frac{mv}{J\omega_m} = c\eta \Rightarrow J = \frac{m}{c^2\eta} \quad (3.30)$$

bulunur. Ayrıca motorun kendi eylemsizlik momenti buna eklenerek modelde kullanılır.

m : araç kütlesi

Motora etki eden mekanik açısal hızla orantılı sürtünme katsayısı B_1 (Nm.s/rad)

$$c\eta = \frac{b_1 v}{B_1 \omega_m} \Rightarrow B_1 = \frac{b_1}{c^2 \eta} \quad (3.31)$$

bulunur. Ayrıca motorun kendi sürtünme katsayısı buna eklenerek modelde kullanılır.

b_1 : Hızla orantılı sürtünme katsayısı(Ns/m)

Motora etki eden havanın mekanik açısal hızla orantılı sürtünme kuvveti katsayısı B_2 (Ns²/rad²) şöyle bulunur:

$$c\eta = \frac{b_2 v^2}{B_2 \omega_m^2} \Rightarrow B_2 = \frac{b_2}{c^3 \eta} \quad (3.32)$$

b_2 : Araç için hızın karesiyle orantılı hava sürtünme sabiti

Yol eğiminin motora yük torku etkisi T_L

$$c\eta = \frac{F_L}{T_L} \Rightarrow T_L = \frac{F_L}{c\eta} \quad (3.33)$$

bulunur.

F_L :Yol eğiminden gelen yük kuvveti

Bu modellemede vites değişimi dikkate alınmamıştır. Çünkü vites değişim anlarında hesaplar oldukça karışmaktadır. Vitesin boşa alınıp tekrar takılması, motor hızı ile araç hızı arasındaki orantının bozularak başlı başına karmaşık bir şekilde ayrı ayrı dinamiklerle hesaplanmasını gerektirir.

Ayrıca $\vec{F} = m\vec{a}$ formülünün değişken kütle için geçersiz olması gibi, vites değişirken

J değiştiği için benzer şekilde net tork-açısal ivme formülü $T = J \frac{d\omega_m}{dt}$ de

geçerliliğini kaybetmektedir. Her zaman geçerli olan $\vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{v})$ formülüne benzer

olarak, değişken J durumunda da motor net torku $T = \frac{d}{dt}(J\omega_m)$ olarak alınmalıdır ki

bu da sabit vites çalışmasından farklı olarak mekanik modelde $\frac{dJ}{dt}\omega_m$ gibi bir tork

bileşeni ortaya çıkmasına neden olur.Yani vites değişimi ele alınacaksa değişim sırasında eylemsizlik momentinin nasıl değiştiği de modellenmelidir.

Vites değişimini modellemenin diğer bir zorluğu da enerjinin korunumundan faydalanılamamasıdır. Sabit viteste donüşüm için hem momentumun hem de enerjinin veya gücün korunumundan (veya belli bir verimle iletilmesinden) faydalanarak modelleme yapılabilirken, bu defa J 'nin değiştirilmesi de bir enerji gerektirdiği için daha detaylı olarak vites sistemini modellemek gerekir. Bunlar ileri makine mühendisliği konuları olduğu için ve bu çalışmada elektrik motoruyla ilgilenildiği için vites değişim durumları ele alınmamış, hep birinci viteste çalışılmıştır. Bu geçiş modelleme farklılıklarının ihmal edilmesi de bu çalışmanın özüne çok uygun değildir; çünkü vites değişimi sırasındaki enerji kaybı, hibrit araç tasarruf hesaplarını bozmaktadır.

3.6. Yol Modelleri

Uygulanan modelde tasarruf, geri kazanımlı frenleme sırasında azaltılmak istenen veya iniş sırasında kazanılan kinetik enerjinin bir kısmının batarya sisteminde saklanmasıyla gerçekleşmektedir. Harcanan yakıt miktarları şöyle hesaplanmıştır:

Yalnız benzinli motorla çalışılırken, benzinli motorda üretilen tork (ki bu hız denetleyicisinin talep ettiği değerin basit bir filtredeki gibi bir gecikmeyle karşılandığı varsayımıyla hesaplanmaktadır) ile motor açısal hızı çarpılarak bulunan gücün integrali alınmıştır. Bulunan enerjinin %20 motor verimiyle elde edildiği düşünülerek 0,2'ye bölünmesiyle harcanan benzinin enerjisi bulunur. Benzinin yanma enerjisinin 34,8MJ/litre olduğu düşünülerek enerjinin ne kadar benzinden karşılandığı bulunur. Transmisyon bloğunda ayrıca %90 iletim verimi varsayıldığı için araç modelimizde yakıttan tekere verim %18 varsayılmış olmaktadır ki bu da pratikte karşılaşılan gerçekçi bir verim değeridir, hatta gerçekte verim biraz daha yüksek olabilmektedir.

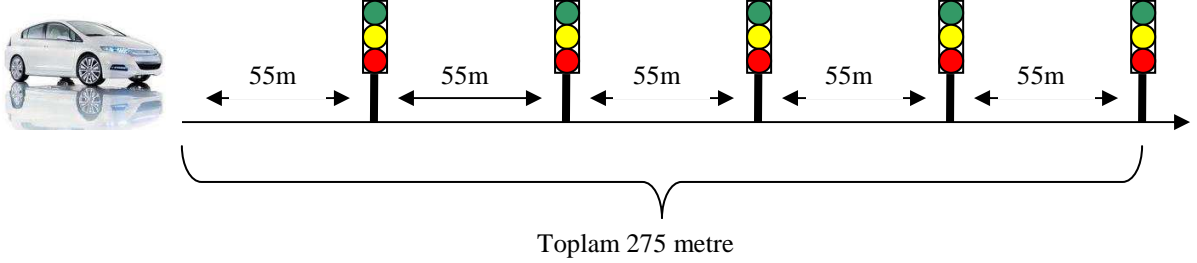
Hibrit durumda çalışırken ise motor açısal hızıyla çarpılan tork, yalnızca benzinli motorun tork katkısı olarak alınır, ki bu da hız denetleyicinin talep ettiği torktan elektrik motorundan gerçekçi şartlar dikkate alınarak talep edilen kısmının çıkartılıp yine basit bir filtredeki gibi bir gecikmeyle karşılandığı varsayımıyla hesaplanmaktadır. Ancak bu şekilde bulunan sarfiyat, gerçek sarfiyat sayılamaz. Ayrıca bataryanın şarj durumundaki düşüşün enerji karşılığı da yine %20 verimle çalışan benzinli motor tarafından telafi edileceği için 0,2'ye bölünüp önce harcanan benzinin enerjisi, sonra da benzinin yanma enerjisi kullanılarak da benzin sarfiyatı bulunur. Sonra da bu sarfiyat, benzinli motor torkundan hesaplanan sarfiyata eklenir. Bazen batarya şarj durumu çalışma sonunda başındakinden daha yüksek bir değere gelebilir. Bu, benzinli motor fazla çalıştığı için olup fazla enerji bataryada depolandığı için şarj durumu değişiminden hesaplanan sarfiyat negatif çıkar. Bunda bir yanlışlık yoktur ve bu negatif sarfiyat miktarının doğrudan benzinli motor torkundan hesaplanan sarfiyata eklenmesiyle, karşılaştırmalarda gerçek sarfiyat sayılabilecek değer biraz daha küçük bulunur.

Modelde gerçekçi kazanç oranlarını tespit edebilmemiz için, gerçek sürüş ortamında bir aracın karşılaşılabileceği yol şartlarının modellenmesi gerekmektedir. Bunun için iki farklı modelin incelenmesi uygun görülmüştür: İlk model “kalkış ve duruşlarda”, genel tabir ile “dur-kalk” modeli. İkinci durum ise “yokuş çıkışı ve inişi” modelidir. Mekanik frenlemeler b_1 veya diğer bir deyişle B_1 sürtünme katsayısının geçici olarak artırılmasıyla uygulanmıştır.

3.6.1. Kalkış ve Duruş Modeli

Kalkış ve duruş modeli şehir içi araç kullanımlarında en çok karşılaşılan şartlardan biridir. Bu durum en fazla bir trafik lambasından diğer bir trafik lambasına veya yoğun bir trafikte ilerlediği durumlarda gerçekleşir. Araç bir trafik lambasından diğer bir trafik lambasına gidiş sırasında önce duruş konumunda bulunup sonra hareket etmesi ve belirli bir ivme kazanmasıyla momenti artar. Kazanılan kinetik enerji bir sonraki trafik lambasında mekanik frenlemeyle durmak suretiyle kaybolmaktadır. Bu enerjinin bir kısmını geri kazanımlı frenleme ile kazanıp saklamak ve kalkış sırasında bu saklanan enerjinin kullanımı ile aracın yakıt tüketimini azaltmak mümkündür.

