

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA (HEA) KULLANILAN
KONVERTÖRLERİN GENELLEŞTİRİLMİŞ DURUM UZAY
ORTALAMA (GSSA) YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Tek. Öğrt. Murat TUNA

Anabilim Dalı: Elektrik Eğitimi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ayşe Ergün AMAÇ

KOCAELİ, 2008

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA (HEA) KULLANILAN
KONVERTÖRLERİN GENELLEŞTİRİLMİŞ DURUM UZAY
ORTALAMA (GSSA) YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tek. Öğrt. Murat TUNA

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 23 Mayıs 2008

Tezin Savunulduğu Tarih: 23 Haziran 2008

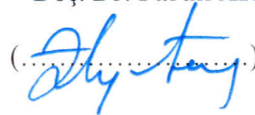
Tez Danışmanı

Yrd. Doç.Dr. Ayşe Ergün AMAÇ

(.....)

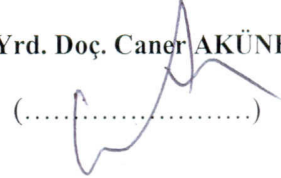

Üye

Doç. Dr. Faruk ARAS

(.....)


Üye

Yrd. Doç. Caner AKÜNER

(.....)


KOCAELİ, 2008

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Günümüzde, modern araçlarda elektronik donanımların kullanımı giderek artmaktadır. Bu yükselişi zorlayan faktörler; daha fazla güvenlik gereksinimi, düşük yakıt tüketimi, daha az kirlilik, sürücünün araç işleyişi hakkında daha fazla bilgilendirilmesi ve yardımcı sistemlerin yanı sıra, eğlence sistemleri ve konfora yönelimlerdir. 2010 yılında, üretilen ortalama otomobil maliyetinin yaklaşık %40'ını elektronik sistemlerin oluşturacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle, birçok elektronik parça üreticisi otomotiv elektroniği bileşenleri adı altında yeni ürün yelpazeleri oluşturmuşlardır. Bu bileşenler akü gerilimi, akım sınırları ve ortam koşulları dikkate alınarak imal edilmiş özel yarıiletken eleman ve devrelerdir. Bu tezde, günümüzde otomobil üreticilerinin büyük ilgi odağı olan ve yakın gelecekte de popülerliğini sürdürmesi beklenen hibrit elektrikli araçlar (HEA) ve bu araçlarda kullanılan güç elektroniği devrelerinin matematiksel olarak genelleştirilmiş durum uzay ortalama (GSSA) yöntemi ile modellenmesi konusu incelenmiştir. Ayrıca önerilen yöntemin doğruluğunu kanıtlamak için güç elektroniği devrelerinden biri pilot devre olarak seçilip PSIM programında tasarlanarak karşılaştırılması yapılmıştır.

Öncelikle bana bu çalışmayı yapma fikrini veren ve çalışma boyunca her türlü maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen tez danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Ayşe ERGÜN AMAÇ'a çok teşekkür ederim. Çalışmalarım esnasında benden yardımlarını eksik etmeyen ve hep yanımda olan Teknik Öğretmenler Muhlis AK, İsmail KOYUNCU, Alparslan ALKAN'a ve bana tezimi yazmamda destek olan şu an çalışmakta olduğum ELİMSAN A.Ş.'nin Ürün Geliştirme Koordinatörü sayın Rıfki ÖZGÜR'e de teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak, her zaman manevi desteğini hissettiğim sevgili kardeşim Ebru'ya ve AİLEM' e minnettarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ	viii
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR.....	ix
ÖZET	xi
İNGİLİZCE ÖZET.....	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür taraması ve Motivasyon	4
2. TÜMÜ ELEKTRİKLİ ARAÇLAR	7
2.1. Giriş.....	7
2.2. Elektrikli Araç Tarihçesi	7
2.3. Tümü Elektrikli Araç Yapısı ve Çalışması	13
2.4. Tümü - Elektrikli Araçların Avantajları ve Dezavantajları.....	16
2.4.1. Tümü elektrikli araçların avantajları	16
2.4.2. Tümü elektrikli araçların dezavantajları	17
2.4.2.1. Elektrikli araç maliyeti.....	17
2.4.2.2. Servis istasyonları	18
2.4.2.1. Araç menzili ve batarya teknolojisi	18
2.5. Gelecekte Elektrikli Araç Teknolojilerinin Otomotiv Sektörüne Etkileri ve Yeni Oluşumlar	19
3. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLAR	24
3.1. Giriş.....	24
3.2. Hibrit Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi	27
3.2.1. Giriş	27
3.2.2. Honda insight	29
3.2.3. Honda civic	30
3.2.4. Toyota prius	30
3.2.5. Prototip ve deneysel hibrid elektrikli araçlar	31
3.3. Tahrik Sistemine göre Hibrit Elektrikli Araçların Sınıflandırılması.....	33
3.3.1. Seri tahrik sistemi (Seri Hibrit)	35
3.3.2. Paralel tahrik sistemi (Paralel Hibrit)	37
3.3.3. Seri / Paralel tahrik sistemi (Seri/Paralel Hibrit)	38
3.4. Hibrid Elektrikli Araçların Avantajları ve Dezavantajları	39
3.4.1. Hibrid elektrikli araçların avantajları	39
3.4.2. Hibrid elektrikli araçların dezavantajları	40
3.4.2.1. Seri hibrit sistemin dezavantajları	41
3.4.2.2. Paralel hibrit sistemin dezavantajları	41
3.5. Yakıt Pili Elektrikli Araçlar	41
3.5.1. Yakıt pili	41
3.6. Yakıt Pili ve Yakıt Pili Araçların Avantajları ve Dezavantajları	46
3.6.1. Yakıt pilli araçların avantajları	46

3.6.2. Yakıt Pili Araçların Dezavantajları	47
3.7. Güç Üretim Sistemi ve Emisyonlar.....	47
4. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN ALT SİSTEMLER.....	49
4.1. Hibrit Elektrikli Araçlarda Enerji Kaynakları.....	49
4.1.1. Geleneksel Enerji Depolama Sistemleri (Bataryalar)	49
4.1.1.1. Kurşun - asit batarya	51
4.1.1.2. Nikel-demir batarya	52
4.1.1.3. Nikel-çinko batarya.....	52
4.1.1.4. Nikel kadmiyum batarya	53
4.1.1.5. Nikel-metal hidrür batarya	53
4.1.1.6. Sodyum-sülfür batarya	54
4.1.1.7. Sodyum-nikel klorür batarya	54
4.1.1.8. Lityum-demir sülfat batarya	55
4.1.1.9. Lityum-katı polimer batarya	55
4.1.1.10. Lityum-iyon batarya	55
4.1.1.11. Alüminyum -hava ve çinko -hava bataryalar	56
4.1.2. Süperkapasitörler ve ultrakapasitörler.....	57
4.1.3. Volanlar	59
4.2. Hibrit Elektrikli Araçlarda Güç Kontrol Sistemleri	63
4.2.1. AC/DC Dönüştürücüler (Doğrultucular).....	64
4.2.1.1. Kontrolsüz Doğrultucular	66
4.2.1.2. Kontrollü Doğrultucular	67
4.2.1.3. Doğrultucuların Elektrikli Araçlarda Kullanımı	68
4.2.2. DC/DC dönüştürücüler (Kıyıcılar).....	69
4.2.2.1. Azaltan (Buck) çevirici	69
4.2.2.2. Yükselten (Boost) çevirici.....	70
4.2.2.3. Kıyıcıların kontrolü	71
4.2.2.4. Kıyıcıların hibrit elektrikli araçlarda kullanım alanları	72
4.2.3. DC/AC Dönüştürücüler (Eviriciler).....	75
4.3. Hibrit Elektrikli Araçlarda Kullanılan Motor Tahrik Sistemleri	77
5. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇ TÜRLERİNİN ENERJİ YÖNETİMİ VE SÜRÜŞ SİSTEMLERİ.....	79
5.1. Sürüş Kontrolü ve Sınıflandırma	79
5.2. Enerji Akışı Kontrolü	80
5.2.1. Seri Hibrit Kontrol	82
5.2.2. Paralel Hibrit Kontrol	83
5.2.3. Seri-Paralel Hibrit Kontrol	84
5.2.4. Kompleks Hibrit Sistem	87
6. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA (HEA) KULLANILAN KONVERTÖRLERİN GENELLEŞTİRİLMİŞ DURUM UZAY ORTALAMA (GSSA) YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ.....	91
6.1. Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama (GSSA) Metodu	91
6.2. Yükselten (Boost) DC/DC Dönüştürücünün GSSA Yöntemi ile Matematiksel Olarak Modellenmesi	94
6.2.1. Yükselten Boost dönüştürücünün modellenmesinde PSIM ile GSSA'nın karşılaştırmalı analizi	99
6.3. GSSA Metodunun Azaltan (Buck) Dönüştürücülere Uygulanması	101
6.4. Azaltan-Yükselten (Buck-Boost) DC/DC Dönüştürücünün GSSA ile Matematiksel Olarak Modellenmesi	105

7. SONUÇLAR	111
KAYNAKLAR	114
EKLER	118
ÖZGEÇMİŞ	121

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1:	Morris ve Salomon' un Electrobats elektrikli aracı.....	8
Şekil 2.2:	Londra elektrikli taksi aracı.....	9
Şekil 2.3:	Tümü elektrikli araç temel enerji akış dizaynı	14
Şekil 2.4:	Tümü elektrikli araç tahrik sistemi.....	15
Şekil 2.5:	24 ton ağırlığında FNSS Savunma Sistemleri A.Ş. ile TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi ortak projesi elektrikli muharebe aracı.....	20
Şekil 2.6:	WIESEL elektrikli hafif zırhlı paletli araç	20
Şekil 2.7:	SEP lastik paletli hafif zırhlı elektrikli piyade aracı.....	21
Şekil 3.1:	Honda Insight hibrit elektrikli araç	30
Şekil 3.2:	Toyota prius hibrit elektrikli araç	31
Şekil 3.3:	Seri hibrit Tofaş-Fiat Doblo aracı (ELİT-1).....	31
Şekil 3.4:	Tofaş-Fiat Doblo seri hibrid elektrikli araç kontrol ve güç şeması.....	32
Şekil 3.5:	Hibrit elektrikli araçların yıllara göre dağılımı	33
Şekil 3.6:	Hibrid elektrikli araç oluşturan parçalar.....	34
Şekil 3.7:	Seri hibrid elektrikli araç tahrik sistemi blok şeması	35
Şekil 3.8:	Seri hibrid sistem.....	36
Şekil 3.9:	Bataryalı seri hibrid sistem açık tek hat şeması	36
Şekil 3.10:	Paralel hibrid elektrikli araç tahrik sistemi	37
Şekil 3.11:	Paralel hibrid sistemin yerleşim dizaynı.....	38
Şekil 3.12:	Seri-paralel hibrit elektrikli araç tahrik sistemi blok şeması.....	39
Şekil 3.13:	Yakıt pili içyapısı ve elektrik enerjisi üretim prensibi	42
Şekil 3.14:	Bir yakıt pili çalışma prensibinin şematik gösterimi.....	43
Şekil 3.15:	Yakıt pilli hibrit elektrikli araç tahrik sistemi	44
Şekil 4.1:	Enerji depo eden (kapasitörler, süper ve ultra kapasitörler, bataryalar, yakıt pilleri) elemanların özel durumlardaki ihtiyaçlarına göre birbirleri ile karşılaştırılması	57
Şekil 4.2:	EDLC sistemlerinin elektrik yükü ile nasıl yüklendiklerini gösteren şema.....	58
Şekil 4.3:	HEA kullanılan enerji depolama elemanlarından volanın yapısı.....	60
Şekil 4.4:	CCM firmasının Emafer adını verdiği volan sistemi	62
Şekil 4.5:	Güç elektroniğinde kontrol amaçlı kullanılan yarı iletken güç elemanlarının akım, gerilim ve anahtarlama frekanslarına göre karşılaştırılması	63
Şekil 4.6:	HEA kullanılan 12V-24V iki yönlü DC/DC dönüştürücü	64
Şekil 4.7:	Yakıt pilli HEA kullanılan 60V...400V ayarlı DC/DC dönüştürücü.....	64
Şekil 4.8:	Hibrit elektrikli güç sistemi	65
Şekil 4.9:	Doğrultucuların blok diyagramı	65
Şekil 4.10:	Bir fazlı köprü tipi kontrolsüz doğrultucu	66
Şekil 4.11:	Üç fazlı kontrolsüz köprü tipi doğrultucu	67
Şekil 4.12:	Bir fazlı kontrollü köprü tipi doğrultucu	67
Şekil 4.13:	Üç fazlı kontrollü köprü tipi doğrultucu.....	68
Şekil 4.14:	İYM + generatörün DC bara bağlantısı.....	68

Şekil 4.15: Hibrit elektrikli araçlarda akü şarj devre sistemi.....	69
Şekil 4.16: Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan alçaltıcı DC-DC çevirici devre şeması	70
Şekil 4.17: Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan yükselten DC-DC çevirici devre prensib şeması	71
Şekil 4.18: Alçaltıcı-yükseltici DC-DC çevirici devre şeması	71
Şekil 4.19: Tam köprü DC-DC çevirici bağlantı şeması	71
Şekil 4.20: PWM dalga işaretinin üretilmesi.....	72
Şekil 4.21: Kontrol işaretinin üretilmesi.....	72
Şekil 4.22: HEA farklı seviyedeki DC gerilimlerin birbirlerine paralel bağlanması	73
Şekil 4.23: Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan yakıt pilinin araç iletim barasına yükselten DC/DC çevirici ile bağlanması	73
Şekil 4.24: Hibrit elektrikli araçlarda motoru sürmek ve batarya ile süperkapasitör arasındaki enerji akışını sağlayan DC/DC çeviricinin devre şeması	74
Şekil 4.25: İki bölge DC motor sürücüsü	74
Şekil 4.26: Dört bölge DC motor sürücüsü	75
Şekil 4.27: Bir fazlı evirici devresi	75
Şekil 4.28: Kare dalga evirici kontrol ve çıkış gerilimleri.....	76
Şekil 4.29: Evirici kontrol ve çıkış gerilimleri	76
Şekil 5.1: Hibrid elektrikli araçların sınıflandırılması.....	79
Şekil 5.2: Seri hibrit elektrikli araç çalışma modları	82
Şekil 5.3: Paralel hibrit elektrikli araç çalışma modları	84
Şekil 5.4: Seri-paralel hibrit elektrikli araç (içten yanmalı motor ağırlıklı) çalışma modları	85
Şekil 5.5: Seri-paralel hibrit elektrikli araç (elektrik ağırlıklı) çalışma modları	86
Şekil 5.6: Kompleks hibrit (ön hibrit, arka elektrikli) elektrikli araç çalışma modları.....	88
Şekil 5.7: Kompleks hibrit (ön elektrikli, arka hibrit) elektrikli araç çalışma modları.....	89
Şekil 6.1: PWM yükselten DC/DC dönüştürücü. ($v_{in}=20$ V, $R_o=9\ \Omega$, $L=1$ mH, $C=50\ \mu$ F, $T_s=0.1$ ms).....	95
Şekil 6.2: Psim programından elde edilen yükselten DC/DC dönüştürücünün akım(I_y)-gerilim(V_o) zaman eğrileri.....	95
Şekil 6.3: HEA'ta kullanılan ve GSSA yöntemi ile modellenen yükselten dönüştürücü. ($v_{in}=20$ V, $R_o=9\ \Omega$, $L=1$ mH, $C=50\ \mu$ F, $T_s=0.1$ ms)	95
Şekil 6.4: Yükselten dönüştürücüde anahtarlama fonksiyonu $u(t)$	96
Şekil 6.5: GSSA yöntemi ile elde edilen 6.31 nolu matris denklemin Matlapta yazılan EK - A'daki çözümden alınan devrenin akım gerilim sonuçları	98
Şekil 6.6: Yükselten dönüştürücünün $d=0.25$ görev devri için çıkış gerilimi $v_o(t)$ 'nin GSSA ve SSA dalga şekilleri	99
Şekil 6.7: Yükselten dönüştürücünün $d=0.25$ görev devri için PSIM programından alınan çıkış gerilimi $v_o(t)$ 'nin benzetişim sonuçları.	99
Şekil 6.8: Yükselten dönüştürücünün $d=0.25$ görev devri için akım $i_L(t)$ 'nin GSSA ve SSA dalga şekilleri	100