Yapılan çalışmada kalkış ve duruş yol modelinde bu durum göz önüne alınarak toplam 275 metre düz bir yoldan oluşan 5 kalkış ve 5 duruş şeklinde model tasarlanmıştır.



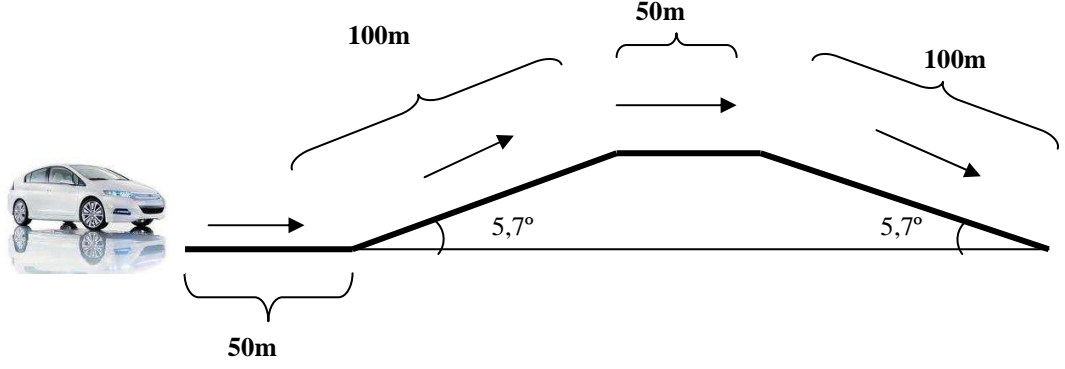
Şekil 3.15. Kalkış ve duruş modeli

Bu modelde şekil 3.15’da görüldüğü gibi araç 55 m’lik aralıklarla kalkışlar yapıp, hızlanıp, duruşlar gerçekleştirmektedir.

3.6.2. Yokuş Çıkışı ve İnişi Modeli

Yokuş çıkışı ve inişi sürüş modeli yine kalkış ve duruş modeli gibi gerçek sürüş ortamında en çok karşılaşılan diğer bir durumdur. Bu durumda araç yokuşu çıkarken potansiyel enerji kazanmak için daha çok yakıt harcamaktadır. Yokuşu inerken ise bu potansiyel enerji kinetik enerjiye dönüşürken frenlemeyle ziyan edilmektedir. Bu kaybolan enerjinin bir kısmını duruş ve kalkış durumunda olduğu gibi geri kazanımlı frenlemeyle kazanıp tekrar kullanmak mümkündür.

Yapılan yokuş çıkışı ve inişi modelinde, araç duruş şartından, yokuşta oluşacak olan motor veya motorlar üzerinde oluşan yükü azaltmak için 50m mesafede düz yolda aracın hızlanması sağlanmaktadır. Bu mesafenin bitiminde aracın %10 eğimli ($5,7^\circ$) 100 metrelik bir yokuşu çıkması gerekmektedir. Yokuşun bitiminde ise aracın kazanımlarının daha rahat gözlenebilmesi için 50 metrelik düz bir yol bulunmaktadır. Yine bu mesafenin sonunda aracın %10 eğimli ($5,7^\circ$) 100 metrelik bir inişi gerçekleştirmesi gerekmektedir.

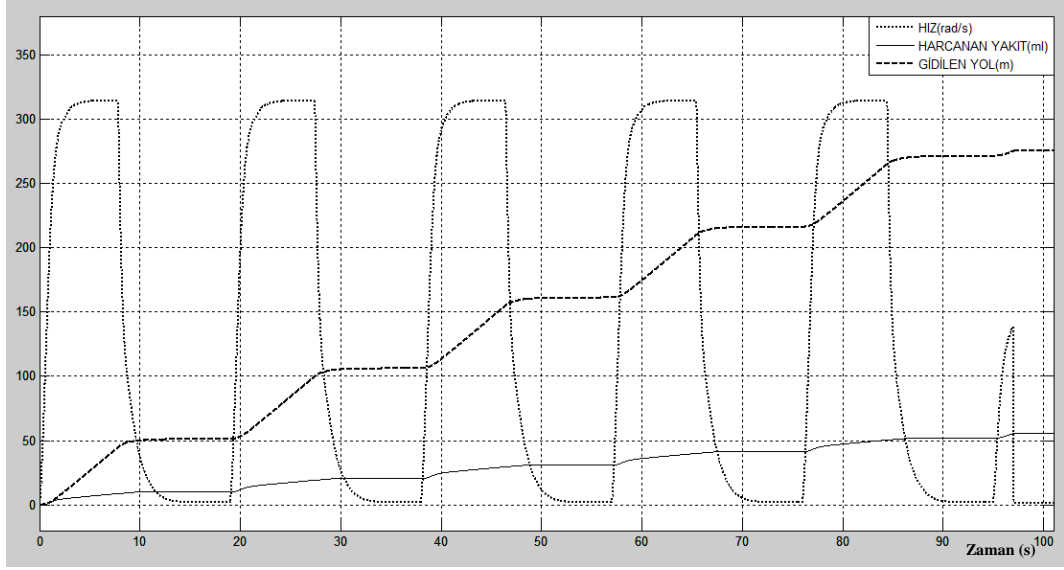


Şekil 3.16 Yokuş çıkışı ve iniş modeli

3.7.Yol Modellerine Göre Simülasyon Sonuçları

Yapılan çalışmada öncelikle kalkış ve duruş modeli incelenmiştir. Matematiksel modellemede yakıt tüketiminin tespiti için aracın, batarya ve motor bloğu olmadan 1000kg civarı bir ağırlığa sahip olduğu düşünülerek önce yalnız benzin motoru ve mekanik frenlemeyle kalkış ve duruş yol modeline göre yakıt tüketimi gözlemlenmiştir. Simülasyonda kalkıştaki hız referansı motor devri cinsinden 3000devir/dakika, yani 100π rad/s olarak uygulanmıştır. Bu da araç için 23,5km/h hıza karşılık gelmektedir. Elde edilen hız, yol ve yakıt sonuçları Şekil 3.17'de gösterilmiştir.

Yalnız benzin motoru ve mekanik frenlemeyle yapılan çalışmada yakıt tüketimi 97,0602s'de 275 metrelik yolu tamamlamasıyla 55,6438ml olarak bulunmuştur. Yine daha önce bahsedilen koşullar sebebiyle toplam ağırlık 1000kg olarak alınmıştır.

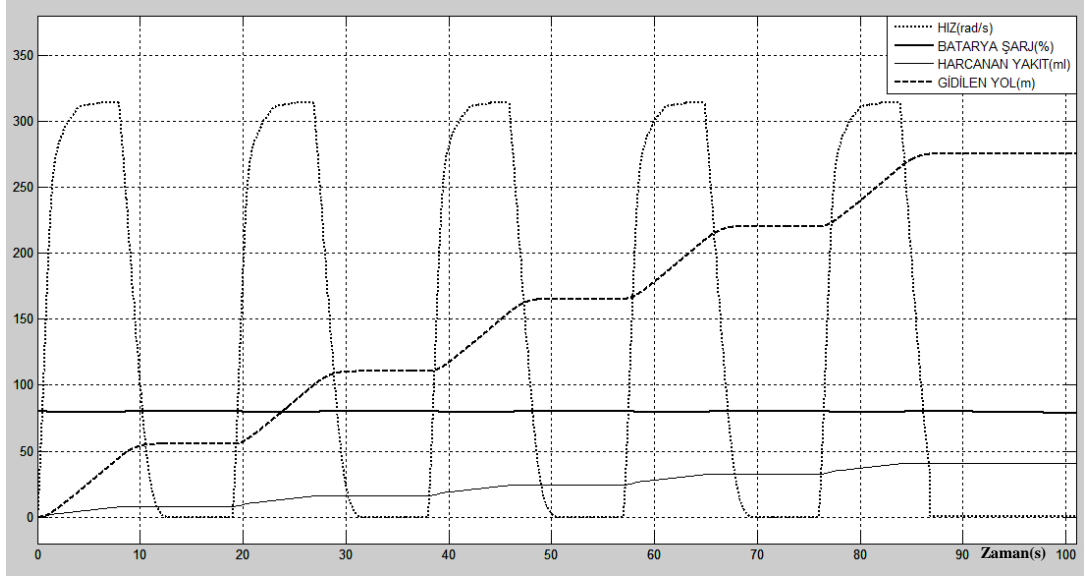


Şekil 3.17. Asenkron motor modeli için yapılan matematiksel modellemeyle yalnız benzin motoru ve mekanik frenlemeyle kalkış ve duruş yol modeli sonuç grafikleri

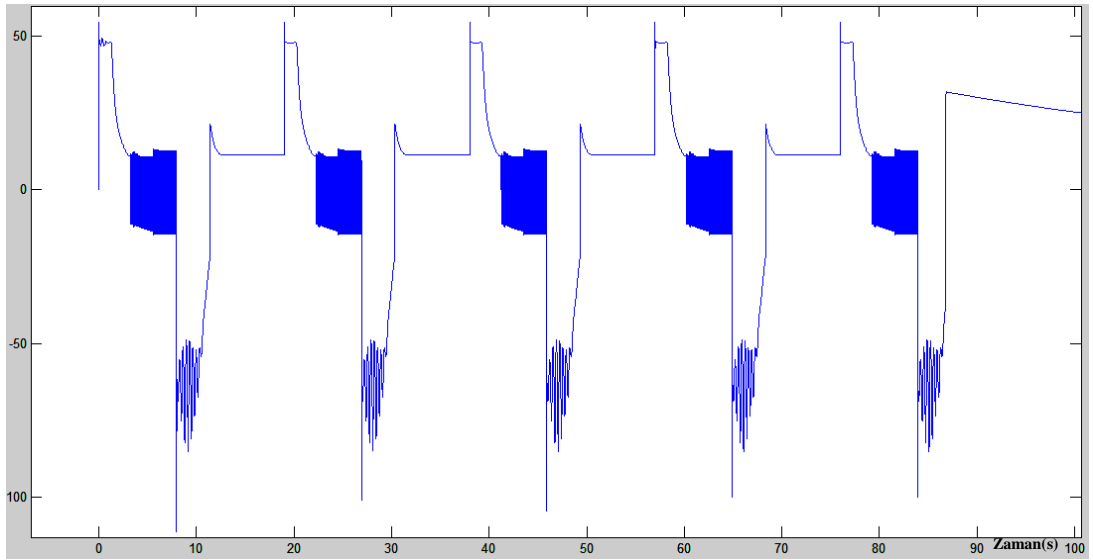
Asenkron motor ile hibrit durumda 1221kg ağırlıkla yapılan modelleme sonucunda elde edilen hız, yol ve yakıt sonuçları da Şekil 3.18'da gösterilmiştir. 86,80s'de araç 275m yolu tamamlamak için 40,87ml yakıt tükettiği tespit edilmiştir. Bu çalışmanın sonunda batarya şarj durumunda kayda değer bir değişme olmamıştır. Ancak asenkron motor için seçilen mıknatıslanma akımı referans değerine göre enerji geri kazanımında önemli farklılıklar görülebilmektedir. Yapılan denemelerde, kullanılan motor için en uygun görülen mıknatıslanma akımı referansı seçilmiştir(11A) .

Sonuçta 275m için benzin tüketimi yalnız benzin motoru ile 55,64ml, hibrit durumda yakıt tüketiminde ise 40,87ml yakıt tüketimi görülmektedir. Bu da %26,60 oranında yakıt tasarrufu sağlandığını göstermektedir. Tasarruf oranı pratik şartlardaki gibi durma süresinin biraz daha uzun alınması halinde biraz daha yüksek çıkacaktır.

Bu çalışmada bataryadan çekilen akım Şekil 3.19'de gösterilmiştir. Aşırı akımlar kısa süreli çekildiği için motor için tehlike arz etmemektedir. Ayrıca 3 fazlı motor sargılarındaki akım değerleri burada görülenin 2/3 katıdır; yani daha güvenli değerlerdedir.



Şekil 3.18. Asenkron motor modeli için yapılan hibrit durumda matematiksel modelleme sonuç grafikleri

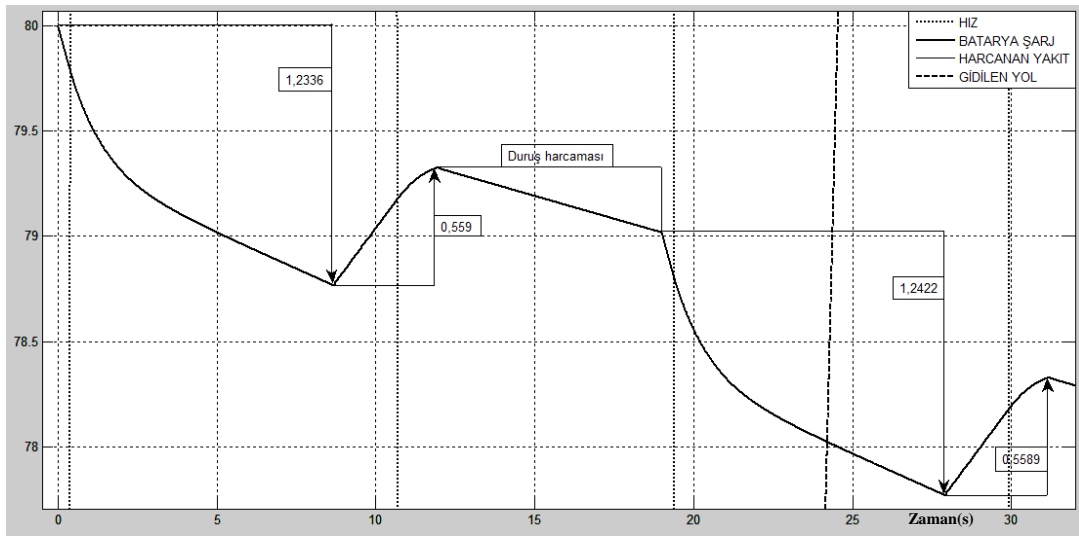


Şekil 3.19 Hibrit çalışmada kalkış ve duruş modeli için batarya akım grafiği

Asenkron makinanın jeneratör moduna geçtiği durumlarda enerji geri kazanım oranı hakkında bir fikir edinmek için bu defa benzinli motoru devre dışı bırakarak yalnız bataryayla asenkron motorun aynı yol şartlarında (kalkış ve duruşlarda) aracı sürmesi sağlanmış ve Şekil 3.20'de yüzde(%) olarak görülen batarya şarj oranı değişimi elde edilmiştir. Buna göre bir duruşta şarj durumundaki yükselmenin bir önceki kalkışta şarj durumundaki düşme miktarına oranı enerjinin asenkron jeneratör tarafından geri

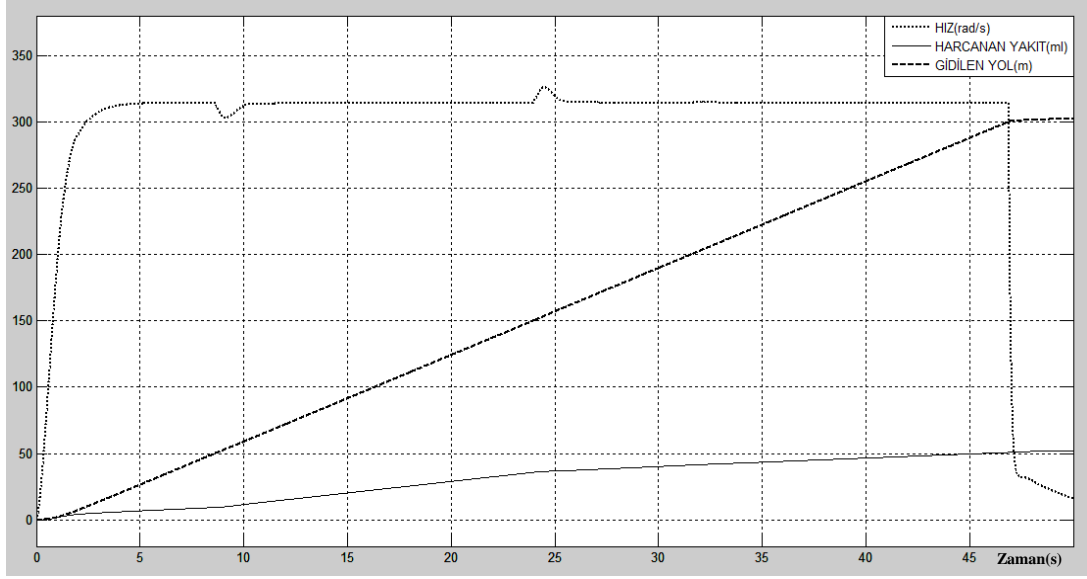
kazanım oranıdır; çünkü araç ve motor bu iki değişimin başında ve sonunda durmaktadır.