Şekil 6.9: Yükselten dönüştürücünün $d=0.25$ görev devri için PSIM programından alınan akım $i_L(t)$ 'nin benzetişim sonuçları.....	100
Şekil 6.10: Yükselten dönüştürücünün $d=0.5$ görev devri için akım $i_L(t)$ ve gerilim $v_0(t)$ ' nin GSSA ve SSA dalga şekilleri	100
Şekil 6.11: Yükselten dönüştürücünün $d=0.5$ görev devri için PSIM programından alınan akım $i_L(t)$ ve gerilim $v_0(t)$ benzetişim sonuçları... ..	101
Şekil 6.12: PSIM programından alınan DC/DC PWM buck dönüştürücü ($v_{in}=20$ V, $R_o=9 \Omega$, $L=1$ mH, $C=50 \mu F$, $T_s=0.1$ ms).....	101
Şekil 6.13: HEA'ta kullanılan ve GSSA yöntemi ile modellenen alçaltan DC/DC boost dönüştürücü ($v_{in}=20$ V, $R_o=9 \Omega$, $L=1$ mH, $C=50 \mu F$, $T_s=0.1$ ms)	102
Şekil 6.14: GSSA yöntemi ile elde edilen (6.53)'teki matris denkleminin Matlab programı ile EK-B'deki çözümünden elde edilen akım $i_L(t)$ ve gerilim $v_0(t)$ sonuçları.....	105
Şekil 6.15: PSIM programından alınan DC/DC buck-boost dönüştürücü devre şeması	105
Şekil 6.16: PSIM programından elde edilen Buck-Boost DC/DC dönüştürücünün akım $i_L(t)$ – gerilim $v_0(t)$ zaman eğrileri	106
Şekil 6.17: HEA'ta kullanılan ve GSSA yöntemi ile modellenen DC/DC buck-boost dönüştürücü ($v_{in}=20$ V, $R_o=8,5 \Omega$, $L=1$ mH, $C=50 \mu F$, $T_s=0.1$ ms).	107
Şekil 6.18: GSSA yöntemi ile elde edilen (6.82)'teki matris denkleminin Matlab programı (EK-C) ile çözümünden elde edilen akım $i_L(t)$ ve gerilim $v_0(t)$ sonuçları	110

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1: Üretim hattında olan prototip ve deneysel tümü elektrikli araçlar	13
Tablo 3.1: Üretilmekte ve geliştirilmekte olan hibrit elektrikli araçlar	29
Tablo 3.2: Halen geliştirilmekte olan yakıt pilleri ve teknik değerleri	45
Tablo 3.3: 2002 yılında Avrupa'daki araçların zararlı gaz salım oranları (petrol, dizel, LPG, elektrik)	47
Tablo 3.4: 2002 yılında Avrupa'daki şehirlerde enerji üretiminin ve motorların CO2 yayma oranları	48
Tablo 4.1: Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan akülerin genel bir karşılaştırılması	50
Tablo 4.2: Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan batarya özellikleri	50
Tablo 4.3: Kurşun-asit batarya, volan ve süperkapasitörlerin birbirlerine göre teknik özelliklerinin karşılaştırılması	59
Tablo 4.4: Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan volan enerji depolama sisteminin kurşun-asit bataryaya göre karşılaştırılması	61

SEMBOLLER

C	: Kapasite, (Farad)
d	: görev devri
f	: frekans,(hz)
J	: atalet momenti, (N/kgm)
k	: geometriye bağılı bir sabit sayı,
L	: endüktans, (Henry)
R	: direnç,(ohm)
T	: peryot (1/hz)
U	: Volanlarda depolanan enerji, (Joule)
w	: açısal hız,(rad/sn)

σ	: gerilme direnci
ρ	: malzeme yoğunluğu, (kg m ⁻³) :

Kısaltmalar

BG	: Beygir Gücü
CCM	: Sürekli İletim Modu
CO	: Karbon Monoksit
EDLC	: Electrochemical Double-Layer Capacitor
EPA	: Amerikan Çevre Koruma Ajansı
EUCLID	: Avrupa Uzun Vadeli Savunma İşbirliği
EVS	: Elektrikli Araç Sempozyumunda
FESS	: Volanlı Enerji Depolama Sistemleri
GE	: General Electric
GSSA	: Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama
GTO	: Gate Turn-off Thyristor
HEA	: Hibrit Elektrikli Araç
IGBT	: Insulated gate bipolar transistor
IGCT	: Insulated Gate Controlled Thyristor
KOYP	: Katı Oksit Yakıt Pili
MCT	: Mos Controlled Thyristor
MDS	: Magneto-Dinamik Enerji Depolama Sistemi
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NEC	: Nippon Electric Company
NiCd	: Nikel-Kadmiyum
NiMH	: Nikel-Metal Hidrür
NOx	: Azot Oksitler
PEMYP	: Proton Elektrolit Membranlı Yakıt Pili
PRI	: Pinnacle Research Institute
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
SCR	: Silicon Controlled Rectifier
SM	: Sürekli Miknatıslı Senkron Motor
SSA	: Durum Uzay Ortalama

UJT : Bipolar Transistör
TEA : Tümü Elektrikli Araç

HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN KONVERTÖRLERİN GENELLEŞTİRİLMİŞ DURUM UZAY ORTALAMA YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

Murat TUNA

Anahtar Kelimeler: Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA), Genelleştirilmiş Durum Uzay Yöntemi (GSSA), DC/DC Dönüştürücüler.

Özet: Hibrit elektrikli araçlar (HEA), enerjinin iki ya da daha fazla enerji kaynağından sağlandığı ve bu enerji kaynaklarından en az bir tanesinin elektrik enerjisi olduğu bir araç olarak tanımlanmıştır. Bu tezde öncelikle hibrit elektrikli araçların tarihçesinden ve günümüze kadar gelişiminden söz edilmiştir. Daha sonra hibrit elektrikli araçlarda kullanılan alt sistemler, güç kontrol sistemlerine ve araçtaki enerji yönetimine değinilmiştir. Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan güç elektroniği aksamlarından biri de DC/DC dönüştürücüler, diğer adıyla kıyıcılar. Güç elektroniği dönüştürücüleri anahtarlama yapıları sebebiyle periyodik olarak zamanla değişen sistemlerdir. Bu nedenle, dönüştürücülerin dinamik davranışları doğrusal olmayan özellik gösterir. Böyle sistemlerin analizi ve tasarımı oldukça zordur. Bu durumda modelleme ve benzetişim; güç elektroniği devrelerinin analiz ve tasarım sürecinin en önemli unsurlarından biri haline gelmektedir. Bu tezde, DC/DC dönüştürücü türlerinin GSSA yöntemi ile matematiksel olarak modellenmesi incelenmiştir. Genelleştirilmiş durum uzay ortalama metodu (GSSA), sistemin doğrusal olmayan denklemlerini doğrusal durum uzay sistemine dönüştürür. Bu yöntemde, hesaplanan işaretin harmonik durum değişkenleri de belirlenmekte ve hesaba katılmaktadır. Ayrıca sistem parametrelerine tam ve hızlı bir yaklaşım başarılmıştır. Bu metot kullanılarak sistem doğrusallaştırılmıştır. Böylece sistemin durum değişkenleri arasındaki ilişki doğrusal denklemlerle açıklanabilir. Tez çalışmasının son kısmında yükselten bir DC/DC dönüştürücünün PSIM benzetişim programı ile yapılan gerçek zaman benzetişimleri ile genelleştirilmiş durum uzay ortalama (GSSA) yönteminden alınan sonuçlar karşılaştırılmış ve önerilen yöntemin geçerliliği ispatlanmıştır.

USING CONVERTERS OF HYBRID ELECTRIC VEHICLES MODELLING WITH GENERALIZED STATE-SPACE AVERAGING METHOD

Murat TUNA

Keywords: Hybrid Electric Vehicles (HEVs), Generalized State-Space Averaging Method (GSSA), DC/DC Converters.

Abstract: Hybrid Electrical Vehicles (HEVs) are defined as a vehicle the energy is provided by two or more energy sources and, one of these sources has to be an electrical energy in hybrid electrical vehicle, at least. Firstly a brief history of hybrid electrical vehicles and development until now is mentioned in this thesis. After that, subsystems of hybrid electrical vehicles using such as battery, internal combustion engine and supercapacitor, power electronics and control systems, and management of energy systems are explained in detail. DC/DC converters are one of the components of hybrid electrical vehicle system. These are periodic time-variant systems because of their switching operation. Therefore, converters have non-linear characteristic as dynamic behaviour. Analysis and design of such systems is rather difficult. Under the circumstances, modelling and simulation is the one of the most important process in analysis and design of power electronic circuits. In this thesis, DC/DC converter topologies have been mathematically analyzed with generalized state space averaging (GSSA) method. The non-linear equations of the system have been converted to a linear state space model by GSSA method. Also, harmonic state variables of the counted signal has been defined and calculated for the next step in this method. In addition, an exact and fast approximation to the system parameters has been achieved. Therefore the non-linearity of the system has been removed thanks to the method. Thus, the relation between the state space variables of the systems has been explained by linear-equations. A boost DC/DC converter has been analyzed with Power Sim (PSIM) simulation program as a sample in the last section of the thesis. Then the same topology has been experimented with generalized state space averaging (GSSA) method. The results of the simulation of the GSSA models have been compared with real-time PSIM simulations results. Consequently, the validity of suggested method has been proved in this study.

1.GİRİŞ

Günlük yaşamın değişen sosyal, teknik ve çevresel gereksinimleri ve öncelikleri, günümüz otomobillerinde elektriksel ve elektronik aygıtların kullanımını büyük ölçüde arttırmıştır. Araç teknolojilerindeki gelişmeler, elektriksel ve elektronik gelişmeleri aşağıdaki başlıklara dayanarak incelemektedir [1].

- Gövde, konfor ve kolaylık sistemleri,
- Güvenlik ve korunma,
- Elektrik-elektronik güç sistemleri,
- Bilişim sistemleri,
- Otomotiv elektroniği ile genel kullanıcı elektroniğinin karşılaştırılması,
- Güç aktarım sistemleri.

Klasik mekanik hareket düzeneklerinin yerini, gittikçe artan bir şekilde elektromekanik sistemler almaktadır. Yarıiletken ve sensör teknolojilerindeki hızlı ilerlemeler, zeki ve güvenli bir sürüşe olanak vermekte, aynı zamanda kolaylık ve tasarruf sağlamaktadır. Ayrıca hibrit elektrikli araç (HEA) teknolojisindeki gelişmeler, performanstan ödün vermeden yakıt tüketiminin azalmasına imkan sağlamaktadır.

Son yıllarda özellikle otomotiv endüstrisinde, elektronik sistem kullanımına eğilim çok büyük artış göstermiştir. Bir anlamda, otomotiv sektörünün geleceğinin elektronikte ulaşılan gelişmelere bağlı olduğu söylenebilir. Günümüzde, modern araçlarda kullanılan elektronik sistemlerin ve fonksiyonların sayısı büyük artış göstermektedir. Bu gelişmeyi zorlayan faktörler, daha fazla güvenlik gereksinimi, düşük yakıt tüketimi, daha az zararlı gaz salımı, sürücünün araç işleyişi hakkında daha fazla bilgilendirilmesi ve yardımcı sistemlerin yanı sıra eğlence sistemleri ve konfora yönelimlerdir. 2010 yılında, üretilen ortalama otomobil maliyetinin yaklaşık %40'ını elektronik sistemlerin oluşturacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle, birçok

elektronik parça üreticisi otomotiv elektroniği bileşenleri adı altında yeni ürün yelpazeleri oluşturmuşlardır. Bu bileşenler akü gerilimi, akım sınırları ve ortam koşulları dikkate alınarak imal edilmiş özel yarıiletken eleman ve devrelerdir [1,2].

HEA; enerjinin iki ya da daha fazla enerji deposundan sağlandığı ve bu enerji depolarından en az bir tanesinin elektrik enerjisi verdiği bir araç olarak ifade edilmektedir. Bu genel ifadeye bağlı olarak hibrit elektrikli araçlarda içten yanmalı motor (İYM), batarya, süperkapasitör ve yakıt pili gibi kaynaklar kullanılmaktadır. Bir diğer tanımlamada ise HEA, daha çok hem İYM' un hem de elektrikli motorun kullanıldığı araç olarak kabul edilmektedir [2].

HEA uygulamalarında kullanılan konvertörler, farklı gerilim seviyesine bağlı sistemlerin (yakıt pili, akü grubu veya alçak gerilim beslemesine ihtiyaç duyan elektronik devreler) birbirine bağlanması ve DC motor kontrolü amacıyla kullanılmaktadır. HEA'larda ana bara ile yardımcı besleme kaynakları (bataryalar, süper ve ultrakapasitörler, yakıt pilleri, güneş pilleri) DC olduklarından ve bu tür araçlarda DC/DC dönüştürücüler daha çok kullanım alanları bulduklarından bu çalışmada DC/DC konvertörler üzerinde durulacaktır.

Elektrikli araç teknolojileri içerisinde güç elektroniği devreleri önemli bir yer tutmaktadır. MOSFET, IGBT, IGCT ve MCT gibi yarı iletken anahtarların geliştirilmesi ile elektrik sistemlerinin kontrolünde önemli gelişmeler sağlanmıştır. Birçok endüstriyel uygulamada mevcut sabit bir doğru gerilimin, değişken bir doğru gerilime dönüştürülmesi istenir. DC kıyıcı, DC gerilimi doğrudan ayarlanabilir bir DC gerilime dönüştürür. Bir kıyıcı, çevirme oranı kademesiz olarak değiştirilebilen bir AC transformatör olarak düşünülebilir. Transformatörde olduğu gibi, gerilimi düşürebilir veya yükseltebilir.

DC/DC dönüştürücüler uluslararası uzay istasyonları (ISS), uzay gemileri ve uçak güç sistemlerinde, elektrikli ve hibrit elektrikli otomobillerin motor kontrolünde, deniz taşıtlarında, telekomünikasyonda, bilgisayar sistemlerinde ve tıbbi elektronik gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Yumuşak bir hızlanma ve yavaşlama, yüksek verim ve hızlı bir dinamik davranış sağlarlar. DC motorların faydalı fren

olarak çalıştırılarak enerjinin kaynağa geri verilmesi için de DC kıyıcılardan yararlanılabilir. Bu sayede özellikle çok sık durup kalkan taşıt araçlarında enerji tasarrufu sağlanır. DC gerilim regülatörlerinin gerçekleştirilmesinde, örneğin akım kaynaklı invertörlerin beslenmesi için, endüktansı büyük bir bobinle birlikte akım kaynağı elde edilmesi gibi daha pek çok uygulamada kullanılabilirler. Karmaşık bir g elektronikisi sisteminin bir parçasını oluşturabilirler. DC/DC konvertör olarak da tanımlanan çeviriciler çoğunlukla regüle edilmemiş DC gerilim kaynağının, kontrollü bir biçimde sabit DC gerilime dönüştürülmesi için kullanılır. eviricilerin genel çalışma prensibi belirli bir periyot içerisinde yarı iletken anahtarın iletme ve kesime geçmesi ve sonucunda da ortalaması giriş geriliminden farklı bir çıkış geriliminin sağlanmasıdır. En yaygın kontrol yöntemi, sabit bir anahtarlama frekansında anahtarın iletim süresinin ayarlandığı darbe genişlik modülasyonu (DGM) adı verilen yöntemdir [3].

DGM anahtarlama dönüştürücülerin modellenmesinde çeşitli benzetişim programları (MATLAB, PSIM, PSPICE, vb.) ya da geleneksel ortalama (State Space Averaging-SSA, Synchronous Reference frame-SRF, vb.) metodları kullanılmaktadır. Benzetişim programlarının geniş bilgisayar kaynaklarına ve uzun benzetim zamanlarına ihtiyaç duyması, geleneksel ortalama metodlarını avantajlı hale getirmiştir. Çünkü bu yöntem anahtarlama modellere göre daha hızlıdır ve çok fazla bilgisayar kaynağına gereksinim duymaz. Ancak geleneksel ortalama modeller hızlı ve büyük sinyal hareketlerini takip edemez [4].

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde hibrit ve elektrikli araçların tarihçesinden, gelişiminden, günümüzde yapılan çalışmalardan ve gelecekte beklenen durumdan bahsedilmiştir.

nc bölümünde hibrit ve elektrikli araç sistemlerinden ve bu sistemlerin avantajları ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Ayrıca hibrit elektrikli araç türlerinden ve yapılarından bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde hibrit elektrikli araçlarda kullanılan alt sistemler ve alt sistemlerin yapılarından, çalışmasından ve teknik özellikleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde hibrit elektrikli türlerinin enerji yönetimi ve sürüş kontrolünden bahsedilmiştir. Altıncı bölümde ise hibrit elektrikli araçlarda kullanılan konvertörlerin modellenmesinde, geleneksel ortalama metodlarının dezavantajlarını ortadan kaldıran genelleştirilmiş durum uzay ortalama (GSSA) metodu kullanılmıştır. Bu metotta harmonikler gibi durum değişkenlerinin ortalaması da hesaba katılmaktadır. Ayrıca bu bölümde ideal bir DC/DC Boost dönüştürücü, GSSA ile modelledikten sonra PSIM programından alınan sonuçlarla karşılaştırılarak önerilen yöntemin doğruluğu ispatlanmıştır. Tezin son bölümü olan sonuçlar kısmında hibrit elektrikli araçlarda kullanılan konvertörlerin modellenmesinde GSSA metodunun niçin kullanıldığını ve tezin amacından bahsedilmiştir.