Burada kalkış ve duruşlar için asenkron motor modelinde elde edilen birinci kazanç oranı %45,33 ve ikinci %44,99 olduğu tespit edilmiştir. Diğer 3 kalkış ve duruşta elde edilen değerlerin kazanç oranları birinci ve ikincinin değerlerine çok yakın değerler olduğu için belirtilmemiştir.



Şekil 3.20. Asenkron motor modeli kalkış ve duruş yol modeli için batarya şarj oranı

Yokuş çıkış ve iniş yol modeli için yalnız benzin motoru ve mekanik frenlemeyle çalışmada daha önce bahsedilen ağırlık koşulları sebebiyle toplam ağırlık 1000kg olarak alınmıştır. Bu durumda araç 46,90s'de 300m yolu 50,80ml yakıt tüketimiyle tamamlamaktadır. Bu çalışmadaki hız, yakıt ve yol grafikleri Şekil 3.21'de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Asenkron model için yalnız benzin motoru ve mekanik frenlemeyle yokuş çıkış ve iniş modeli için sonuç grafikleri

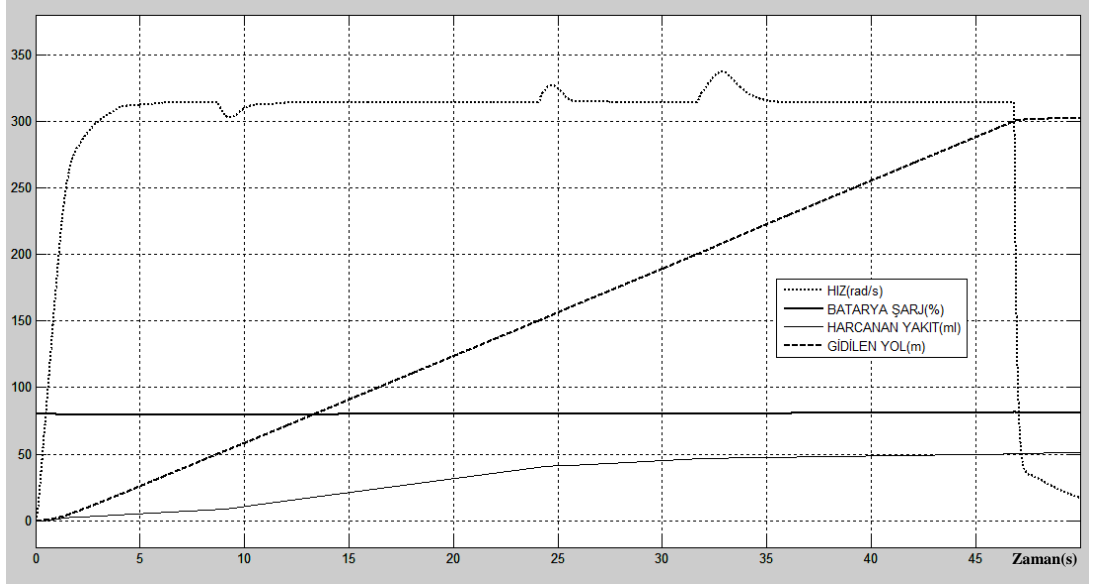
Yine aynı yol modelleriyle asenkron motorla hibrit durumda araç 46,86s'de 300m'lik yolu 50,13ml yakıt tüketimiyle tamamlamaktadır. Burada batarya şarjının başlangıç değerinden %1.31 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu artışa göre harcanan yakıtın bir kısmının elektrik enerjisi olarak bataryada saklandığı düşünülerek yapılan hesaplamalar sonucu(aşağıda görülmektedir) 18,84ml benzine denk geldiği görülmüştür.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Batarya şarj} \\ \text{durumu farkının} \\ \text{benzin karşılığı} \end{array} \right) = \frac{\left(\begin{array}{c} \text{Bataryanın} \\ \text{tam dolu enerjisi} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{Batarya şarj} \\ \text{durumu farkı} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{c} \text{Benzinin litre} \\ \text{basına enerjisi} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{Benzinli motor} \\ \text{verimi} \end{array} \right)}$$

$$= \frac{(2780,31 \text{ Wh}) \times 3600 \text{ s/h}}{34,79 \times 10^6 \text{ J/l}} \times \frac{-0,0131}{0,20}$$

$$= -18,84 \text{ ml}$$

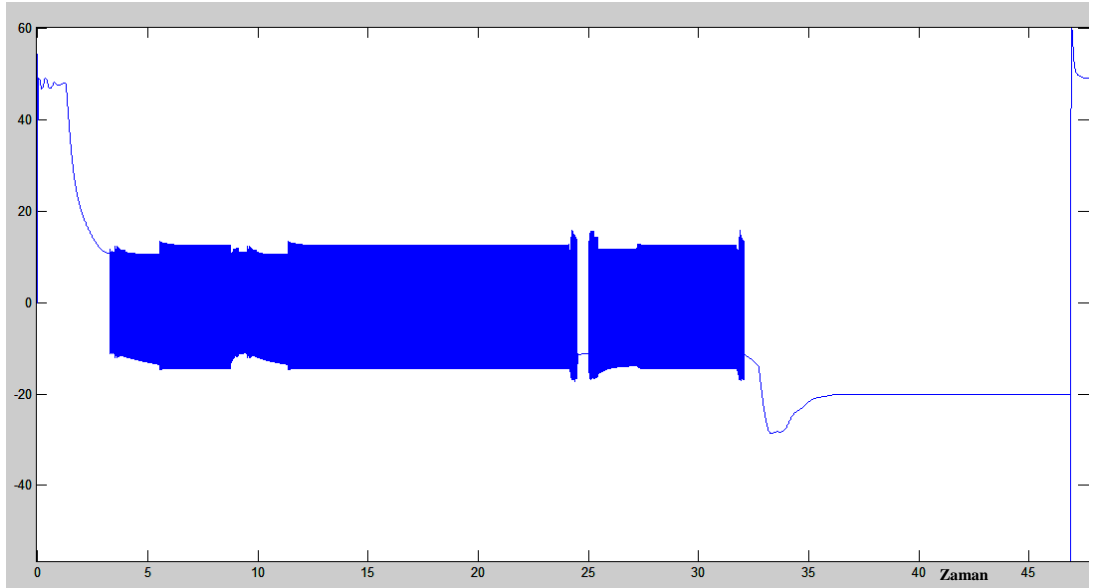
Buradan aracın bu yolu gitmesi için $50,13 \text{ ml} - 18,84 \text{ ml} = 31,29 \text{ ml}$ harcadığı tespit edilmiştir. Bu çalışmadaki hız, yakıt ve yol grafikleri Şekil 3.22'te gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Asenkron motor için benzin motoru, asenkron motor ve geri kazanımlı frenlemeyle yokuş çıkış ve iniş modeli için sonuç grafikleri

Yalnız benzin motoru ve mekanik frenlemeyle tüketim 50,8042ml, hesaplama sonucu bulunan hibrid durumdaki tüketim ise 31,2937ml olarak bulunduğu göre hibrit çalışmanın getirdiği yakıt tasarrufu %38,4 olarak bulunur.

Bu çalışmada bataryadan çekilen akım Şekil 3.23'de gösterilmiştir. Aşırı akımlar kısa süreli çekildiği için motor için tehlike arz etmemektedir. Ayrıca 3 fazlı motor sargılarındaki akım değerleri görülenin 2/3 oranında; yani değerleri daha güvenlidir.



Şekil 3.23. Hibrit çalışmada yokuş çıkış ve iniş modeli için batarya akım grafiği

3.7.1. Tasarruf Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan modellemelerde her iki yol koşulunda da yalnız benzin ve mekanik frenlemeli araç kullanıma göre hibrit sürüş durumunda yakıt tüketiminin daha az olduğu görülmüştür. Genel olarak tasarruf durumları Çizelge 3.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Hibrit sürüş tasarruf oranları çizelgesi

Yol durumu	Hibrit çalışmada benzinden tasarruf oranı	Elektrikli çalışmada geri kazanım oranı	
		1.Kalk-Dur	2.Kalk-Dur
Kalkış ve duruş	%26,60	%45,33	%44,99
Yokuş çıkış ve iniş	% 38,4		

Sonuçları incelediğimizde hibrit çalışmayla bütün yol koşullarında %26 üzerinde bir benzin tasarrufu gözlenmektedir. Bu tasarruf azımsanamayacak bir değerdir. 100km’de ortalama 10 litre yakan bir araç için bu oran 7,4 litreye düşmektedir. Göze çarpan diğer bir durum ise yokuş çıkış ve iniş yol modelinde, kalkış ve duruş yol modeline göre daha yüksek tasarruf görülmesidir. Gerçek sürüş koşullarında lambalarda aracın durma süresi modellemede gerçekleştirilen duruş süresinin çok üstünde olmakta ve bu süre içerisinde içten yanmalı motor çalışmasına devam etmektedir. Yani tasarruf oranının gerçek sürüş koşullarında çok daha yüksek olması beklenir.

Çalışma sırasında batarya bloğu, elektrik motoru ve kontrol sistemleri gibi hibrit yapıdan gelen toplam ağırlık fazlası 221kg olarak alınmıştır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada elektrik motoru olarak asenkron motor kullanılan paralel hibrit bir araç modellenerek simülasyonları yapılmıştır. Çalışmalarda asenkron motor alan yönlendirmeli kontrol yöntemiyle sürülmüştür. Buna göre jeneratör modundaki geri kazanım oranı, mıknatıslanma akımı referans değeri seçiminden oldukça etkilenmektedir. Li-ion bataryanın da başarıyla kullanılabilceği model üzerinde gösterilmiştir. Sonuçta kalkış-duruş ve yokuş çıkış-iniş şartlarında cazip yakıt tasarruf oranları elde edilmiştir. Ancak halen yüksek olan üretim maliyetleri nedeniyle hibrit araçlarda fiyat farkını ve bunun faizini amorti edebilecek derecede bir tasarruf sağlandığını söylemek şimdilik zordur. Teorik olarak ortada cazip bir tasarruf imkânı vardır ve üretim maliyetlerini düşürecek araştırma-geliştirme çalışmalarının yakın bir gelecekte fiyatları düşürerek hibrit araçların tercih oranını artıracığı umulmaktadır. Böylece hem enerji kaynakları daha verimli kullanılmış olacak, hem de daha temiz ve sağlıklı bir çevre oluşmasına katkı sağlanacaktır.

Araç kütlesi ve üzerindeki kuvvetlerle motorun gördüğü eylemsizlik momenti ve tork bileşenleri arasındaki ilişkiler modellenmiştir. Batarya şarj durumundaki değişikliklerin yakıt karşılığının bulunması, enerji geri kazanımının ve yakıt tasarruf oranının hesapları açıkça gösterilmiştir.

Ticari kaygılar nedeniyle geçmiş çalışmaların çok az bir kısmının detaylarının açıklanmış olması nedeniyle geçmiş çalışmalardan faydalanma oranı kısıtlı kalmıştır. Bu nedenle vites değişim durumları ile diğer elektrik motorları kullanımıyla karşılaştırma ilerideki araştırmacılara bırakılmıştır. Ancak vites değişimini modelleyerek simülasyon yapacak araştırmacılar için dikkat edilmesi gereken bazı noktalar belirtilmiştir.

Farklı batarya modelleriyle yapılacak bir karşılaştırma, veya doğrudan tork kontrolü yöntemiyle alan yönlendirmeli kontrol arasında bir karşılaştırma da yapılması faydalı olacak çalışmalardır.

KAYNAKLAR

- (1) Hugh Donlar, Cycle and Automobile Trade Journal,
http://en.wikipedia.org/wiki/File:1906_Woods_Queen_Victoria_Electric.jpg
(Erişim tarihi: 27.07.2010)
- (2) Marc A. Herwald, Control Design And Anlysis of An Advanced İnduction Motor Electric Vehicle Drive, Yüksek Lisans Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State Üniversitesi, Virginia, 29 Nisan1999.
- (3) T.Horiba, K.Hironaka, T.Matsumura, T.Kai, M.Koseki ve Y.Muranaka, Manganese Based Lithium Batteries For Hybrid Electric Vehicle Applications, Science Direct, Power Sources 119–121, 2003.
- (4) A. Rajagopalan, G. Washington, G. Rizzoni, ve Y. Guezennec, Development of Fuzzy Logic and Neural Network Control and Advanced Emissions Modeling for Parallel Hybrid Vehicles, National Renewable Energy Labratuarı, Rapor Numarası: NREL/SR-540-32919,Ohio, Aralık 2003.
- (5) Dr. Tom Hartley ve Dr. Robert Veillette, Ultracapacitor Management System, Akron Üniversitesi, Rapor ismi: Challenge X, Akron Ohio,15 Mayıs 2007.
- (6) Nathan Michael Picot, A Strategy To Blend Series And Parallel Modes Of Operation In A Series Paralel 2 By 2 Hybrid Diesel/Electric Vehicle, Yüksek Lisans Tezi, Akron Üniversitesi, Akron Ohio, Aralık, 2007.
- (7) K. Kohnoa, Y. Koishikawab, Y. Yagib ve T. Horibab, Development of an Aluminum-laminated Lithium-ion battery for Hybrid electric vehicle application, ELSEVIER, 185, 554–558, 2008.
- (8) Shifang Li, Prasad Challa, Rajit Johri ve Girish Chandra, Optimal Design Of Hybrid Electric Vehicle, Optimal Desing Labratuarı, Rapor No:MECHENG/MFG 555, K1ř 2008.

- (9) Emma Grunditz ve Emma Jansson, Modelling And Simulation Of A Hybrid Electric Vehicle For Shell Ecomarathon And An Electric Gokart, Yüksek Lisans Tezi, Chalmers Tecnology Üniversitesi, Göteborg, 2009.
- (10) Demir Yücelen, Asım Betun, Motorlu Taşıtların Güç Aktarma Organları, 77-113, 152-157 Yüksek Teknik Öğretmen Okulu Matbaası, Ankara, 1979
- (11) Anonim, Honda Civic Hibrid Nasıl Çalışır: Özellikler, <http://www.calismaprensibi.com/hibrid-araclar/72-honda-civic-hibrid-nasil-calisir--ozellikler.html> (Erişim tarihi: 11.08.2010)
- (12) Anonim, Çevreci Toyota, hibrid araç satış liderliğini kutluyor, http://www.toyota.com.tr/about/news_and_events/toyota_hibrid_satis_lideri.aspx (Erişim tarihi: 03.08.2010)
- (13) Doç. Dr. Mustafa Tırıs, Elektrikli Araçlar Ders Notu, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Afyon, 2010-09-15
- (14) Nuri Otay, Tubitak Destekli Örnek Arge Projeleri ve Kazanımları, Ford Otosan, Adapazarı, 2008
- (15) Köseoğlu Elektromotor, http://koseoglubobinaj.com/faaliyetalani_dc_motor.html (Erişim tarihi: 15.08.2010)
- (16) MEGEP, Elektrik Elektronik Teknolojisi Elektrikli Ev Aletlerinde DC Motorlar, Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2007.
- (17) Anonim, <http://lancet.mit.edu/motors/torquepowerspeed.jpg> (Erişim tarihi: 07.08.2010)

- (18) MEGEP, Elektrik Elektronik Teknolojisi AC ve DC Makineler, Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2007.
- (19) COOPER Power Systems, <http://www.cyme.com/software/cymedynmot/tn-start-4.jpg> (Erişim tarihi: 15.08.2010)
- (20) Niyazi Ala, Asenkron Makineler Proje,
<http://www.scribd.com/doc/26091612/Proje-Adi-Asenkron-Mak%C4%B0nalar>
(Erişim tarihi: 08.08.2010)
- (21) Anonim, <http://www.tpub.com/neets/book5/32NE0444.GIF> (Erişim tarihi: 13.08.2010)
- (22) MEGEP, Elektrik Elektronik Teknolojisi Servo Motorun Mekanik Bakımı, Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2007.
- (23) Anonim, Pil, <http://tr.wikipedia.org/wiki/Pil> (Erişim tarihi: 06.08.2010)
- (24) Anonim, Elektro Kimya, <http://tr.wikipedia.org/wiki/Elektrokimya> (Erişim tarihi: 09.08.2010)
- (25) Tremblay, O., Battery,
<http://www.mathworks.com/help/toolbox/phymod/powersys/ref/battery.html>
(Erişim tarihi: 09.08.2010)
- (26) MEGEP, Elektrik Elektronik Teknolojisi Doğru Akım Esasları, Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2007.
- (27) Anonim, <http://img704.imageshack.us/img704/8421/adszcui.jpg> (Erişim tarihi: 11.08.2010)