1.1 Literatür Araştırması ve Motivasyon

Güç elektroniği uygulamalarında kontrol amaçlı kullanılan dönüştürücülerin GSSA yöntemi ile modellenmesi ile yapılan bilimsel çalışmalar 1997 ve 1998 yılları arasında başlamaktadır. Bu literatür araştırmanın kapsamında bu tarihten günümüze kadar yapılan çalışmalar şunlardır;

Mahdavi, Emadi ve diğerleri (1997), GSSA yöntemini temel DC/DC topolojilere uygulamışlardır. GSSA yönteminden elde edilen benzetişim sonuçlarını, tam topoloji durum uzay modeli ve iyi bilinen durum uzay ortalama metodu ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak; anahtarlama frekansı, konvertörlerin doğal frekansından çok yüksek değil ise bu yaklaşım yönteminin, artan hesaplamalara rağmen modelin doğrulunu kanıtlamak için önemli bir faktör olduğunu kanıtlamışlardır. SSA ve GSSA yönteminden elde edilen ortalama hareketler üzerinde anahtarlama frekansının etkisini yaptıkları detaylı analizler göstermektedir. Bu sonuçlardan GSSA yönteminin birinci sıra yaklaşımının gerçek modele daha yakın olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca bu yöntemin konvertörlerin tasarım ve kararlılık analizlerinde kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Emadi (2004), çoklu DC güç elektroniği sistemlerinin modellenmesi ve analizlerinde GSSA yöntemini kullanmıştır. Büyük sinyal modelini yapmak için modüler yaklaşım tabanlı GSSA tekniğini kullanmıştır. Ayrıca sunulan metodla örnek sistemin tüm analizini gerçekleştirmiştir. Simülasyon sonuçlarını; kesin durum uzay modeli ve iyi bilinen durum uzay ortalama metodu ile karşılaştırmıştır. Ek olarak da anahtarlama frekansı ve görev devri gibi farklı parametrelerin etkisinin, GSSA yönteminden elde edilen harmonikler ve ortalama hareket üzerindeki etkisini, yaptığı detaylı analizlerle gözlemlemiştir.

Tuncay ve Üstün (2005), yaptıkları çalışmada otomotiv elektroniğindeki gelişmeleri ele almışlar. Geçmişten günümüze dikkat çekerek Elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar hakkındaki gelişmelere yer vermişlerdir. Ayrıca hibrit elektrikli araçların türlerinde ve bunların çalışma şartlarından bahsetmişlerdir.

Zhu (2004), elektrikli araç teknolojisinde önemli bir yere sahip olan süperkapasitörler ile ilgili bir araştırma gerçekleştirmiş. Bu çalışmasında süperkapasitörlerin tarihçesinden, özelliklerinden, modellenmesinden ve uygulama alanlarından bahsetmiştir.

Sun ve Grotstollen (1997), anahtarlama güç dönüştürücünün modellenmesinde ortalama metodun sembolik analizlerini gerçekleştirmiştir. Yaptığı analizler sonucunda, ortalama metodların bilgisayar yardımıyla modellemede tartışmasız daha uygun olduğunu göstermiştir.

Nasiri ve Emadi (2003), aktif filtre sistemlerinin modellenmesinde, benzetişiminde ve analizinde Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama (GSSA) metodu kullanmışlar. Bu yöntem sayesinde sistemin doğrusal olmayan denklemleri lineer durum uzay modeline dönüşmüştür. Bu metodla sisteme hızlı ve güvenli bir yaklaşım gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemi tek fazlı paralel, tek fazlı seri ve üç fazlı paralel aktif filtre sistemlerine uygulamışlardır.

Emadi (2004), yaptığı çalışmasında AC dağıtım sistemlerinin içindeki güç elektroniği yüklerinin modellenmesinde Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama (GSSA) metodunu kullanmıştır.

Nasiri (2005), yaptığı bu çalışmada deniz ve deniz altı araçlarında kullanılan güç elektroniği devrelerinin sebep olduğu harmoniklerin kaynaklarını, etkilerini ve çözümlerini araştırmıştır. Doğrusal yük olmayan güç elektroniği devreleri, deniz araçlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yükler güç sisteminden sinüzoidal olmayan akımlar çekerler ki bu akımlar da gerilim harmoniklerine sebep olurlar.

2. TÜMÜ ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

2.1. Giriş

Tümü Elektrikli Araç (TEA) kavramı, uzun yıllardır otomobil sektörünün Ar-Ge bölümlerinden prototip atölyelerine doğru olan yolculuğuna başlamıştır. Ancak seri üretime doğru olan yolculuğunu ise daha tamamlayamamıştır. Tümü-EA'lar 1900'lü yılların başlarında kullanılmaya başlanmıştır. Tümü elektrikli araçların getirdiği yenilikler kısaca aşağıda özetlenmiştir [1,2]:

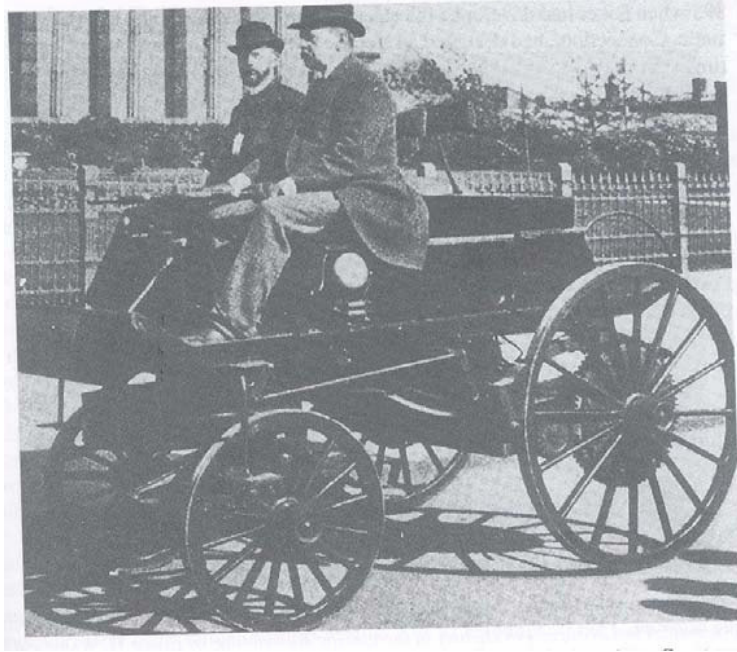
- Tümü-elektrikli araç, modern elektrikli tahrik teknolojisi kullanılarak geliştirilmiş elektrik motoru, güç konvertörü ve enerji kaynağını içermektedir.
- Tümü-EA'larda yakıt, elektrik enerjisi dönüşümü gerçekleşmemekte, elektrik enerjisi batarya, volan veya süperkapasitörler ile depolanmaktadır.
- Tümü-EA'lar yeni bir aracın ötesinde taşımacılık hizmetlerinin, sıfır zararlı gaz salımı ve daha yüksek verim ile sağlanmasına yol açacak köklü bir değişimdir.
- Tümü-EA'lar modern taşımacılık ağları ile uyumlu olarak akıllı sistemleri oluşturmayı sağlayacaktır.
- İşletme koşulları ve çalışma döngüleri yeniden tanımlanacaktır.
- Son kullanıcı, her bakım-üretim seviyesi ve alakalı sektörlerde altyapı, eğitim ve standardizasyon ihtiyacı ortaya çıkacaktır.

2.2. Elektrikli Araç Tarihçesi

İlk EA modeli 1835 yılında Hollanda'da Profesör Stratingh tarafından yapılmıştır. 1834–1836 yılları arasında Thomas Davenport tarafından ABD'de elektrikli yol aracı geliştirilmiş ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu araç üç tekerlekli olmakla beraber şarj edilmeyen bataryalarla tahrik edilmiştir. 4 yıl sonra Robert Davidson şarj edilemeyen batarya ile tahrik edilen elektrikli lokomotifini geliştirmiştir [2].

1859 yılından sonra kurşun-asit bataryaları geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır. 1882 yılında İngiltere’de Prof. William Ayrton ve John Perry elektrik tahrikli 3 adet tekerlekli aracın uygulamasını yapmıştır. Bu araçların her birinde 10 tane kurşun-asit batarya kullanılmıştır. Aracın menzili araziye bağlı olarak 16–20 km arasında olup azami hızı ise 14 km/saattir. Bundan 3 yıl sonra Carl Benz İYM ile 3 tekerlekli aracı geliştirmiştir [1,2].

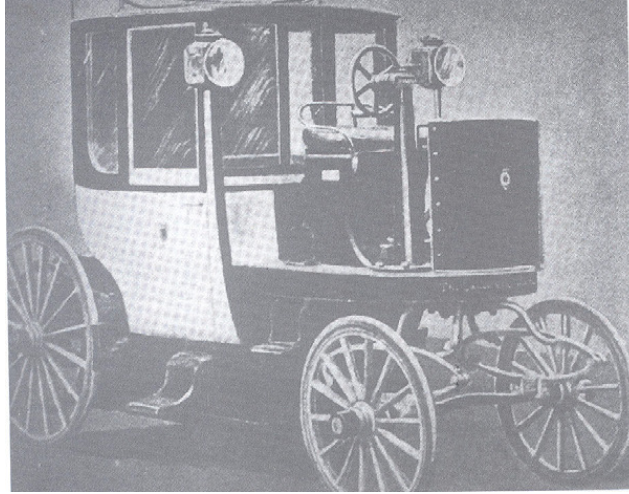
19. yüzyılın son dönemlerine doğru Amerika, İngiltere ve Fransa’da birçok şirket elektrikli araç üretmeye başlamıştır. Bu üreticilerden en önemlisi Morris ve Salomon’un sahibi olduğu Electric Carriage and Wagon Company adlı şirkettir. Morris ve Salomon 1895 yılında Şekil 2.1’de gösterilen 2 oturma koltuğu olan Electrobats isimli elektrikli aracı geliştirmişlerdir.



Şekil 2.1: Morris ve Salomon’ un Electrobats elektrikli aracı [2].

EA’larla ilgili bu ilerlemeler olurken, İYM’lar da hızla geliştirilmeye devam etmektedir. 1900 yılında Amerika’da üretilen araçların 1684 tanesi buhar tahrikli, 1575 tanesinin elektrik tahrikli ve 963 tanesinin de İYM’lu olduğu belirtilmektedir. Amerika’da bu gelişmeler devam ederken, 1897 yılında İngiltere’de “Londra Elektrikli Taksi Şirketi” (London Electrical Cab Company) tarafından 15 tane taksi kullanıma alınmıştır. Şekil 2.2’de Londra elektrikli taksi gösterilmiştir [2].

1900–1912 arası dönemde menzil ve performansı artırma düşüncesi oluşmaya başlamıştır. Bu amaçla 1900 yılında French Electroautomobile ve 1903 yılında Krieger elektrikli-benzinli araçları geliştirmiştir. Bu araçta elektrik motor, benzinli motor ile birlikte kullanılmış ve ilk defa hibrit konfigürasyonu denenmiştir.



Şekil 2.2: Londra elektrikli taksi aracı [2].

Bu dönemlerde Ferdinand Porsche ilk deneysel hibrit elektrikli aracın tasarımını yapmıştır. Mixt Wagen olarak adlandırılan bu araçta yardımcı bir benzinli motor kullanılmıştır. İYM bataryaları şarj eden generatörü tahrik etmektedir ve daha sonra elektrik motorunu döndürmektedir.

1916 yılında Woods hibrit elektrikli araç üretilmiştir. Bu araçta 4 silindirli küçük benzinli motor doğrudan elektrik motoru/generatör grubuna ve daha sonra geleneksel itici şaftıyla ön tahrik aksına bağlanmıştır. Bu düzenleme ile paralel hibrid elektrikli araç geliştirilmiştir. 1920'lerin başında ise hemen tüm elektrikli araç üreticileri İYM kullanarak üretimlerini sürdürmüşlerdir. 1920'lerin ortasından itibaren 1960 yıllara dek İYM'lu araçlar tüm dünyada tamamen üstünlük kurmuştur. 1960'lı yıllarda EA'lara duyulan ilgi yeniden artmaya başlamıştır. İYM'lardan kaynaklanan hava kirliliği bu araçların üretimine geçiş düşüncesini oluşturmuş ve bazı küçük üreticiler hava kirliliğine karşı EA'ların üretimine geçmiştir. Üretilen çoğu elektrikli araçlar, geleneksel araçların elektrikli hale dönüştürülmüş şeklidir. Örneğin 1960'da Illinois'deki Eureka Williams Şirketi 4 kapılı Renault Dauphine'i elektrikli versiyona dönüştürmüştür [2].

İYM'lu araçları elektrikli versiyona dönüştüren bazı önemli otomotiv firmaları, bu dönemlerde elektrikli aracı baştan sona tasarlamak üzere harekete geçmiştir. Buna bir örnek, İngiltere'deki Ford Motor firmasıdır. 1966 yılında bu firma aşağıdaki gereksinimleri karşılayacak bir elektrikli aracı tasarlamak üzere işe koyulmuştur:

- En düşük zararlı gaz salımı,
- Kolay çalışma,
- Düşük ilk satın alma ve kullanım maliyeti,
- Küçük boyut.

1967 yılında ilk prototip yapılmış ve Comuta adı verilmiştir. Comuta her biri ön tekeri tahrik eden 2 tane DC motoruna sahiptir. Her motor 18 kg ağırlığında ve 14 cm çapındadır. Motorun titreşimini kontrol eden bir sistem geliştirilmiştir. Aracın gücü, toplam ağırlığı 170 kg olan 4 adet kurşun-asit bataryasından sağlanmaktadır. Araç 40 km/saat hız ile 64 km menzile sahip olup; azami hızı 64 km/saattir.

1968 yılında General Electric (GE), GE Delta aracının uygulamasını ortaya çıkartmıştır. Bu aracın menzili 64 km, azami hızı da 89 km/saattir. Bu araçta nikel-demir bataryaları kullanılmıştır. Aynı yıl Ford, nikel-kadmiyum bataryaları kullanarak deneysel E-Car aracının prototipini yapmıştır. Bu dönemde, AC tahrikindeki çok önemli bir gelişme olmadıkça kabul edilebilir menzil ve performansa sahip EA'ların üretiminin zor olduğu görülmüştür.

1970'lerin ortalarına doğru petrol krizi ile birlikte başta Amerika, İngiltere, Fransa, Almanya, İtalya ve Japonya gibi birçok ülke, elektrikli araç araştırmalarına tekrar hız vermişlerdir. Amerika'daki bazı küçük firmalar geleneksel araçları elektrikli hale dönüştürme çabalarına girmiştir. Avrupa'da 1970'li yıllar çok aktif bir dönemdir. 1973'de Electricite de France 80 tane geleneksel aracı elektrik tahrikli hale dönüştürmüştür. Almanya'da Daimler-Benz ve Volkswagen ise deneysel EA'lar yapmışlardır. 1975 yılında İtalya'da Fiat X1/23 B isimli deneysel bir prototip geliştirmiştir. Bu araç 2 kişilik olup kurşun-asit bataryaları içermekte ve DC elektrik motoru tarafından tahrik edilmektedir. Menzili 48 km ve azami hızı 64 km/saatin altındadır.

Japonya'da 1970'li yıllar boyunca Daihatsu, Toyota, Mazda ve Mitsubishi birlikte prototip EA'lar üzerine çalışmışlardır. Bu çalışma için Japonya hükümeti tarafından 1971–1976 yılları arasında 20 milyon dolarlık destek sağlanmıştır. İlk araçlarda kurşun-asit bataryalarıyla birlikte DC tahriki kullandıkları ve 1980'lerden itibaren AC tahrikinin kullanılmaya başlandığı görülmektedir.

1980'li yıllarda hükümetler EA'ların çevresel avantajları nedeniyle bu araçlara karşı ilgi duymaya ve elektrikli araç programları için resmi kaynaklardan parasal destek vermeye başlamışlardır. Böylece 1980 yılların ortalarında ABD Enerji bakanlığının sponsorluğu ile Ford/GE tarafından ETX-1 aracının geliştirilmesi sağlanmıştır. Bu araçta ileri AC tahrik sistemi kullanılmıştır. 200 V'luk kurşun-asit bataryaları, 300A AC güç üreten Darlington transistör bazlı evirici ile birlikte 37 kW'lık 2 kutuplu indüksiyon motorunu tahrik etmek için kullanılmıştır.