- (28) Anonim,
http://i00.i.aliimg.com/photo/v0/288102704/lithium_battery_pack_48V_300Ah.jpg (11.08.2010)
- (29) Frank Lev, <http://www.tavrima.com/case-studies.htm> (Erişim tarihi: 11.08.2010)
- (30) Anonim, <http://www.techno-fandom.org/~hobbit/cars/training/m101.html#sld4> (Erişim tarihi: 15.08.2010)
- (31) Namık Ü., Şeyma K., Okan T., Hamdi U., Eren Ö., Azmi Y., Dr. Levent T., Doç. Dr. Fehmi A. ve Doç. Dr. Mustafa T., Elektrikli Araçlar, Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, Gebze, 2003.
- (32) Gazi Üniversitesi, OBİTET,
http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/sasi_ve_guc_aktarma_organlari/planet_disli_sasi.htm (Erişim tarihi: 15.08.2010)
- (33) Dr. Abdullah DEMİR, CVT nedir,
<http://www.nenedir.net/nenedir/otomotiv/3453-cvt-nedir?.html> (Erişim tarihi: 10.08.2010)
- (34) Anonim,
http://www.motoress.com/images/Image/TECHNIQUE/IMAGES/CVT_pulleybeltpci.jpg (Erişim tarihi: 10.08.2010)
- (35) Anonim, <http://www.clubexus.com/forums/attachments/hybrid-technology/103845d1178164667-heres-the-cvt-tranny-in-the-400h-cvt.photo.wide.jpg> (Erişim tarihi: 10.08.2010)
- (36) M.Emin Asker, Mehmet Özdemir ve Mehmet İlyas Bayındır, Sinüsoidal DGM İle Uzay Vektör DGM Yöntemlerinin Karşılaştırımlı İncelemesi, Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, 13–15 Mayıs 2009.

- (37) Volkan Erginer, Elektrikli Hibrit Araçlar ve Sürme Devreleri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- (38) Anonim,
http://2.bp.blogspot.com/_IhZ2RWW4EOI/SZnWi8T7R_I/AAAAAAAAAoM/7jgoruxZ08g/s1600-h/surtunme+kuvveti.jpg (Erişim tarihi: 13.08.2010)
- (39) John M. Miller, Propulsion Systems For Hybrid Vehicles, 23-41 MPG Books Limited, Bodmin, Cornwall, Herts, 2004
- (41) A. Sevinç, Speed Sensorless Control of Induction Motors, PhD Thesis, University of Bristol, 2001.
- (42) Murat Tuna, Hibrit Elektrikli Araçlarda(HEA) Kullanılan Konvertörlerin Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama(GSSA) Yöntemi İle Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 2008.
- (43) Ali Önder BİLİROĞLU, Seri Hibrit Elektrikli Araçların Modellenmesi ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2009.
- (44) H.F. Abdul Wahab ve H. Sanusi, Simulink Model of Direct Torque Control of Induction Machine, American Journal of Applied Sciences, 5 (8): 1083-1090, 2008
- (45) İker Özelgin ve Dr. Murat Yıldırım, Hibrit Araç Bileşenlerinin Gelişimi, Ford Otosan Ar-Ge Koordinatörlüğü, 2008
- (46) K.T. Chau ve Y.S. Wong, Overview Of Power Management In Hybrid Electric Vehicles, Energy Conversion and Management 43 1953–1968, 2002
- (47) Zhou Nenghui, Xie Hui, Yan Ying Ve Zhu Daowei, Development Of Powertrain Controller Platform For Electric Vehicles Based On Abstraction Layer

Structure, IEEE Vehicle Power and Propulsion Konefransı, Eylül, 2008, Harbin, Çin, 2008

- (48) Güngör Bal, M. Cihat Özgenel ve Şevki Demirbaş, Vektör Denetimli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu ile Performans Analizi, Politeknik Dergisi, Cilt:10 Sayı:1 sayfa7-13, 2007
- (49) Selin Özçira, Nur Bekiroğlu ve Engin Ayçiçeği, Simulation Of Direct Torque Controlled Permanent Magnet Synchronous Motor Drive, Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2007
- (50) Sariati Binti Dalib, The Simulation Of The Direct Torque Control Of Permanent Magnet Synchronous Motor, Yüksek Lisans Tezi, Teknoloji Malaysia Üniversitesi, Kuala Lumpur, Mayıs 2007.
- (51) Jeffrey Carey, A Division of Hybridkingdom,
<http://www.historyofhybridcars.com> (Erişim tarihi: 27.07.2010)
- (52) Jacob Lohner, Wikipedia, Lohner Porsche,
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lohner_Porsche.jpg (Erişim tarihi: 27.07.2010)
- (53) Osman Merdan, Elektrik Motoru Nedir Nasıl Çalışır,
<http://www.bilgiustam.com/elektrik-motoru-nedir-nasil-calisir> (Erişim tarihi: 03.08.2010)
- (54) IFCAR, 1st Toyota Prius,
http://tr.wikipedia.org/wiki/Dosya:1st_Toyota_Prius.jpg (Erişim tarihi: 03.08.2010)
- (55) Anonim, http://www.toyota.com.tr/Images/pri09_gal_009_prev_tcm385-892795.jpg (Erişim tarihi: 03.08.2010)
- (56) Anonim, <http://arsiv.ntvmsnbc.com/news/130442.jpg> (Erişim tarihi: 03.08.2010)

- (57) Uğur Sezgin, Elektrik Motoru Nedir, Atılım Üniversitesi Robot Kulübü,
http://robot.atilim.edu.tr/Ugur_Sezgin/files/1264253690_ART_Motor.pdf
(Erişim tarihi: 07.08.2010)
- (58) Nadir, Nasıl Çalışır: Bilim, Teknoloji Ve İcatlar Ansiklopedisi, Cilt6 Konu
Planet Dişli, Gelişim Yayınları, Ankara, 1980
- (59) Harun Özcan, Asenkron Motor Nedir Özellikleri Nelerdir,
<http://www.kontrolkalemi.com/forum/elektrik-motorlari/22394-asen-kron-motor-nedir-ozellikleri-nelerdir.html> (Erişim tarihi: 08.08.2010)
- (60) Anonim, Dynamic Motor Starting Analysis,
<http://www.cyme.com/software/cymedynmot/> (Erişim tarihi: 08.08.2010)
- (61) Anonim, Planet Dişli Sistemleri,
http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/sasi_ve_guc_aktarma_organlari/planet_disli_sis.html (Erişim tarihi: 09.08.2010)
- (62) IEEE Öğrenci Kolu, İstanbul Teknik Üniversitesi,
<http://ieee.itu.edu.tr/lab/hbridge.pdf> (Erişim tarihi: 09.08.2010)
- (63) Society of Automotive Engineers, Electric And Hybrid Vehicles –
Implementation Of Technology, 49-51, SAE Publications Group, Warrendale
USA, Augustos 1995
- (64) Allen Fuhs, Hybrid Vehicles And The Future Of Personal Transportation, CRC
Press Taylor & Francis Group, 276-288, Newyork, 2009
- (65) Texas Instruments Europe, Field Orientated Control of 3-Phase AC-Motors,
Literature Number: BPRA073, Subat 1998