1988 yılında Ford ve GE birlikte ETX-1 isimli aracın AC tahrikli sistemini geliştirmiş ve sodyum-sülfür bataryaları kullanmışlardır. Temel olarak Ford Araştırma Laboratuvarlarında geliştirilen evirici, sürekli mıknatıslı senkron motoru sürmektedir. Bu motor, 2 kademeli entegre dişli kutusu ile, taşıtın ön aksına monte edilmiştir. 160 km menzile sahip ve 96 km/saat hızı olan ve sodyum-sülfür bataryaları da içeren 2 tane ETX-2 prototipi üretilmiştir. Bu 2 araç 1988 yılı Aralık ayında ABD enerji bakanlığına teslim edilmiştir.

Fransa'da 1988 yılında 500 kadar elektrikli araç deneysel olarak kullanılmıştır. Bu araçların çoğu Peugeot 205 ya da Citroen C15 modellerinin dönüşümleridir. Almanya'da 1970'lerin sonlarındaki deneysel araçlar daha geliştirilmiştir ve 1988 yılında GES City Stromer isimli aracın dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Taşıt, o dönemin Avrupa Güvenlik Standartlarını karşılayacak şekilde tasarlanmıştır.

Aynı dönemde İtalya'da Fiat Panda Elettra modelinin dönüşümü olan elektrikli aracı geliştirmiştir. 1988'de Japonya'da DC tahrik AC'nin yerini almış hem kurşun-asit hem de nikel-demir bataryaları ile senkron ve indüksiyon tahrik motorları kullanılmıştır.

EA'ların tarihçesindeki dönüm noktaları [2]:

- 1800 Volta primer hücre ve bataryayı geliştirdi.
- 1821 Faraday elektrik motorunun temel prensibini ortaya koydu.
- 1834 Davenport primer bataryalı ilk elektrikli yol aracının uygulamasını yaptı.
- 1859 Plante sekonder hücre ve bataryayı geliştirdi.
- 1869 Gramme 1 bergir gücü (BG)' den daha fazla ilk DC elektrik motorunu yaptı.
- 1881 Trouve sekonder bataryalı ilk elektrikli aracı yaptı.
- 1885 Benz ilk İYM'li aracın uygulamasını gerçekleştirdi.
- 1887–98 Avrupa'da ve Amerika'da kullanılan EA'ların menzili geliştirildi.
- 1899 Jenatzy 105.9 km/saat ile dünya hız rekorunu kırmış ve bu rekoru 3 yıl elinde tutmuştur.
- 1900 Eşit sayıdaki buharlı, elektrikli ve benzinli araçlar birbirleriyle yarıştı.
- 1900–12 EA'ların altın dönemi yaşandı.
- 1921–60 Benzin motorlu araçlar tamamen yaygınlaşmaya EA'lar ise yok olmaya başladı.
- 1960–90 EA'lar çok az sayıda da olsa tekrar görünmeye başladı.
- 1990 Yeni batarya teknolojileri ile artan sayıda elektrikli araç görülmeye başladı.

1990 yılından sonra birçok araç üreticisi elektrikli araç geliştirmeye başlamıştır. Hali hazırda bulunan bazı EA'lara örnek olarak GM EV1, Ford Think City, Toyota RAV4, Nissan Hipermini ve Peugeot 106 Electric gösterilebilir. Bunlarla birlikte prototip ve deneysel amaçlı üretilmiş birçok elektrikli araç daha bulunmaktadır (Tablo 2.1). Bu araçların çoğunda AC indüksiyon motor veya sürekli mıknatıslı (SM) senkron motor kullanmışlardır.

Tablo 2.1: Üretim hattında olan prototip ve deneysel tümü elektrikli araçlar [2].

Üretici	Citroen	Daihats	Ford	GM	GM	Honda	Nissan	Nissan	Peuge	Rena ult
Model İsmi	AX/Saxo Electric	Hijet EV	Think City	EV1	EV1	EV Plus	Hypermini	Altra EV	106 Electric	Clio Electric
Tahrik Tipi	DC motor	SM senkron	3 Fazlı İndik.	3 Fazlı İndik.	3 Fazlı İndik.	SM senkron	SM senkron	SM senkron	DC motor	AC İndiksiy.
Batarya Tipi	NiCd	-----	NiCd	Pb-asit	NiMH	NiMH	Li-iyon	Li-iyon	NiCd	NiCd
Güç kW	20	-----	27	102	102	49	24	62	20	22
Gerilim V	120	-----	114	312	343	288	-----	345	120	114
Batarya Enerji Kapasitesi kWh	12	-----	11,5	16,2	26,4	-----	15	32	12	11,4
Şarj Konektö	-----	-----	İletken	Endükt	Endükt	İletken	İletken	İletken	-----	İletken
Hız (km/h)	91	100	90	129	129	129	100	120	90	95
Menzil (km)	80	100	85	95	130	190	115	190	150	80
Şarj süresi (saat)	7	7	5-8	6	6	6-8	4	5	7-8	-----
Satış Fiyatı (\$)	-----	23 990 \$	-----	-----	-----	-----	36 000 \$	-----	27000\$	27 400 \$

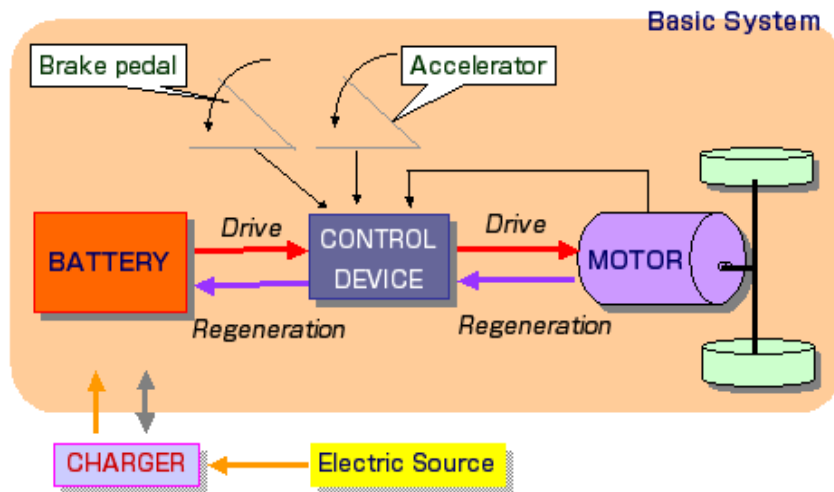
1990'larda büyük araç üreticileri EA'ların gelişmesi için batarya teknolojisinin de gelişmesi gerektiğini belirtmekte, bu amaçla da tümü-EA'ların batarya ve menzil kısıtlarını gidermek için hibrid elektrikli araç geliştirme çalışmaları başlatılmıştır. Özellikle Japon endüstrisi Toyota Prius, Honda Insight ve Nissan Tino modellerini geliştirmiştir.

2.3. Tümü Elektrikli Araç Yapısı ve Çalışması

Klasik araçlarda mekanik enerji içten yanmalı motorlar tarafından üretilir, vites kutusu, transmisyon mili ve diferansiyel üzerinden tekerleklere taşınır. Hidrojen yanmalı motorlar ise henüz araştırma aşamasında olup benzer yapıdadır, ancak yakıt olarak hidrojen kullanılmaktadır. Buna karşılık Tümü Elektrikli Araçlar (TEA)' da tekerlek tahrik gücü elektrik makineleri tarafından sağlanır.

TEA’da, araç içerisine yerleştirilmiş enerji üretim, dağıtım ve tahrik sistem elemanları birlikte çalışmaktadır. Sistem içerisindeki elemanların birbirlerine bağlanma şekilleri, enerji akışındaki tercihleri ve farklılıklarına göre tahrik sistem konfigürasyonları tanımlanmıştır.

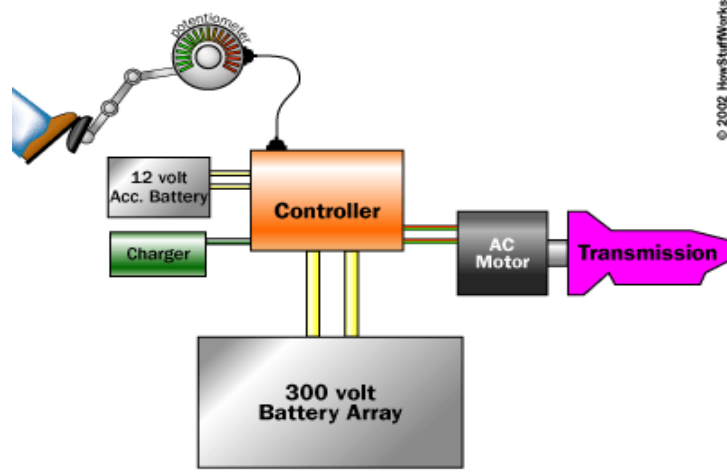
TEA, depolanan ya da üretilen tüm itici gücü elektrik olarak kullanmaktadır. Bu tip araçlarda ana güç kaynağına ek olarak yardımcı güç kaynakları da bulunmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi elektrik motorunun dönmesi için gerekli olan elektriksel enerji bataryalardan elde edilmektedir. Bunun yanında TEA’lar da ana bataryaya ilave yardımcı güç kaynağı olarak ikinci bir batarya veya süperkapasitör kullanılabilir. Bu yardımcı güç kaynakları maksimum performans istendiği çalışma şartları altında; örneğin bir yokuşu tırmanırken veya ivmelenirken kısa periyotlar için yüksek güç sağlayabilmektedir. Yüksek enerji yoğunluğu uzun sürüş menzili, yüksek güç yoğunluğu ise ivmelenme ya da yokuş tırmanma ihtiyacını karşılayan tasarım parametreleridir. Bu durumun etkisi; öncelikle yüksek enerji, düşük güç yoğunluğuna sahip batarya tipleri için önemlidir. Örneğin alüminyum-hava bataryalar 220 Wh/kg gibi yüksek enerji yoğunluğunun yanında, 30 W/kg gibi düşük güç yoğunluğuna sahiptirler. İyi bir ivmelenme veya tırmanma performansı için yüksek güç yoğunluğuna ihtiyaç duyulması durumunda yüksek güç yoğunluğuna sahip yardımcı güç kaynağına gereksinim duyulmaktadır. Şekil 2.3’de TEA akış şeması görülmektedir [3].



Şekil 2.3: Tümü elektrikli araç temel enerji akış dizaynı [3].

Yüksek bir ivmelenme için son yıllarda prototip TEA’larda yardımcı güç kaynağı olarak süperkapasitörler kullanılmaktadır. Mevcut süperkapasitörlerin enerji yoğunluğu yaklaşık 15 Wh/kg civarında olmasına rağmen güç yoğunluğu 1 kW/kg dır. Yürütülen çalışmalarda önümüzdeki yıllarda bu değerin 4 kW/kg değerine yükseltilmesi hedeflenmektedir.

TEA’ların şarj edilebilir bataryalarında depolanmış bulunan elektrik enerjisi motor denetleyicisine güç sağlamaktadır. Motor denetleyicisi gaz pedalının pozisyonuna bağlı olarak elektrik motoruna gidecek gücün miktarını ayarlamaktadır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4: Tümü elektrikli araç tahrik sistemi [4].

TEA’lar geleneksel araçlara göre daha verimlidir. Bir bataryalı elektrikli araç yaklaşık %46 verimle çalışmasına karşın, geleneksel araçlar %18-25 arasında çalışmaktadırlar. Bir başka deyişle elektrikli araç bataryalarının şarjı için prizden çekilen enerjinin %46’sı tekerleklerde kullanılabilir işe dönüştürülmektedir. Bunun tersi, geleneksel araçlarda yakıt tankında bulunan sıvı yakıtın %18-25 kadarı tahrik tekerlerinde işe dönüştürülebilmektedir. Ancak bu durumda elektriğin santrallerde üretilmesi sırasında oluşan kayıplar dikkate alınmalıdır.

2.4 Tümü - Elektrikli Araçların Avantajları ve Dezavantajları

2.4.1 Tümü elektrikli araçların avantajları

TEA’da tekerlek elektrik motoru tarafından tahrik edilmektedir. Elektrikli araçta yüksek miktarda itme kuvvetinin sağlanabilmesi için gerektiğinde birden fazla elektrik motorunun kullanılabilirdiği çeşitli uygulamalarda görülmektedir.

Elektrik motoruna sağlanan güç ise enerji depolama sistemlerinden elde edilen elektrik enerjisinden sağlanmaktadır. Burada gücün elde edilebilmesi için gerekli olan enerji yakıtın yanmasıyla değil enerji depolama sistemi olan bataryalardan elde edildiğinden TEA’larda benzin, dizel ya da yanabilen diğer yakıtlar kullanılmamaktadır. Bu nedenle TEA’larda hiç yakıt tüketilmediği için zararlı gaz salınımı açığa çıkmaz ve bu araçlar “sıfır zararlı gaz salımlı araçlar” olarak adlandırılmıştır [3,4].

Taşıtta bulunan bataryaların şarj edilmesi için gerekli elektriğin üretilmesinde az miktarda zararlı gaz açığa çıksa bile TEA’larda tüm yakıt çevrimi boyunca geleneksel taşıtlara göre daha az seviyede toksin ve ozon tabakasına zarar verici gazlar açığa çıktığı görülmektedir.

TEA’larda İYM olmadığı ve elektrik motoru olduğu için bu araçlar sessiz çalışmaktadır. Regeneratif frenleme sayesinde daha uzun fren ömrü vardır ve kinetik enerji geri kazanılarak elektrik motoru generatör gibi kullanılarak kinetik enerji elektrik enerjisine dönüştürülmekte ve bataryaları besleyerek şarj etmektedir.

Yakıt maliyeti de dahil olmak üzere bakım maliyeti geleneksel araçlara göre çok daha düşüktür. Hareketli elemanlar fazla olmadığı için bunların ayarına ya da yağ değişikliğine gerek yoktur.

2.4.2 Tümü elektrikli araçların dezavantajları

2.4.2.1 Elektrikli araç maliyeti

TEA üretimindeki yüksek maliyet; elektrikli araç pazarının gelişmesini sınırlamaktadır. Bu araçların pazarda geniş bir şekilde yayılmasını engelleyen en önemli etken satın alma maliyetinin çok yüksek olmasıdır. Örneğin General Motors'un EV1 modeli 33.995\$ iken benzinli Chevrolet Cavalier 13.670\$'a satılmaktaydı. Fakat tümü EA'ların yakıt maliyeti geleneksel araçlara göre çok daha düşüktür. Örnek olarak küçük bir geleneksel aracın yakıt maliyeti yıllık ortalama 690\$ iken TEA'ların çok daha düşük olup 390\$ - 480\$ arasındadır.

TEA'ların yakıt maliyeti düşük olduğundan petrol fiyatlarının artmasıyla bu araçların ön plana çıkması beklenmektedir. Ancak TEA maliyetinin önemli bir kısmını oluşturan bataryalar gibi henüz geliştirilme aşamasında olan kritik parçalarının mevcut şartlarda 3-5 yıl içerisinde yenilenmesi, kullanım maliyetini arttırmaktadır.

EA'ların yaygınlaşp pazar potansiyelinin artması için elektrikli araç satış maliyetinin azaltılması gerekmektedir. ABD Enerji Bakanlığı (U.S Energy Department) Mayıs, 1995 ve ABD Genel Muhasebe Bürosu (U.S General Accounting Office) ise Aralık, 1994'den itibaren tümü-EA'ların hem satış hem de yaşam-döngüsü maliyetlerinin azaltılması üzerinde çalışmaya başlamışlardır.

Otomobil üreticileri yeni tasarımlar yaparak araç maliyetini azaltmaya çalışmaktadırlar. Bununla birlikte elektrikli araç teknolojisi ile batarya teknolojisi gelişmekte ve bu nedenle taleplerin artmaya başlayacağı düşünülmektedir. Maliyeti azaltmanın bir diğer yolu ise hükümet ve endüstri destekli teşviklerin artırılması yönündedir. Böylelikle araç maliyetinin yanında kullanım maliyeti de azalacaktır.

Elektrikli araç teknolojisi geliştikçe talebin artacağı ve maliyetin düşeceği açıktır. Bu durum TEA'ların tüketiciler tarafından kabulünü hızlandıracaktır.

2.4.2.2 Servis istasyonları

EA'lar piyasada satışa sunulduğu zaman geleneksel araçlarda olduğu gibi bakım ve onarım için gerekli servis istasyonları olmalıdır. Önemli sayıda elektrikli araç pazarda olduğu zaman araç üreticileri tüketicinin isteklerine cevap verebilecek kadar eğitilmiş teknik personel bulundurmalı ve araçta herhangi bir problem olduğu zaman aracına gerekli bakımını ve onarımını yaptırabileceği servislere ihtiyaç duyulmaktadır.