EKLER

EK 1. ASENKRON MOTOR MODELİ

```
function xd=im_de(t,x)
% Induction motor model
% General reference frame rotating with wg.
Global
%Parametrelerin tanımları şöyledir.
% btu=Lr/(Lr*Ls-M^2); M2_Lr=M^2/Lr; M_Lr=M/Lr; a33=Rr/Lr;
% gm1= 3*np*M/2/Ji/Lr; gm2=Bf/Ji; gm3=1/Ji;
% gm1Ji=gm1*Ji; bir_dt=1/dt;
global wg vdn vqn TL i dt trq_benz ;
global btu Rs M2_Lr M_Lr M a33 gm3 gm1Ji B1 B2 TCoulomb;
%*****
% Coulomb sürtünmesini dikkate almak (AÇISAL HIZ için)
Te=gm1Ji*(x(2)*x(3)-x(1)*x(4));
Tfark = Te - TL(i) + trq_benz; % Te-TL % Benzinli motorun tork talebine cevabı trq_benz
if x(5)==0
    if abs(Tfark)<TCoulomb, Tsur=Tfark;
        %Türevi sıfır yapacak (açısal hız sıfırda KALACAK) şekilde
    else Tsur=sign(Tfark)*TCoulomb; % Açısız hız sıfır olduğu için yalnız -+TCoulomb var
    end
    wrd=(Tfark-Tsur)*gm3; % Açısız hızın türevi
else
    Tsur=sign(x(5))*TCoulomb+B1*x(5)/np+B2*(x(5)/np)^2*sign(x(5));
    % Eğer bu adımda açısal hız sıfıra ulaşıyorsa GEÇİCİ (hız sıfırlanana kadar)
    wrd=np*(Tfark-Tsur)*gm3; % Açısız hızın türevi (geçici olabilir)
    Dt=-x(5)/wrd; % Açısız hızın sıfıra ulaşma süresi (değer gerçekçi ise)
    if 0<Dt && Dt<dt
        % Açısız hızın sıfıra ulaşmasından sonraki dt-Dt süresi için hesap yapalım
        % Önce Tsur, açısal hızın sıfır olduğu durumdaki gibi hesaplanacak
        if abs(Tfark)<TCoulomb, Tsur=Tfark;
            % Türevi sıfır yapacak (açısal hız sıfırda KALACAK) şekilde
        else Tsur=sign(Tfark)*TCoulomb; % Açısız hız sıfır olduğu için yalnız -+TCoulomb var
        end
        wrd=( gm3*(Tfark-Tsur)*(dt-Dt) - x(5) )/dt;
        % Aslında kalan (dt-Dt) süresi sonunda ulaşacağı açısal hıza baştan
        % (wr hızından) itibaren dt süresi sonuna kadar türev buymuş gibi ulaşsın diye
    end
end
end
%*****
xd=[btu*(vdn-(Rs+M2_Lr*a33)*x(1)+M_Lr*(a33*x(3)+x(5)*x(4)))+wg*x(2);
```

```

btu*(vqn-(Rs+M2_Lr*a33)*x(2)+M_Lr*(a33*x(4)-x(5)*x(3)))-wg*x(1);
a33*(M*x(1)-x(3))+(wg-x(5))*x(4);
a33*(M*x(2)-x(4))-(wg-x(5))*x(3);
wrd];

```

EK 2. ANA PROGRAM

```

clear all
global vmn vtn wg TL i dt;
global btu Rs M2_Lr M_Lr M a33 gm3 gm1Ji np cc;
global wrf trq_benz c_elk dJi_dt Ji B1 B2 TCoulomb;

% MOTOR PARAMETERS
Rs=0.2147; M=0.06419; Ls=0.000991+M; Lr=Ls; Rr=0.2205; np=1; Jm=0.102; Bm=0.009541;
TCm=0.01;

% Araba parametreeri
%kutle=1000; %aracin motor kütleli olmadan, tahmini kütleli
kutle=1221; % araba kütleli
alan=1.75*1.44; % arabanın havayı yaran yüzey alanı
ksv2=0.1951; % hızın karesiyle ve alanla orantılı sürtünme kuvveti katsayısı(Ns^2/m^4)
ks=0.013; % sürtünme kuvveti katsayısı
gyc=9.81; % yerçekimi ivmesi
b1=52.76; % hızla orantılı sürtünme kuvveti katsayısı(Ns/m)
eta=0.9; % Kuvvet/tork geçiş verimi
cc=48.078; % 1. vites dönüşüm oranı, motordan tekere
cc_eta=cc*eta;

% CALCULATED CONSTANTS
dJi_dt=0;
Fcoulomb=ks*kutle*gyc; % Coulomb surtunme kuvveti (Tekerlek yuvarlanma sürtünmesi)
b2=ksv2*alan; % hızın karesiyle orantılı sürtünme kuvveti katsayısı(Ns^2/m^2)
TCoulomb=Fcoulomb/(cc_eta)+TCm;
Ji=kutle/(cc*cc_eta)+Jm;
B1=b1/(cc*cc_eta)+Bm;
B2=b2/(cc*cc_eta);
btu=Lr/(Lr*Ls-M^2); M2_Lr=M^2/Lr; M_Lr=M/Lr; a33=Rr/Lr;
gm1=3*np*M/2/Ji/Lr; gm3=1/Ji; gm1Ji=gm1*Ji; gm1_M_Ji=gm1Ji*M;

% SIMULATION PARAMETERS
dt=0.001; tf=101;
N=1000; % Plot figure at every N points simulation

% CONTROL PARAMETERS
Kp_hiz=2; Ki_hiz_dt=2*dt; trq_max=150; trq_min=-60; trq_elk_max=50;

% Speed control parameters
Kp_im=1; Ki_im_dt=100*dt; % Magnetising current control parameters
Kp_it=1; Ki_it_dt=100*dt; % Torque current control parameters
ws_max=400; i_mag_rf=11; %Miknatislanma akimi referansı
Kt=gm1_M_Ji*i_mag_rf; % torque constant

nd=0.05*0; nq=0.05*0; nw=1*0; nvm=2*0; nvt=2*0;
% noise (randn) coefficients for id, iq, wr measurements and vd,vq inputs

% INITIAL CONDITIONS
tf=tf-1e-10; % In order to secure the termination at the right time
lngth=ceil(tf/dt)+1; % Determine the size before to ensure fast simulation
t=zeros(lngth,1); wr=t; id=t; iq=t; pd=t; pq=t; hiz=t;
im=t; it=t; vm=t; vt=t; vd=t; vq=t; pm=t; pt=t; ws=t;
th=t; TL=t; FL=t;

```



```

trq_int=0; im_int=0; it_int=0;      % FOC integral initiations
i=1; j=0;
xa=[im(i);it(i);pm(i);pt(i);wr(i)]; % present state
wer_int=0; wrmd=0; wber_int=0;
psd=t; psq=t; % Stator flux tahminleri
Udc=t;
batarya_akimi=t; batarya_soc=t;
[volt,soc]=aku(batarya_akimi(i),dt/3600,1); Udc(i)=volt; batarya_soc(i)=soc;
durum=1; % durum=1 ise elektrik motoru, 0 ise benzinli motor
c_elk=1; % Elektrik motorunun katkı oranı
trq_benz=5;
wg=0;
vmn=vm(i)+nvm*randn(1); vtn=vt(i)+nvt*randn(1); % Noisy inputs

% BENZİN HESABI
enrji=34793550; %1 litre benzindne elde edilen enerji Jolue olarak
kzorn=0.20; %Benzinli motor kazancı
yakit=t;
guc_int=0;
guc=0;
yol=t;

% STARTING
figure(1),pause(1), % figure will be updated automatically
while t(i)<tf,
    ip=i+1; t(ip)=t(i)+dt; % ip is next time step index
    FL(ip)=0;
    TL(ip)=FL(ip)/cc_eta;
    dJi_dt=0;

% ACTUAL SYSTEM
vmn=vm(i)+nvm*randn(1); vtn=vt(i)+nvt*randn(1); % Noisy inputs
k1=im_ws_de(t(i),xa)*dt; k2=im_ws_de(t(i)+dt/2,xa+k1/2)*dt; % 4-step RKM solution
k3=im_ws_de(t(i)+dt/2,xa+k2/2)*dt; k4=im_ws_de(t(i)+dt,xa+k3)*dt;
% with dt time steps
xa=xa+(k1+k2*2+k3*2+k4)/6;
im(ip)=xa(1); it(ip)=xa(2); % next values
pm(ip)=xa(3); pt(ip)=xa(4);
wr(ip)=xa(5); hiz(ip)=wr(ip)/cc;
th(ip)=th(i)+(ws(i)-wg)*dt; % Angle of rotor flux with respect to the reference frame d-axis
if th(ip)>2*pi, th(ip)=th(ip)-2*pi; end,% Limiting the angle
if th(ip)<-2*pi, th(ip)=th(ip)+2*pi; end,
guc=wr(i)*trq_benz;
guc_int=guc_int+guc*dt;
yakit(ip)=guc_int/enrji/kzorn;
yol(ip)=yol(i)+hiz(i)*dt;

% Batarya modeli burada çalışacak
batarya_akimi(ip)=sqrt(im(ip).^2+it(ip).^2)*sign(vm(i)*im(ip)+vt(i)*it(ip));
[volt,soc]=aku(batarya_akimi(ip),dt/3600,0); Udc(ip)=volt; batarya_soc(ip)=soc;

% MEASUREMENTS
sn_th=sin(th(ip)); cs_th=cos(th(ip));
id(ip)=im(ip)*cs_th-it(ip)*sn_th; % d current feedback
iq(ip)=im(ip)*sn_th+it(ip)*cs_th; % q current feedback
yd=id(i)+nd*randn(1); yq=iq(i)+nq*randn(1); yw=wr(i)+nw*randn(1);
% Noisy measurements (yw is not used in sensorless operation)
im_fb=im(i)+nd*randn(1); it_fb=it(i)+nq*randn(1);

pd(ip)=pm(ip)*cs_th-pt(ip)*sn_th;
pq(ip)=pm(ip)*sn_th+pt(ip)*cs_th;

if batarya_soc(i)<0.4 durum=0; end
if batarya_soc(i)>=0.7 durum=1; end,
c_elk=c_elk*0.99+0.01*durum; % Elektrik motorunun yüklenme oranını
%ani dalgalanmalardan fazla etkilenmeyecek şekilde,