2.4.2.3 Araç menzili ve batarya teknolojisi

TEA'ların yayılmasını engelleyen bir diğer etken de araç performansıdır. Taşıtlara tahrik sağlayan bataryalar oldukça ağırdır ve taşıtın menzili sınırlıdır. Geleneksel yolcu aracı depoyu yakıtla doldurduktan sonra yaklaşık 500–600 kilometre yol alırken TEA'lar şarj edildikten sonra çok daha az yol alabilmektedirler. Tüm dünyada ileri kurşun-asit bataryaların geliştirilmesi konusunda yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda temel amaç bataryaların enerji yoğunluğunu artırarak TEA'ların menzilini arttırmaktır.

Tümü-EA uygulamalarının en zayıf yanı akü teknolojileridir. Akülerin anlık enerji verme yeteneklerinin sınırlı oluşu, doldurulmalarının uzun zaman alması, ağırlık ve hacimlerinin küçültülememiş olması ve tüm sistem maliyetinin yüksekliği, bu gün tümü elektrikli araç teknolojisinin ticari bir başarı sağlayamamış olmasının başlıca nedenidir.

Akü teknolojisine destek olarak, özellikle ani yüksek akımları verebilmek ve çok kısa zaman içinde yeniden dolabilme özellikleri bulunan süperkapasitörler geliştirilmiş bulunmaktadır. Birkaç deney aracına takılmış olmasına karşın, süperkapasitör ile aküye destek olan veya akünün tamamen yerini alan topolojiler, gerek performans yönünden gerekse maliyet açısından henüz istenen düzeye ulaşamamıştır. Üzerinde çalışılan ve ümit vadeden gelişmelerden birisi olarak görülmektedir.

Elektrikli aracın gelişimine bir diğer engel olarak geleneksel bir aracın deposunun doldurulmasının birkaç dakika almasına karşın, bir TEA'ı tamamen şarj etmenin yaklaşık 5–8 saatlik zaman gerektirmesidir. Bazı yüksek hızlı şarj cihazları, aracı 3–4 saatte şarj edebilmektedir. Fakat bu şarj cihazları bataryaların ömrünü kısaltmaktadır.

2.5. Gelecekte TEA Teknolojilerinin Otomotiv Sektörüne Etkileri ve Yeni Oluşumlar

Dünyada gelişen çevresel duyarlılık ve fosil kökenli kaynakların azalmasının oluşturduğu talep doğrultusunda elektrikli araç teknolojisinde ve elektrikli sürüş tahrik sistemlerinde hızlı gelişmeler ortaya çıkmaktadır. Bu durum sivil araç uygulamalarının yanında elektrikli muharebe araç konusunda yapılan çalışmaları hızlandırmıştır. Elektrikli muharebe araçlarının askeri alanda kullanımı envanterinde buldukları ordulara büyük avantajlar sağlayacaktır. Askeri alanda kullanımın sivil uygulamalara nazaran avantajları aşağıda özetlenmiştir:

- Esneklik
- Düşük ağırlık/hacim
- Yüksek menzil
- Optimum dizel performansı
- Sessizlik
- Düşük iz
- Yüksek ivmelenme
- Frenlemede enerji kazanımı
- Düşük maliyet
- Düşük lojistik destek ihtiyacı
- Güç kaynağı modu.

Avrupa Uzun Vadeli Savunma İşbirliği (EUCLID) programı çerçevesinde “Elektrik Mühendisliği” konulu çalışma alanında elektrikli taşıtların gelişmesinde büyük rol oynayacak “Enerji Depolama Sistemleri”, “Yakıt Pilleri” ve “Kara Taşıtları Entegrasyonu” projelerinde Türkiye adına Milli Savunma Bakanlığı AR-GE dairesi ile TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi görev almıştır [2].

Kara Taşıtları Entegrasyonu projesi, 24 ton ağırlığında konvansiyonel bir muharebe aracının savaş gücünün ve hareket kabiliyetinin artırılması amacıyla, elektrikli hale dönüştürülmesiyle ilgili yeni bir çalışmadır (Şekil 2.5). Projede kullanılacak ana sistemler, ayrı projelerde tek tek ele alınmakla birlikte, araç tasarımında bir bütün olarak incelenmiştir. Muharebe aracı ve sivil araç uygulamasında kullanılacak teknolojilerin gelişmesine ışık tutmuş önemli bir projedir. Bu projeye 6 ülkeden (İsveç, Hollanda, İtalya, Finlandiya, Yunanistan ve Türkiye) 12 şirket ve araştırma kurumları katılmıştır.



Şekil 2.5: 24 ton ağırlığında FNSS Savunma Sistemleri A.Ş. ile TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi ortak projesi elektrikli muharebe aracı [2].

Bu projelere katılan ülkeler, proje çalışmalarının paralelinde kendi milli araçlarını geliştirebilmek için ayrı projeler başlatmışlar ve önemli adımlar atarak ilk prototiplerini dünyaya sergilemişlerdir (Şekil 2.6–2.7).



Şekil 2.6: WIESEL elektrikli hafif zırhlı paletli araç [2].



Şekil 2.7: SEP lastik paletli hafif zırhlı elektrikli piyade aracı [2].

Bu bölüme kadar elektrikli araç teknolojilerinin günümüzdeki durumu anlatılmıştır. Bu kısımda ise elektrikli araç teknolojilerinde beklenen değişimler ve bunların etkileri üzerine çeşitli yaklaşımlar verilmektedir. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere EA teknolojileri arasında yer alan kritik unsurlar sırası ile;

- Daha hafif, küçük, güvenilir ve düşük maliyetli elektrik motorları/generatörleri,
- Daha yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip, uzun ömürlü, güvenilir ve düşük maliyetli batarya sistemleri,
- Boyut ve ağırlıkça daha küçük, yüksek devirli, sabit yükte optimize edilmiş İYM'lar,
- Hidrojen üretim, depolama ve yakıt pili teknolojileri,
- Güç elektroniği sistemleridir.

Bu konularda, otomotiv sektörünün tüm önemli firmaları, çeşitli uzmanlıklar ve büyük mali kaynak kullanarak nihai ürüne ulaşmayı hedefleyen çalışmalar yürütmektedir. Bunun yanında birçok ülke ulusal araştırma programlarını yönlendirerek bu çalışmaları ivmelendirmektedir. Başta Japonya olmak üzere Güney Kore ve İsveç gibi ülkelerde, elektrikli taşıtlara olan ilgiyi arttırabilmek için satın alma fiyatına destek teşvikleri uygulanmaktadır. Birçok ülkede çeşitli programlar ve hedefler tanımlanarak, finansman, altyapı ve insan kaynakları ile de destek verilmektedir.

Japonya, tüketiciye direkt mali teşvikler, sıfır emisyonlu araçlar (Zero Emission Vehicle) programına ve diğer ilgili projelere büyük çaplı destekler sağlamaktadır. Japon hükümeti bu sayede Toyota ve Honda gibi şirketlerinin büyük pazar payları kazanmasını hedeflemektedir.

Çin hükümeti birçok firmayı alt sistemlerin üretilmesi için doğrudan desteklemektedir. Bilhassa güç elektroniği ve batarya teknolojilerinde batılı firmaların oldukça altında fiyatlar ile üretim başlatılmıştır. Çin yeniden oluşacak otomotiv sektöründe en ön saflarda yer almayı hedeflemiştir.

Avrupa topluluğu nispeten nihai ürünlere doğru olan bu yarışta daha geriden takip etmekle birlikte çerçeve programları ile ciddi finansman kaynakları ayırmaktadır. Ayrıca ana üretici şirketlere elektrikli araç çalışmalarında doğrudan destek sağlamaktadır.

Güney Kore’de farklı şirketler devletin araştırma kurumları ile birlikte çalışmaktadır. Mali ve uzmanlık destekleri ile yürütülen programlarda aracın kendisi ve alt sistemler üzerinde uzmanlaşılması hedeflenmektedir.

SAE International Başkanı 2000 yılı Elektrikli Araç Sempozyumunda (EVS) verdiği açılış konuşmasında belirttiği gibi, otomotiv sektörü geçtiğimiz yüzyılda mevcut içten yanmalı motora sahip araç konseptini neredeyse mükemmelleştirmiştir.

Ancak önümüzdeki 10–15 yıl içerisinde sektörde yeniden yapılanma gerçekleşecektir. Bu yapılanmaya hazır firmalar ve ülkeler kendilerini başrollerde bulabilecektir. Gelecek 20 yıl içerisindeki elektrikli araç teknolojilerinde beklenen gelişmelerden yola çıkılarak 2025 yılına değin elektrikli araç konseptleri hakkında düşünceler aşağıda verilmiştir [1-4].

- Tümü-EA’lar kısa vadede şehir içi gibi kısa menziller için tercih edilecek ve düşük maliyetli, düşük teknolojlili bataryalar kullanılacaktır (nikel-metal hidrür veya kurşun-asit). Daha sonra teknolojinin gerektirdiği ileri lityum-iyon bataryalı tümü-EA’lar yollarda görülecektir.

- Kısa vadede performansın şehir içi kullanım için değişmeyeceği ve bataryalar tam şarj edildiğinde 100 km kadar menzil vereceği düşünülmektedir. Aracın şarjı, bir güç kaynağından endüktif olarak ve hızlı sistemler ile sağlanacaktır. Ancak kısa ve orta vadede hibrit araçların avantajları ve uzun dönemde yakıt pilli araçların devreye girmesi nedeni ile tümü EA'lar belli satış rakamlarında kalacaktır.
- HEA, pazara en yakın ve kısa dönemde en ümit vaat eden ürün niteliğindedir. Paralel hibrit konfigürasyonları başta olmak üzere bir çok ürün grubunda hızla çoğalmaları beklenmektedir. HEA'lar üzerinde yürütülen çalışmalar, maliyet azaltma, optimizasyon, tasarım, alt sistemler ve üretim teknikleri geliştirme yönündedir. Hibrit araçların mevcut dağıtım ve bakım altyapısına uyum sorunları bulunmamaktadır. Hibrit araçlar prototip fazını tamamlayarak, seri üretim fazına geçiş sürecindedir.
- Düşük maliyetli güvenilir yakıt pilli EA'ların orta ve uzun vadede pazarda yer almaya başlayacağı belirtilmektedir. Araçta azami güç gereksinimlerini karşılamak için ilave yardımcı batarya sistemine ihtiyaç duyulacaktır.

Yakıt pili kısa vadede sıkıştırılmış hidrojen, devamında orta vadede yakıt dönüştürücüler ya da sodyum bor hidrür sistemler ile beraber çalışacağı düşünülmektedir. Uzun vadede tüm yakıt pilli araçlarda güvenli ve yüksek yoğunlukta depolanmış hidrojen kullanılacaktır.

3. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

3.1. Giriş

Hibrit Elektrikli Araç (HEA) kavramı ise, geçtiğimiz on yılda otomobil sektörünün Ar-Ge bölümlerinden prototip atölyelerine doğru olan yolculuğunu bitirmiştir. Seri üretime doğru olan yolculuğunu ise kısmen tamamlanmıştır. Bu arada, uzun yıllardır özel kullanımlar için geliştirilmiş bataryalı araçlar kullanıcılarına; batarya ve güç elektroniği teknolojilerinin gelişimine paralel olarak, daha uzun menzil ve kullanım rahatlığı sağlamaktadır.

HEA, önümüzdeki on yıl içerisinde tüm araç sınıflarında ağırlıklı tercih edilecektir. Geleneksel araçlarda bulunan birçok donanımı da bünyesinde bulunduran HEA'lar, birçok kesimde tüketicilerin beğenisine sunulmaktadır. Bu arada, uzun yıllardır özel kullanımlar için geliştirilmiş bataryalı araçlar kullanıcılarına; batarya ve güç elektroniği teknolojilerinin gelişimine paralel olarak, daha uzun menzil ve kullanım rahatlığı sağlamaktadır. HEA'ların en önemli özellikleri, sabit şarj sistemlerinden bağımsız olmaları ve geleneksel araçlarla aynı menzile sahip olmalarıdır [5].

HEA'da elektrik motorunun yanında birde içten yanmalı makine bulunur. Bazı tasarımlarda İYM, bir elektrik generatörünü tahrik eder ve elektrik enerjisi araçta üretilir, tekerlekleri elektrik makinesi tahrik eder. Bazı tasarımlarda ise, elektrik motoru ve İYM, tekerlekleri ortaklaşa olarak tahrik eder. HEA'lar da güç, içten yanmalı motor ve elektrik motoru tarafından müştereken sağlanır. İki tahrik sistemini de beraber bulundurduğu için bu araçlar HEA olarak isimlendirilir. Bu grubun bir ileri aşaması şu anda Toyota Prius ve Honda Civic otolarında kullanılan Karışık Hibrit topolojisidir. Bu bölümde ayrıntılarıyla farklı araç topolojilerine değinilecektir.

HEA'ların kullanımı gelecekte artarak devam edecektir. Çünkü dünyamızı gelecek nesillere daha temiz ve yaşanabilir halde bırakabilmek için;

- Fosil kökenli yakıtların kullanımının azaltılması,
- Özellikle kentlerde hava kirleticilerinin azaltılması,
- Global ölçekte sera gazı oluşumunun bertaraf edilmesi ve son olarak da
- Ulaşım maliyetlerinin azaltılması gerekliliğidir.

HEA'ların yollarda çoğunluk haline gelmesi ile otomotiv sektörünü bekleyen büyük değişimler çeşitli otoriteler tarafından aşağıdaki şekilde belirtilmektedir [1,2,5]:

- HEA'lara ait bataryalar, elektrik motorları, güç elektroniği gibi parçalar üreten sanayilerin oluşması,
- Ana üretici firmaların üretim ve pazarlama teknikleri açısından değişime uğraması,
- Gerçekleşecek büyük değişim sırasında, otomotiv sektöründe önde gelen ülkelere, elektromekanik dalında yüksek kaliteli, düşük maliyetli ve yenilikçi ürünlere sahip ülkelerin rakip olması,
- Bakım tekniklerinin ve personelinin eğitiminde değişiklikler,
- Standartlar ve yönetmelikler,
- Kullanıcıların uyumu,
- Akıllı trafik sistemlerinin ortaya çıkışı,

şeklindedir.

HEA'ların seri üretimine ve pazara sunulmasına başta Japon şirketleri olmak üzere birçok firma tarafından başlanılmıştır. Birçok firma ve Ar-Ge kuruluşu her geçen gün yeni modeller ve ürünler geliştirerek araç performanslarını arttırmaktadır. Hibrit elektrikli araçların kullanımdaki artıları ve yakıt tüketimi açısından avantajlarına rağmen, yüksek fiyatları nedeniyle tüm tüketici grupları için satın alma cazibesi oluşturulamamaktadır. Bu nedenle birçok devlet tarafından çeşitli teşvikler oluşturularak satış rakamları yükseltilmektedir.

HEA'ların avantajları aşağıda verilmiştir:

- Frenleme enerjisi geri kazanılmakta ve depolama sistemi sayesinde yeniden kullanılabilir, kullanılabilmektedir,
- Ana enerji kaynağı olan İYM boyutu küçülmektedir,
- Ana enerji kaynağı sabit yüklerde çalışmakta, bu sayede optimizasyon sağlanarak termal verim en üst seviyeye çıkmaktadır,
- İYM'lar belli şartlarda ve duruşlarda depolama ekipmanının şarj durumuna bağlı olarak kapatılabilmektedir,
- Diğer tip enerji kaynaklarında devreye girme ve çıkma esnasında oluşacak enerji ihtiyacı veya fazlası enerji depolama sistemi tarafından seviyelendirilmektedir.

Araçlarda; yakıt pili teknolojisinin uygulanması, gelecekte birincil enerji kaynaklarının fosil yakıtlardan, alternatif yakıtlara doğru değişimi ile hızlanacaktır. Ancak mevcut altyapı ve alışkanlıklar çerçevesinde yakıt pilli araçlara geçiş 2010'lu yıllara değin düşük bir ivme ile seyredecektir. Üreticilerin beklentileri üç nokta üzerinde birleşmektedir [1]:

Yakıt:

- 2010'a kadar sıkıştırılmış hidrojen
- 2010 – 2020 Alternatif yakıtlar/Bor hidrürler
- 2020 ve sonrası depolanmış hidrojen

Yakıt Pili Tipi:

- 2020'ye kadar proton elektrolit membranlı yakıt pili (PEMYP)
- 2020 sonrası belki katı oksitli yakıt pili (KOYP)

Geleneksel araçlar ile elektrikli araç tipleri arasında, aynı şartlarda verim ve emisyonlar açısından farkları incelendiğinde özetle şu sonuçlara ulaşılmaktadır [2]:

- Benzinli geleneksel araç (100 km de 8.4 litre ortalama yakıt tüketimi):
 - ✓ Verim: %28,
 - ✓ Sera gazı ve çeşitli kitleciler yüksek, menzil yakıt deposunun kapasitesine oranla değişmektedir.
- Tümü elektrikli araç:
 - ✓ Verim: %32,
 - ✓ Sera gazları ve kirleticiler elektrik santralleri tarafından üretilmekte, menzil sınırlı/düşük ve şarj sistemlerine bağımlılığa sahiptir.
- Hibrit elektrikli araç:
 - ✓ Verim: % 41,
 - ✓ Geleneksel araca göre sera gazları ve kirleticiler %55 ve yakıt tüketimi %30 oranında daha düşük ve menzil aynıdır.
- Yakıt pilli araç:
 - ✓ Verim: %43 (On yıl içerisinde %48),
 - ✓ Geleneksel araca göre sera gazları ve kirleticiler %90 ve yakıt tüketimi %40 oranında daha düşük ve menzil aynıdır.

Fosil kökenli yakıtların azalması ve çevresel beklentilerin artması ile önümüzdeki 10 yıl otomobil kavramında ve sanayisinde yeni tanımlar ile birlikte yeni oyuncular da yerlerini alacaktır.

3.2. Hibrit Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi

3.2.1. Giriş

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerdeki ulaşım yoğunluğunun artması nedeniyle çevre kirliliği ortaya çıkmıştır. İYM'lardan çıkan emisyonlar (azot oksitler-NOx, karbon monoksit -CO, küçük partiküller, uçucu organik bileşikler vb.) bölgesel ve hatta global ölçülerde çevreye önemli zararlar vermektedir. Büyük şehirlerin

birçoğunda trafik emisyonlarından kaynaklanan azot oksit ve karbon monoksit oranları istenilen standartların üzerindedir. Almanya’da ve Amerika’da yapılmış olan araştırmalardan havadaki küçük partiküllerin insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilerinin olduğu görülmüştür [8,9]. İYM’ların her türü (dizel, benzinli, LPG’li vb.) yüksek miktarda partikül açığa çıkarmaktadır. Özellikle dizel motorların benzinli ya da LPG’li motorlara göre daha fazla partikül açığa çıkardığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple şehirlerdeki bu küçük partiküllerin oluşmasının en önemli sebebinin trafik olduğu düşünülmektedir. Katalitik dönüştürücülerin kullanılması ile zararlı gaz salımı azalmakta, ancak trafiğin artması nedeniyle zararlı gaz salım konsantrasyonlarının artmaya devam ettiği saptanmıştır [5].

Artan araç sayısına bağlı olarak, atmosferde kirletici emisyonların ve karbondioksit gazı miktarının hızla artması, dolayısıyla sera etkisinin oluşması ve iklim değişikliği sorunları alternatif yakıtların kullanılmasını gündeme getirmiştir. Dünyada her geçen yıl ulaşım yoğunluğunun ve buna paralel olarak açığa çıkan zararlı gaz salım miktarlarının artması, alternatif yakıtların kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Ancak mevcut altyapı ve sistemlerin sınırlıklarından dolayı fosil yakıtlardan alternatif yakıtlara geçilmesi beklenen hızda gelişmemektedir. Bu sınırlılıklar; üretim potansiyelleri, üretim teknikleri, dağıtım, pazarlama ve motor uyumudur. Örneğin çevre açısından zararlı gaz salımı oluşturmayan hidrojenin istenen saflıkta eldesi ve depolama sistemleri zor ve pahalı teknikler gerektirmektedir.

Tüm bu problemleri gidermek için uygun alternatif yakıtlar ve/veya daha verimli alternatif araçların geliştirilmesi gündeme gelmiştir. Böylece elektrikli ve hibrit elektrikli araçlara ilgi tekrar artmaya başlamıştır. Esasında otomobillerin tahriki için kullanılan elektrik enerjisi ve elektrikli araç teknolojisi yaklaşık 1800’lü yıllardan ve otomobilin icadından beri mevcuttur. Fakat 1900’lerin başlarında İYM’lar, ağırlık/güç oranının düşük olması ve yakıt için kullanılan petrolün enerji yoğunluğunun yüksek olması nedeniyle daha fazla ilgi görmekteydi.

Elektrikli tahrik birçok açıdan üstün olmasına rağmen bataryaların enerji yoğunluğunun az olması nedeniyle 1970’lere değin geri planda kalmıştır. Ancak 1970’teki petrol krizi petrol fiyatının ve yakıt bağımlılığın artmasıyla birlikte yeni

teknoloji arayışları ile doğal olarak elektrikli araçlar (EA) ve HEA yeniden gündeme gelmiştir. Bu amaçla 1997 yılında Japonya’da Toyota firmasının Prius modeli ile gerçek anlamda ilk kez modern HEA geliştirilerek pazara sunulmuştur. Bundan 2 yıl sonra Amerika’da Honda Insight üretilmiş ve bunu Honda Civic HEA’ı takip etmiştir (Tablo 3.1). EA’larla ilgili üç değişik tahrik teknolojisi vardır. Bunlar bataryalı EA (tümü-elektrikli), birden fazla tahrik gücüne sahip (örneğin elektrik motoru ve İYM) HEA’lar ve bataryalı ya da bataryasız yakıt pilli araçlardır.

Tablo 3.1: Üretilmekte ve geliştirilmekte olan hibrit elektrikli araçlar [2].

ÜRETİCİ	HONDA	TOYOTA	NISSAN
Model İsmi	Insight	Prius	Tino
Hibrid tipi	Paralel	Paralel	
İYM	Benzinli	Benzinli	Benzinli
Motor Hacmi (cc)	995	1500	1800
Azami Güç (kW) (İYM)	50	43	-----
Elektrikli Tahrik	SM fırçasız DC	SM fırçasız AC	SM senkron AC
Azami Güç (kW) (Elektrikli Tahrik)	10	30	17
Batarya Tipi	NiMH	NiMH	Li-iyon
Sistem Voltajı (V)	144	288	-----
Batarya Enerji Kapasitesi (kWh)	0,94	1,9	-----
Batarya şarj metodu	Regeneratif frenleme	Regeneratif frenleme ve İYM	-----
Hız (km/saat)	180	160	-----
Ort. Yakıt tüketimi (litre/100 km)	3,4	3,45	-----
Üretim Maliyeti (\$)	28 000 \$	35 000 \$	31 000 \$

3.2.2. Honda Insight

Honda Insight 2 kişilik bir hibrit elektrikli araç olup; araçta yüksek verimli benzinli motor, elektrik motoru ve 5 kademeli dişli kutusu kullanılmıştır. Bu aracın 0’dan 100 km/saat hıza 12 saniyede ulaştığı, azami hızının 180 km/saat ve AB kombine test çevrimine göre yakıt tüketiminin 28 km/litre olduğu ifade edilmektedir. İYM hafif malzemeden yapılmıştır ve dünyanın en hafif motoru olduğu ifade edilmektedir. Elektrik motoru olarak ince (60 mm) DC fırçasız motor kullanılmıştır. Elektrik

motoru doğrudan krank mili çıkışına bağlıdır ve gücünü 20 kg ağırlığında ve 0,94 kWh enerji yoğunluğuna sahip 144 V NiMH bataryalardan almaktadır. Bu batarya sadece regeneratif frenleme ile şarj olmaktadır. Aracın toplam gücü, ivmelenme ve yokuş çıkma esnasında İYM'nin gücüne eklenen elektrik motorunun da desteği ile 50 kW'dan 56 kW'a ve momenti ise 4800 d/d'da 91 Nm'den 113 Nm'ye çıkmaktadır.



Şekil 3.1: Honda Insight hibrit elektrikli araç [4].

3.2.3. Honda Civic

Honda Civic hibrit 2003 modelinde 4 silindirli 1339 ml benzinli İYM kullanılmıştır. İYM'nin gücü 5700 d/d da 85 BG'dir. İYM çok noktadan enjeksiyon sistemine sahip olup 8 sübaplıdır. Yardımcı güç ünitesi olarak sürekli mıknatıslı elektrik motoru kullanılmaktadır. Bu motorun gücü 4000 d/d'da 13.4 BG'dir. Enerji depolama sistemi olarak 144 hücreden oluşan NiMH bataryalar kullanılmaktadır.

3.2.4. Toyota Prius

5 kişilik Toyota Prius hibrit elektrikli aracında benzinli motor ve elektrik motoru arasındaki güç paylaşımı Honda Insight'e göre daha eşit şekilde olmaktadır (Şekil 3.2). Bu paylaşım hibrit transmisyon sistemi ile sağlanabilmektedir. Planet dişli sistemi kullanılarak güç paylaşımı sağlayan bir sistem vardır. İYM mili planet dişli taşıyıcısına bağlıdır. Generatör tarafından üretilen elektrik enerjisi ya elektrik motoruna veya bataryanın şarj olabilmesi için DC akımın üretilmesi için eviriciye yönlendirilir.



Şekil 3.2: Toyota prius hibrit elektrikli araç [4].

Prius aracında 1.9 kWh kapasitede yüksek performanslı NiMH bataryaları kullanılmıştır. Toyota özel hibrit sistemde kullanılması amacıyla 1.5 litre benzinli motor geliştirmiştir. Bu motorda yüksek sıkıştırma oranının sağlanabilmesi ve bu sayede yüksek yanma veriminin sağlanabilmesi amacıyla çok küçük bir yanma odası kullanılmıştır. Bu motor düşük devirli olduğu için (azami 4000 d/d) hareketli parçalar daha hafif yapılabilmektedir.

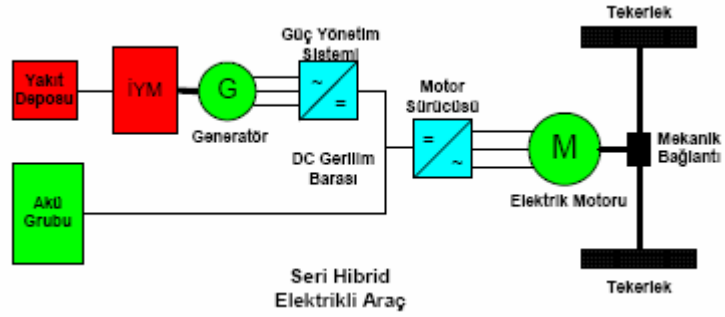
3.2.5. Prototip ve deneysel hibrit elektrikli araçlar

TÜBİTAK-MAM ELİT-1 Elektrikli Taşıt projesinde, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası üretimi olan DOBLO marka taşıtı hibrid elektrikli taşıta dönüştürülerek Türkiye'nin ilk hibrit elektrikli taşıt prototipi geliştirilmiştir (Şekil 3.3). Bu proje ile ilgili araç ve önemli oranda finansman desteği TOFAŞ A.Ş. tarafından sağlanmıştır.



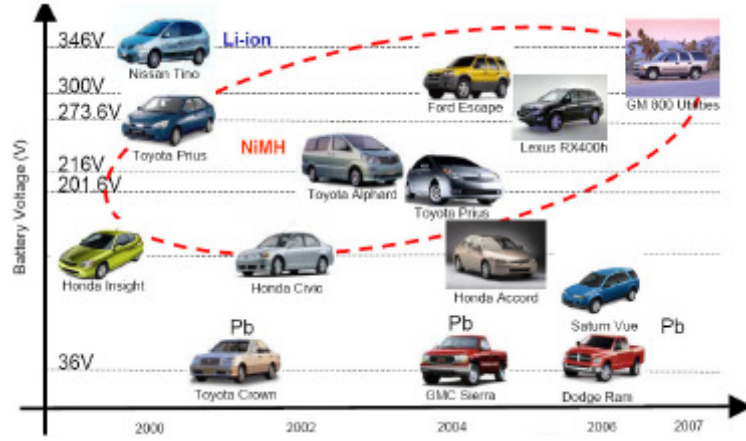
Şekil 3.3: Seri hibrit Tofaş-Fiat Doblo aracı (ELİT-1) [2].

ELİT-1 seri hibrit elektrikli taşıtta, bir elektrik motoru tekerleri tahrik etmektedir. (Şekil 3.4). Şehir içi sürüş modunda, elektrik motoru, sadece bataryalar tarafından sürülerek sessiz ve emisyonuz bir sürüş imkanı sağlanmaktadır. Aynı zamanda, günümüz araçlarında frenleme sırasında kaybolan enerji, ELİT-1 hibrit elektrikli taşıttaki elektrik motorunun ve kontrol sisteminin regeneratif frenleme yapması sayesinde geri kazanılarak akülerde depolanmaktadır. Bir başka önemli özelliği de şehir içindeki trafik sıkışıklıklarındaki bekleme anında, elektrik motorunun çalışmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu özellikler, taşıtta enerji tasarrufu sağlamakta ve taşıtın verimliliğini arttırmaktadır. Ayrıca prototipe hibrit özelliğini veren İYM ve generatör, prototipin şarj istasyonlarına bağımlılığını ortadan kaldırmakta ve prototipin sürekli kullanımına fırsat sunmaktadır.



Şekil 3.4: Tofaş-Fiat Doblo seri hibrit elektrikli araç kontrol ve güç şeması [2].

Teknik açıdan incelendiğinde ELİT-1 seri hibrit tahrik sistemi konfigürasyonunda bir elektrikli araçtır. İçten yanmalı benzinli bir motor ve generatör seti bataryalar ile birlikte elektrik motorunu çalıştırmaktadır. Tasarım hedeflerinde şehir içi kullanımı ön plana alınan ELİT-1, sessiz sürüş modunda kullanıldığında yalnızca bataryalar ile 120 km menzile sahiptir. Yapılan test sürüşlerinde hedeflenen tasarım hızı olan 96 km/saat azami hıza ulaşılmıştır.



Şekil 3.5: Hibrit elektrikli araçların yıllara göre dağılımı [1].

Şekil 3.5'te hibrit elektrikli araçların yıllara göre gelişimi gösterilmiştir. Geleceğin otomobillerinde hibrit ve hidrojen yakıt teknolojisinin egemen olacağı tahmin edilmektedir. Yakın geçmişte, araştırma konusu olan hibrit araçlar artık galerilerde alıcı beklemektedir. Şekil 3.5'te piyasadaki hibrit araçların yıllara göre gelişimi gösterilmiştir. Bu alanlarda da, esas görev otomotiv elektroniği teknolojisine düşmektedir.

Yakıt pilli EA'lara geçiş sürecinde başlangıçta sıkıştırılmış hidrojene kolay ulaşabilecek kullanıcılar hedeflenecektir. İlk yıllarda Proton Elektrolit Membranlı Yakıt Pilleri (Proton Exchange Membrane-PEMYP) tek uygun çözüm olarak görülmek ile birlikte 2020 sonrası Katı Oksit Yakıt Pillerinin (Solid Oxide-KOYP) de kullanıma alınabileceği öngörülmektedir. Ancak yakıt pilli araçların yaygınlaşması için mevcut dağıtım ve bakım sistemlerinde köklü değişiklikler gerekecektir [1,2,10].

3.3 Tahrik Sistemine göre Hibrit Elektrikli Araçların Sınıflandırılması

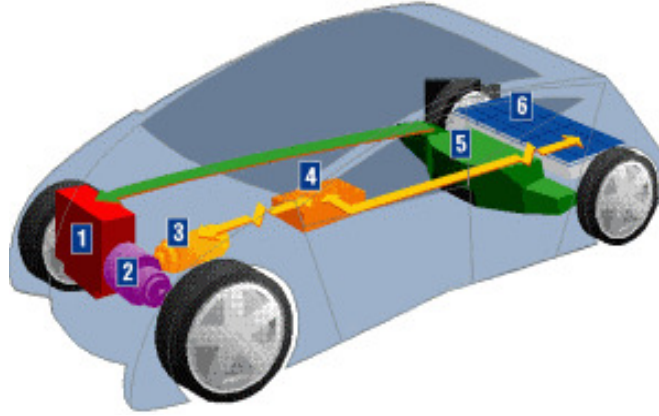
Daha önceden de bahsedildiği gibi HEA'lar birden fazla güç sistemine sahip araçlar olarak ifade edilebilmektedir. Uluslararası Elektroteknik Komisyonunun Teknik Komitesi (Elektrikli yol araçları) tarafından verilen tanıma göre HEA, enerjinin iki ya da daha fazla enerji deposundan sağlandığı ve bu enerji depolarından en az bir tanesinin elektrik enerjisi verdiği bir araç olarak ifade edilmiştir. Bu genel ifadeye bağlı olarak, batarya-yakıt pili, batarya-kapasitör ya da batarya - batarya gibi birçok

çeşit HEA versiyonları vardır. Bununla beraber yukarıdaki ifade geniş çevrelerce tam olarak kabul görmemiştir. Bir diğer tanımlamada ise HEA, daha çok hem İYM'un hem de elektrikli motorun kullanıldığı araç olarak kabul edilmektedir.

Bir HEA; enerji dönüşüm sistemi, enerji depolama sistemi, güç ünitesi ve taşıtı itici sistemden oluşmaktadır (Şekil 3.6).