```

% kararlı değişikliklere göre değiştiriyoruz.

% Speed reference

```
wrf=100*t(ip);
if yol(ip)<45, wrf=100*pi; elseif yol(ip)<55 & t(ip)<=19, wrf=0;
elseif t(ip)>19&yol(ip)<100, wrf=100*pi; B1=b1/(cc*cc_eta)+Bm; elseif t(ip)<=38&yol(ip)<110, wrf=0;
elseif t(ip)>38&yol(ip)<155, wrf=100*pi; B1=b1/(cc*cc_eta)+Bm; elseif t(ip)<=57 & yol(ip)<165, wrf=0;
elseif t(ip)>57&yol(ip)<210, wrf=100*pi; B1=b1/(cc*cc_eta)+Bm; elseif t(ip)<=76&yol(ip)<220, wrf=0;
elseif t(ip)>76&yol(ip)<265, wrf=100*pi; B1=b1/(cc*cc_eta)+Bm; elseif t(ip)<=95&yol(ip)<275, wrf=0;
elseif yol(ip)>275 wrf=0; B1=100; end
if wrf<0, wrf=0; end
```

% CONTROL

% Hız kontrolü

```
wer=wrf-yw;
wer_int=wer_int+Ki_hiz_dt*wer; oransal=Kp_hiz*wer;
trq_ref=oransal+wer_int;
if trq_ref > trq_max, trq_ref=trq_max; end
if trq_ref < trq_min, trq_ref=trq_min; end
wer_int=trq_ref-oransal; % integrali güncelledik, limite takılma ihtimalinden dolayı
% Buradaki trq_ref, elektrikli ve benzinli
% motorların toplam torku için taleptir.
```

% Tork kontrolü

```
benz=0+max(5,(1-c_elk)*trq_ref); % Benzinli motordan tork talebi (en az 5 birim)
if trq_ref-benz > trq_elk_max, benz=trq_ref-trq_elk_max; end
slip=a33*it_fb/i_mag_rf;
ws(ip)=yw+slip;
if abs(ws(ip)) > ws_max, ws(ip)=sign(ws(ip))*ws_max; end,
```

%trq_benz=0; benz=0;

%trq_ref=5*(sign(sin(pi*t(ip)/10)));

```
it_rf=(trq_ref-benz)/Kt; % Elektrikli motordan tork talebi ise (trq_ref-benz) olacak.
% trq_ref<benz olursa elektrik motoru, jeneratör modunda çalışacak.
```

%it_rf=0; c_elk=0;

trq_benz=trq_benz*0.995+0.005*benz; % ancak benz tork talebinin gecikmeli olarak %gerçekleşeceği kabul ediliyor.

% Magnetizing Current control

```
% i_mag_rf=0;
im_er=i_mag_rf-im_fb;
im_pr=Kp_im*im_er; im_int=im_int+Ki_im_dt*im_er;
vm(ip)=im_pr+im_int;
vm_max=Udc(ip)/sqrt(3)-1e-5;
% vm(ip)=Rs*i_mag_rf-Lt*yw*it_fb;
if vm(ip) > vm_max, vm(ip)=vm_max; end,
if vm(ip) < -vm_max, vm(ip)=-vm_max; end,
im_int=vm(ip)-Kp_im*im_er; % update the integral term in case vm is in its limits
```

% Torque Current control

```
it_er=it_rf-it_fb;
it_pr=Kp_it*it_er; it_int=it_int+Ki_it_dt*it_er;
vt(ip)=it_pr+it_int;
vt_max=sqrt(vm_max^2-vm(ip)^2);
if vt(ip) > vt_max, vt(ip)=vt_max; end,
if vt(ip) < -vt_max, vt(ip)=-vt_max; end,
it_int=vt(ip)-Kp_it*it_er; % update the integral term in case vt is in its limits
```

wg=ws(ip); % ws for synch. Ref. Frame, 0 for stationary ref. Frame

% VOLTAGE VECTOR ROTATION

```
vr=sqrt(vm(ip)^2+vt(ip)^2);
beta_v=atan2(vt(ip),vm(ip));
```

```

        angle=th(ip)+beta_v;
        vd(ip)=vr*cos(angle);
        vq(ip)=vr*sin(angle);

%   vm(ip)=-200; vt(ip)=200; % fixed input

Pe(i)=(3/2)*(vd(i)*id(ip)+vq(i)*iq(ip));

% WHEN SHORTER LOOP ENDS
    if ( lor(i/N)*N==i) && i~=1,
        dim=1:ip;
        figure(1), h=plot(t(dim),[wr(dim),batarya_soc(dim)*100,yakit(dim)*1000,yol(dim)],'k');
axis([0 tf -20 380]),grid,
        set(1,'Name','Benzin ve elektrik birlikte dur-kalk')
        set(h(1),'LineStyle',':'),set(h(1),'LineWidth',1.5),set(h(2),'LineWidth',1.5),set(h(4),
'LineStyle','—'),set(h(4),'LineWidth',1.5)
        h = legend('HIZ','BATARYA ŞARJ','HARCANAN YAKIT','GİDİLEN YOL',4);
        set(h,'Interpreter','none'),
            figure(1),pause(1)
        end,
        i=ip; end

```

EK 3. BATARYA MODELİ

```

function [Vbatt,soc] = aku(i,dt,baslangic)
% yon=0 ==> discharge, yon=1 ==> charge (yon = Sel)
% dt SAAT cinsinden simülasyon adımidir.
persistent Exps it i_f enj; % it = (0-->t)integral(i dt)
% i_f ise i'nin filtrelenmiş (tau zaman sabitiyle)
% parametreler
A=0.1296*300; % Exponential voltage
bir_tau=10*3600; % 1/tau ve tau=0.1ms alındı
E0=1.2962*300; % Constant voltage
K=0.020622/1; % Polarization constant (Ah^-1)or Polarization resistance (Ohms)
Q=6.5*1; % maximum battery capacity (Ah)
B=2.5387/1; % Exponential capacity (Ah^-1)
R=0.0046154*300/1; % Internal resistance (Ohm)
dolma_verimi=0.90; % %90
enj_tam=Q*(E0+A);
if baslangic==1,
    Exps=0; it=0; i_f=0; yon=1; enj=enj_tam*0.8; it=Q*(1-enj/enj_tam)*3600;
end
if i_f >= 0, yon=1; else yon=0; end

Exps = Exps + dt*(A*yon-Exps);
it = it + dt*i;
i_f = i_f + dt*(i-i_f)*bir_tau;

% Lithium-Ion için
if yon==0,
    Ebatt = E0 - K*Q/(Q-it)*(i_f +it) + A*exp(-B*it); % discharge
else
    Ebatt = E0 - K*Q/(it+0.1*Q)*i_f - K*Q/(Q-it)*it + A*exp(-B*it); % charge
end
if Ebatt<0, Ebatt=0; end
if Ebatt>E0+A, Ebatt=E0+A; end
enj=enj-Ebatt*i*dt*((i>0)+dolma_verimi*(i<0));
if enj<0.001, enj=0.001; end
if enj>enj_tam, enj=enj_tam; end
Vbatt=Ebatt-R*i;
if Vbatt<0.001, Vbatt=0.001; end
soc=enj/enj_tam;

```