HEA'ı oluşturan ekipmanlar;

- İçten yanmalı motor (İYM),
- Güç aktarma organı,
- Elektrik motoru,
- Güç elektroniği,
- Yakıt tankı,
- Bataryalar.



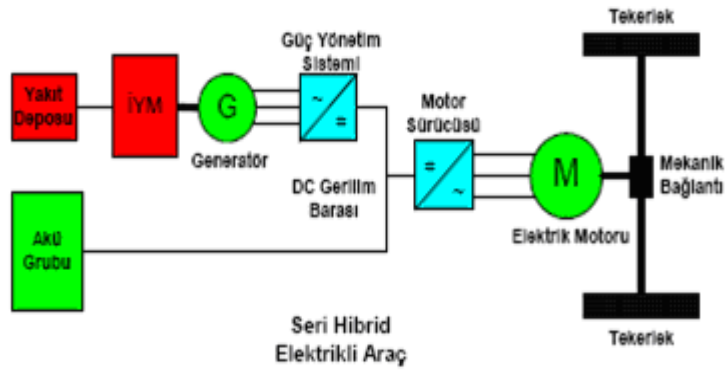
Şekil 3.6: Hibrid elektrikli aracı oluşturan parçalar [2].

Enerji depolama için başlıca seçenekler bataryalar, süperkapasitörler, ultrakapasitörler ve volanlardır. Bataryalar kullanılan en yaygın enerji depolama sistemi olmasına rağmen, diğer enerji depolama alanlarında da araştırmalar devam etmektedir. Hibrit güç ünitesi olarak dizel motorlar, gaz türbinleri ve yakıt pilleri kullanılmaktadır.

İtici kuvvet ise seri hibrit sisteminde olduğu gibi elektrik motorundan, ya da paralel hibrit de olduğu gibi elektrik motoruna ek olarak İYM'undan sağlanabilmektedir. Çünkü paralel hibrit sistemde İYM, itici gücü mekaniksel olarak tekerlere vermektedir.

3.3.1 Seri tahrik sistemi (Seri Hibrit)

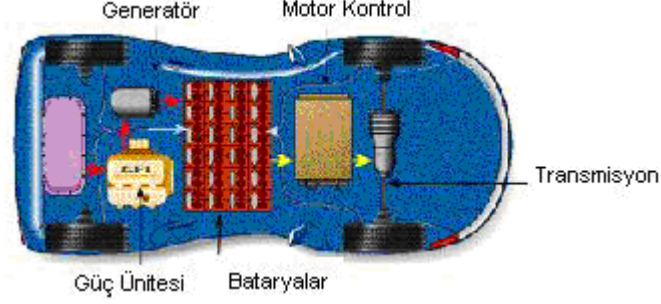
Bir seri HEA'da tekerleklere iletilen tahrik gücü elektrik motorundan sağlanmaktadır. Burada elektrik motoru, tahrik amacıyla elektriksel gücü mekanik güce dönüştürmektedir. Motor için gerekli elektriksel güç, elektrik enerjisini depolama aygıtlarından ya da hibrid güç ünitesinden sağlanmaktadır. Hibrid güç ünitesi İYM ve generatörden oluşmaktadır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7: Seri hibrit elektrikli araç tahrik sistemi blok şeması [2].

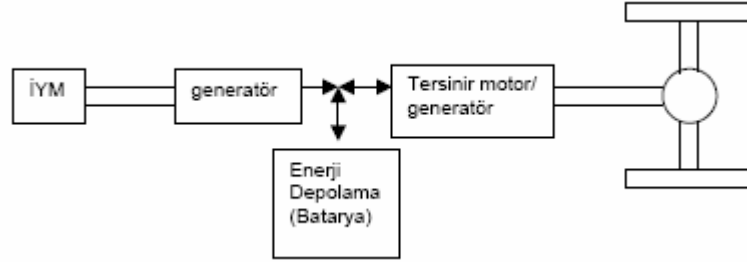
İYM + generatör grubu yakıtın kimyasal enerjisini önce mekanik sonrasında elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Üretilen elektrik gücü bataryadan gelen güçle beraber elektronik denetleyicide birleşir. Bu denetleyici daha sonra sürücünün komutlarını tekerlek hızı ve ana tahrik motorundan elde edilen moment ile karşılaştırır ve her enerji kaynağından ne kadar güç kullanacağını sürücünün isteğine göre belirler. Denetleyici aynı zamanda güç elektroniğini İYM-generatörü sürücü fren yapmak istediğinde regeneratif mod için açar kapatır ve gücü bataryaları şarj edecek şekilde yönlendirir. Böylelikle generatörde üretilmiş olan elektrik enerjisi aynı zamanda bataryaları şarj etmek için de kullanılmış olur. Araç çalışırken bataryalar hem İYM-generatör grubu tarafından hem de regeneratif frenleme ile şarj edilmektedir. Aynı

zamanda şarj cihazları ile özellikle geceleri yaklaşık 5-8 saat içinde şarj edilir. Şekil 3.8'te bataryalı seri hibrit sistem görülmektedir.



Şekil 3.8: Seri hibrit sistem [2].

Denetleyici, İYM+generatör grubunu kullanarak bataryaları belirlenen döngülere göre belli limitler oranında şarjlı tutar. Batarya şarj oranı bu limitin altına düşerse, İYM çalışmaya başlar. Benzer şekilde batarya şarjı üst limiti aşarsa, İYM durur. Bununla birlikte bazı seri araçlarda, motora sağlanan elektriksel güç hem bataryalardan hem de İYM-generatör grubundan sağlanmaktadır. Tekerleklerle sadece elektrik motorları bağlı olduğu için, İYM yakıt tüketimini azaltacak şekilde optimum performansta çalışmaktadır.



Şekil 3.9: Bataryalı seri hibrit sistem açık tek hat şeması [2].

Seri hibrit sistem, yakıt pilli araca en yakın elektrikli araç konfigürasyonudur. Araç bu sayede sadece bataryalarını kullanarak hareket edebilmektedir. Ayrıca elektrik motorunun kendisi tekerlekleri tahrik edebilmektedir. Burada kavrama ya da çok kademeli güç aktarım organına gerek yoktur (Şekil 3.9). Özellikle elektrik motorunun düşük devirlerde momenti yüksek olduğu için düşük devirlerde vites düşürülmesine gerek kalmamaktadır. Aynı zamanda İYM tekerleklerle bağlı olmadığı

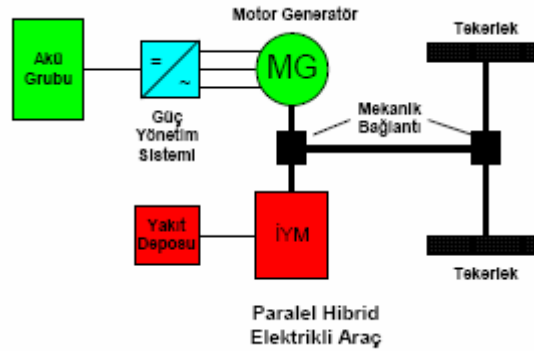
için optimum verimde çalışabilmektedir. Böylelikle geleneksel olmayan motor tipleri de kullanılabilir.

Seri tahrik sisteminin bir dezavantajı paralel tahrikte olmayan İYM'dan sonra elektrik enerjisi üretmek amacıyla kullanılan generatördür. Generatör taşıt ağırlığını artırmakta ve sisteme ek maliyet getirmektedir. Ayrıca toplam sistem verimi enerji dönüşüm basamaklarının daha fazla olmasından dolayı paralel sisteme göre düşüktür.

3.3.2 Paralel tahrik sistemi (Paralel Hibrit)

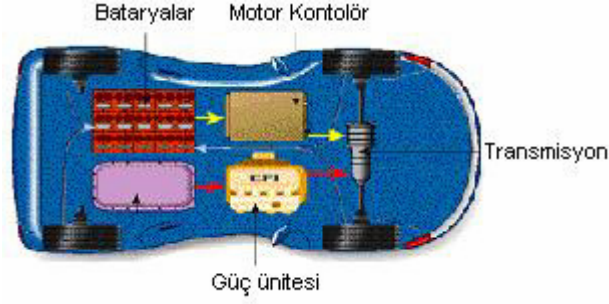
Paralel hibrit elektrikli araç, İYM ve elektrik motorunun aynı mil üzerinde tekerleklere doğrudan mekanik bağlantı ile tahrik verdiği sistemdir (Şekil 3.10). Paralel hibrit araçlara örnek olarak, Honda Insight ve Honda Civic verilebilir.

Paralel tahrik sistemleri mekanik olarak seri hibrit sistemlere göre daha karmaşıktır. Örneğin İYM'un tekerleklere tahrik verebilmesi için bir güç aktarma organına ihtiyaç vardır. Tüm bu elemanların birlikte düzgün bir şekilde çalışabilmesi için denetleyici seri hibrite göre ilave özelliklere ihtiyaç duymaktadır.



Şekil 3.10: Paralel hibrit elektrikli araç tahrik sistemi [2].

Paralel tahrikli taşıtlarda geleneksel taşıtlara göre daha küçük İYM kullanılır. Toplam güç ihtiyacı, çalışma verimine bağlı olarak denetleyici hangi kaynaktan ne kadar güç çekeceğini belirler. denetleyici; yakıt ekonomisi, performans, zararlı gaz salınım ve menzil için eniyileştirilmiştir. Şekil 3.11'de paralel hibrit elektrikli araca ait akış şeması görülmektedir.



Şekil 3.11: Paralel hibrid sistemin yerleşim dizaynı [2].

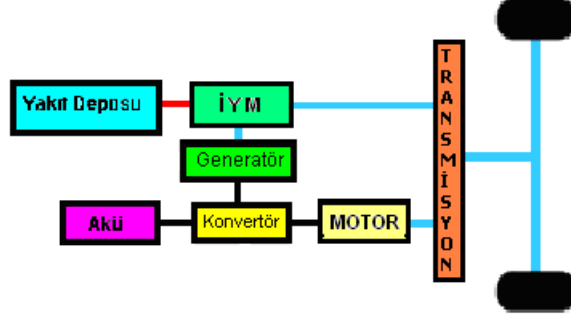
Seri hibrit sistemde olduğu gibi paralel hibrit sistemde de regeneratif frenleme ile bataryalar şarj edilebilmektedir. Paralel hibrit sistem, seri sisteme göre daha küçük kapasiteli bataryalar kullanıldığı için şarj çoğunlukla regeneratif frenleme sırasında yapılır. Buna ek olarak sürüş esnasında da elektrik motoru generatör gibi davranarak bataryaları şarj edebilmektedir. Daha küçük elektrik motoru ve bataryaların kullanılması paralel hibrit sistemin fiyatını seri hibrit sisteme göre daha düşük kılmaktadır. Burada içten yanmalı motor doğrudan tekerleklere bağlı olduğu için seri hibrit sisteme göre toplam enerji dönüşüm verimi daha yüksektir. Ayrıca hem İYM hem de elektrik motoru aynı anda güç sağladığı için taşıtın gücü daha fazladır.

3.3.3 Seri / Paralel tahrik sistemi (Seri/Paralel Hibrit)

Bu seri/paralel tasarım paralel sisteme benzemektedir. Burada İYM doğrudan tekerleklere bağlıdır. Tasarımın özelliği İYM'nin transmisyon ile bağlı olmayıp seri tahrik sisteminde olduğu gibi generatör ile bağlı olmasıdır (Şekil 3.12). Sonuçta İYM optimum verimde çalışabilmektedir. Düşük hızlarda araç seri hibrit sistemde olduğu gibi çalışmaktadır. Yüksek hızlarda ise İYM devreye girerek tekerleklere güç verir ve seri tahrikteki gereksiz enerji dönüşümleri ile kaybedilen enerji en düşük seviyeye indirilir.

Bu sistem hem seri hem de paralel tahrik sistemlerinin olumlu özelliklerini taşımaktadır. İçten yanmalı motor normal şartlarda en verimli noktasında çalışarak, generatör üzerinden aküyü ve elektrik motorunu beslemekte, ilave bir moment gerektiği zaman ise mil üzerinden elektrik motoruna destek olmaktadır. Bu anlamda, akünün elektrikselsel olarak üstlendiği fazlalık gücü karşılama görevine mekanik olarak ortak olmaktadır. Enerji geri kazanımlı frenleme yapıldığında elektrik makinesi

motor konumundan generatör konumuna geçirilmekte ve sisteme depo edilen mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülüp aküde depo edilmektedir. Şekil 3.12’de seri-paralel hibrit elektrikli araçtaki tahrik sistemi blok şema halinde gösterilmiştir.



Şekil 3.12: Seri-paralel hibrit elektrikli araç tahrik sistemi blok şeması [1].

Japonların yoğun ilgi gösterdikleri Toyota Prius’da bu sistem kullanılmıştır. Burada amaç hem paralel hem de seri sistemin avantajlarını kullanarak İYM’nin en verimli noktada çalışmasını sağlamaktır. Yani büyük güç gerektiğinde elektrik motoru ve içten yanmalı motor birlikte tekerlekleri döndürmekte, sessiz ve temiz çalışma gerektiğinde yalnızca elektrik motoru ile sürüş sağlanmakta, akü devamlı olarak içten yanmalı motor desteği ile üretilen elektrik enerjisiyle doldurulabilmektedir.

3.4 Hibrit Elektrikli Araçların Avantajları ve Dezavantajları

3.4.1 Hibrit elektrikli araçların avantajları

TEA’ların bazı dezavantajlarını gidermek amacıyla HEA’lar geliştirilmiştir. TEA’lara İYM eklenerek aracın menzilin ve gücünün artırılması için HEA’lar tasarlanmıştır. HEA’lar, geleneksel araca nazaran kirletici zararlı gaz salımı azaltmakta ve yakıt verimini arttırmaktadır. HEA’lar birden fazla güç kaynağına sahip araçlar olarak da adlandırılır. HEA’lar iki ya da daha fazla enerji dönüşüm teknolojilerini (İYM, yakıt pilleri, generatörler ya da elektrik motorları) bir veya daha fazla enerji depolama teknolojileri (batarya, süperkapasitörler ya da volan) ile birleştirmektedir.

HEA'ların geliştirilmesinin temel nedenlerinden biri de TEA'ların şarj problemi ve sınırlı menzile sahip oluşlarıdır. Çoğu HEA'lar enerji kaynağı olarak İYM (2 yada 4 zamanlı otto ya da dizel motorları) stirling motoru, gaz türbini ya da elektrokimyasal batarya kullanmaktadır. Güç üreten elemanlar elektrik enerjisini depolayan elemanlarla değişik şekillerde birleştirilmektedir. Bu şekilde birçok değişik hibrit elektrikli araç tasarımları geliştirilmektedir. HEA verimi ve zararlı gaz salımı özellikle alt sistemlerin kombinasyonuna ve bu alt sistemlerin tüm sisteme nasıl entegre olduğuna bağlıdır.

HEA'ların geleneksel araçlara göre bazı üstünlükleri vardır. Bunlar:

- Regeneratif frenleme yeteneği enerji kaybını en aza indirir ve taşıt durduğunda ya da yavaşladığında kullanılan enerjiyi geri kazandırarak bataryaları besler.
- İYM'lar maksimum yükü değil ortalama yükü karşılayacak şekilde boyutlandırıldığından motorun ağırlığı azalmaktadır.
- Yakıt verimi büyük ölçüde artmaktadır.
- Zararlı gaz salımı önemli oranda azalmaktadır.
- HEA'lar alternatif yakıtlarla da çalıştığı için fosil yakıtlara çok fazla bağımlı değildir.

HEA'ların yukarıdaki avantajlara ek olarak bazı ek avantajları daha vardır. Araç durduğunda İYM çalışmaz ve titreşim veya motor gürültüsü oluşmaz. HEA'ların boşta çalışma kayıpları yok denecek kadar düşüktür. Son 15 yıl içerisinde değişik tipte prototip olarak birçok HEA üretilmiştir. Bu araçlara ait bazı örnekler ileriki bölümlerde verilmiştir.

3.4.2 Hibrit elektrikli araçların dezavantajları

HEA'lar genel olarak seri ve paralel olmak üzere iki konfigürasyona ayrılırlar. Seri hibrit sistemde tekerleklerle tahrik gücünü sağlayan bir elektrik motoru vardır. İYM generatöre bağlıdır ve elektrik enerjisinin oluşturulmasını sağlayarak bataryalarda enerji depolanmasına katkıda bulunur. Bataryalarda depo edilen elektrik enerjisi ise

elektrik motoruna verilir ve tahrik tekerlerine gerekli olan güç iletilir. İYM ve tekerlekler arasında mekanik bir güç iletimi mevcut değildir.

Paralel hibrit sistemde ise itki için gerekli olan güç, birden fazla enerji kaynağından sağlanır. İYM transmisyon aracılığı ile tekerlere doğrudan güç iletir. Bunun yanında bataryalarda depo edilen elektrik enerjisi ise elektrik motoru yolu ile tekerlere iletilir.

3.4.2.1 Seri hibrit sistemin dezavantajları

- Bu sistemde İYM, generatör ve elektrik motoru olmak üzere üç tahrik ekipmanına ihtiyaç duyulur.
- Elektrik motoru gerekli olan azami gücü karşılayacak şekilde, özellikle yüksek eğimler için tasarlanır. Fakat araç çoğunlukla azami gücün altında çalışmaktadır.
- Tahrik ekipmanları, batarya kapasitesinin birinci seviyede dikkate alınarak menzil ve performans için azami gücü karşılayacak şekilde boyutlandırılır.
- Güç sistemi ağır ve maliyeti daha yüksektir.

3.4.2.2 Paralel hibrit sistemin dezavantajları

- Gerekli olan güç iki farklı kaynaktan sağlandığı için burada enerji yönetimi önem arz eder.
- İYM ve motordan gelen gücün tahrik tekerlerine düzgün olarak iletilebilmesi için karmaşık mekanik elemanlara ihtiyaç duyulur.
- Sessiz çalışma modu sağlamamaktadır.

3.5. Yakıt Pili Elektrikli Araçlar

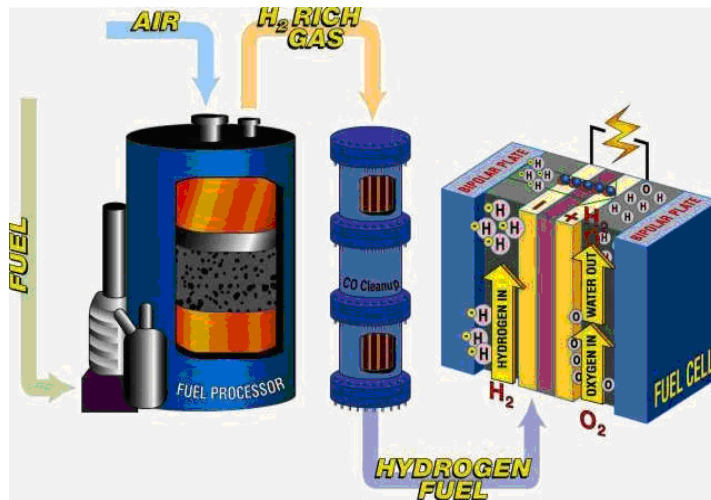
3.5.1 Yakıt pili

Yakıt pilleri yakıtın kimyasal enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Geleneksel teknolojilere göre daha yüksek verim ve önemli miktarda düşük emisyon üretirler. Ayrıca daha sessiz çalışırlar ve modüler bir yapıdadırlar. Son yıllarda çeşitli prototip uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Daha uzun

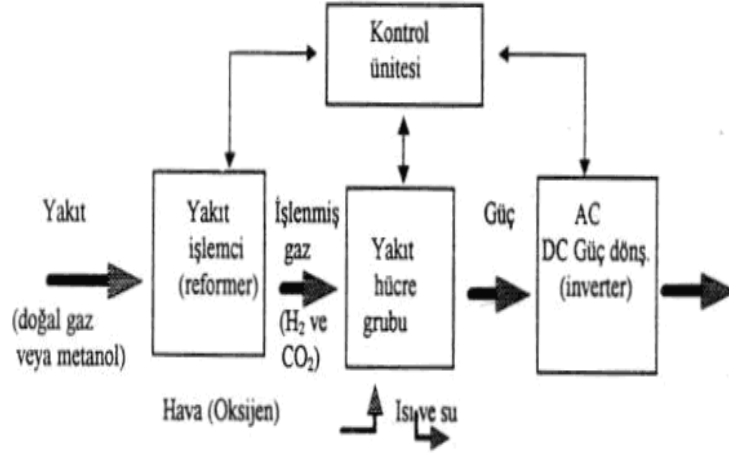
dönemlerde yakıt pillerinin özellikle araç uygulamalarında daha da yaygın olarak kullanılabilceği öngörülmektedir. Yakıt hücreleri, geleneksel güç üretim sistemlerine göre aşağıdaki üstünlüklere sahiptir.

- Çevresel kirlilik oranı düşüktür.
- Enerji üretim verimi oldukça yüksektir.
- Farklı yakıtlarla çalışabilir. (Doğal gaz, LPG, Metanol ve Nafta)
- Egzoz ısısı yeniden kazanılabilir.
- Modüler yapıdadır.
- Montaj süresi kısadır.
- Çok yüksek miktarda soğutma suyu (deniz suyu gibi) gerektirmez.
- Güvenilir bir sistemdir.
- İşletim karakteristiği uygulamada kolaylıklar sağlar.
- Geleceğe yönelik olarak gelişme potansiyeli oldukça yüksektir.
- Katı atık ve gürültü problemi yoktur.

Yakıt hücreleri elektrokimyasal seyir süresince elektrik üretir (Şekil 3.13-3.14). Yakıtta depolu bulunan enerji DC güce dönüştürülür. Bu içten yanmalı ve zararlı gaz salınımsız elektrik enerjisi çeşidi bulduktan sonra yakıt hücreleri çevre ile dosttur. Sonuçta, yakıt hücresinin çalışması için hidrojen gereklidir ve bu hidrojenin kaynağı fosil yakıtların bir türü olan doğal gaz, benzin, metanol, propan ve etanoldan elde edilmiş olabilir.



Şekil 3.13: Yakıt pili içyapısı ve elektrik enerjisi üretim prensibi [10].



Şekil 3.14: Bir yakıt pili çalışma prensibinin şematik gösterimi [11].

Bir yakıt pili bileşenleri ve karakteristikleri bataryaya benzese de bazı açılardan bataryadan farklıdır. Yakıt pili enerji dönüşüm cihazıdır ve bu enerji dönüştürme işlemi elektrotlara yakıt ve oksitleyici sağlandığı sürece devam edebilmektedir.

Bir yakıt pilli HEA; yakıt depolama sistemi, yakıt pili-kontrol ünitesi, güç işlemci ünitesi-kontrolü ve tahrik sisteminden (elektrik motorları, vb) oluşmaktadır. Yakıt depolama sisteminde depolanan hidrojen doğrudan veya fosil kökenli yakıtların, yakıt işleme sürecine tabi tutulması ile elde edilen hidrojen yakıt pilini besler. Bir yakıt pil biriminin çıkış gerilim değeri 0,7 Volt mertebesindedir. Bu nedenle birkaç yakıt pil birimi seri olarak bağlanarak çıkış gerilimi artırılır.

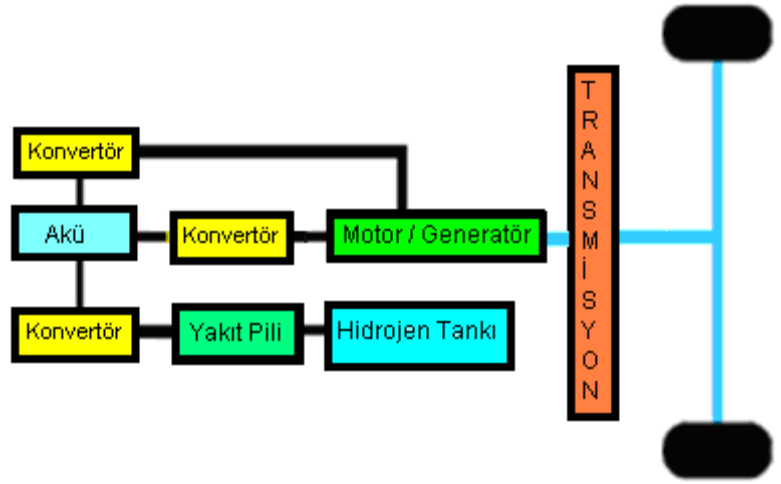
Yakıt pili ve elektrik motoru arasındaki güç elektroniği devresi, gerilim değerinin yükseltilmesi amacı ile için DC motorlarda DC/DC çeviricisine, AC motoru için DC/AC eviricisine, kontrol için mikroişlemci/dijital sinyal işlemcisin, aşırı yüklenme şartları ve regeneratif frenleme için batarya sistemine ihtiyaç duyulmaktadır.

Yakıt pilli elektrikli bir araçta batarya yerine süperkapasitörler de kullanılmaktadır. Fakat mevcut teknoloji daha süperkapasitörlerin bataryaların yerini alabilmesi için maliyet ve güvenilirlik açısından geliştirilmeye ihtiyaç duyulmaktadır [12].

Tümü EA için en büyük beklenti elektrik enerjisinin yakıt pilleri tarafından araç üzerinde üretilmesidir. Bilindiği gibi yakıt pillerinde, Hidrojen ve Oksijen

elektrokimyasal reaksiyona girer ve bunun sonucunda bir yandan elektrik enerjisi üretilirken ısı enerjisi de meydana gelir. Meydana gelen sıcaklığın 70–80 C derece civarında olması nedeniyle PEM teknolojisi uygulamaya en uygun teknoloji olarak belirmiştir. Kanada kökenli Ballard firması Daimler-Chyrisler tarafından satın alınmış ve bu teknoloji, yakıt pili ile beslenen çeşitli ebatlardaki deney araçlarına uygulanmıştır. Bugün için Avrupa, ABD ve Japonya’da yakıt pili ile çalışan birçok araç, deney amaçlı olarak kullanıma alınmıştır. Ancak henüz piyasada satılan bir ürün bulunmamaktadır.

Yakıt pili teknolojisinin en zayıf yanı hidrojenin üretilmesi, depolanması ve taşınmasıdır. Bu sorunların çözümünün çok kısa bir süre içinde gerçekleşmeyeceği anlaşılmaktadır. Bu durum otomotiv firmalarının hibrit elektrikli araç teknolojisine daha çok yönelmelerine yol açmıştır. Şekil 3.15’de yakıt pilli hibrit elektrikli aracın tahrik sistemini gösteren bir şekil yer almaktadır. Ayrıca Tablo3.1’de halen geliştirilmekte olan yakıt pillerinin temel özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.15: Yakıt pilli hibrit elektrikli araç tahrik sistemi [1].

Yakıt pilinin performansı gerilim ve akım çıkış karakteristikleri nedeniyle yük değişimlerine karşı duyarlıdır. Yakıt pilinin kontrol ünitesi, gerilim ve akım bilgilerini düzenleyerek istenilen güce göre yakıt piline girecek hidrojenin miktarını ayarlar.

Tablo 3.2: Halen geliştirilmekte olan yakıt pilleri ve teknik değerleri [1].

YAKIT PİLİ TEK. ÖZELLİKLER	PAFC	AFC	MCFC	SOFC	SPFC	DMFC
Çalışma sıcaklığı (°C)	150-210	60-100	600-700	900-1000	50-100	50-100
Güç Yoğunluğu (W/cm ²)	0,2-0,25	0,2-0,3	0,1-0,2	0,24-0,3	0,35-0,6	0,04-0,23
Öngürülen ömür (kilo saat)	40	10	40	40	40	10
Öngülen Maliyet (US\$/kW)	1000	200	1000	1500	200	200
PAFC : FOSFORİK ASİT YAKIT HÜCRESİ AFC : ALKALİN YAKIT HÜCRESİ MCFC : MOLTAN KARBONAT YAKIT HÜCRESİ SOFC : KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİ SPFC : KATI POLİMER YAKIT HÜCRESİ, veya PROTON DEĞİŞİMİ ZARI YAKIT HÜCRESİ DMFC : DİREK METANOL YAKIT HÜCRESİ						

Tablo 3.2’te geliştirilmekte olan yakıt pilleri ve teknik özellikleri ele alınmıştır. Bu tabloya bakarak en uygun ve istenen özelliklere sahip yakıt pilleri karşılaştırılmaktadır. PEMYP tipi yakıt pili uygulamalarında yakıt saf hidrojenidir. Bu durumda, hidrojen sıvı fazda basınçlandırılmış şekilde tankta veya metal hidrürlerle üzerine depo edilir. Hidrojeni depo etmenin en kolay ve en ucuz yolu sıkıştırılmış hidrojeni paslanmaz çelik veya alüminyum alaşımli tanklarda depo etmektir. Yeterli miktarda hidrojeni depolayabilmek için gerekli 400 atm veya üstüne sıkıştırma işlemi sırasında yüksek miktarda enerjiye gerek duyulmaktadır. Hidrojeni bu basınçlara yükseltmek için, depolanmış hidrojenin yaklaşık %20’si harcanmaktadır. Bu yöntemle gerekli olan basınç tankı araçta fazla yer tutmaktadır. Hidrojenin depolandığı yakıt tankının hacmi aynı enerjiyi içeren benzin tankının hacminden yaklaşık 4 katı kadar daha fazladır.

Hidrojenin depolanmasında kullanılan bir diğer yöntem ise hidrojenin metal hidrür yataklar içinde düşük sıcaklıklarda metalik bileşiklerle bağ yapmasıdır. Metal hidrür ile depolama tekniğinde, sıcaklık arttıkça hidrojen serbest kalmaktadır. Sıcaklık hidrojenin serbest kalma oranını belirlediği için patlama riski sınırlanmaktadır. Bununla birlikte taşıta istenilen menzili verebilecek hidrojenin depolanması için gerekli metal hidrür ağırlığı optimize edilmekten uzak görünmektedir.

Hidrojenin depolanmasında alternatif çözümlerden biriside, grafit nano-fiberin kullanımınıdır. Bu -fiberler ile ilgili bir çok araştırma devam etmek ile birlikte yüksek miktarda hidrojen depolama imkanı sağlayabileceği öngörülmektedir.

3.6 Yakıt Pili ve Yakıt Pili Araçların Avantajları ve Dezavantajları

3.6.1 Yakıt pilli araçların avantajları

EA'larda enerji kaynağı olarak sadece bataryaların kullanılması durumunda araç menzili depolanmış enerji miktarı ile sınırlıdır. Yakıt pillerinin kullanımı, EA'ları menzil açısından geleneksel araçlar ile rekabet edebilir duruma getirecektir. Yakıt pilli araçların menzili geleneksel araçlarda olduğu gibi, yakıt tankında depolanan yakıt miktarına bağlıdır. Güç/enerji üretim modülü olarak yakıt pilinin büyüklüğü araçta ihtiyaç duyulan güç kapasitesine bağlıdır ve aracın menzili ile ilişkili değildir.

Yakıtın elektrik enerjisine doğrudan dönüştürüldüğü yakıt pillerinde, teorik verim karnot verimi ile sınırlı değildir. Yakıt işlemedeki ısı kayıpları göz önüne alındığında, yakıt pillerinin verimlerinin %60–70 seviyesine ulaşmaktadır. Enerji üretiminde hiç bir döner parçanın kullanılmaması, tamamen sessiz bir çalışma sağlamaktadır. EA'larda yakıt pillerinin kullanılmasının sağlayacağı temel avantajlar aşağıda listelenmiştir:

- Normal ve kısmi yüklerde yüksek çalışma verimi,
- Doğrudan enerji dönüşümü,
- Düşük zararlı gaz değerleri (CO, SO₂, NO_x),
- Düşük bakım tutum maliyetleri,
- Düşük gürültü seviyesidir.

Yakıt pili teknolojisi sayesinde düşük zararlı gaz salımı araçların üretimi, çevre kirliliğine önemli bir çözüm sağlayacaktır. Dünyada olgunlaşmakta olan yakıt pili teknolojisi üzerine yapılan araştırmalar, hem askeri hem de sivil alanda yoğunluk kazanmıştır.

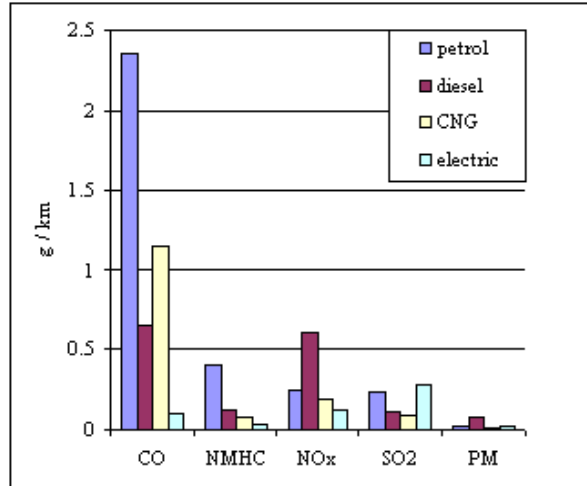
3.6.2 Yakıt pilli araçların dezavantajları

Özellikle sıfır zararlı gaz salımı ve yüksek verim gibi önemli avantajların yanında seri üretime geçme öncesinde bir takım teknik ve ekonomik sorunların aşılması gerekmektedir. Otomotiv ve enerji sektöründeki yatırımlar ile gelişimini sürdüren yakıt pilli teknolojisinde, maliyete etkin çözümler henüz üretilmemiş durumdadır. Genel olarak, üretim, işletme ve altyapı maliyetlerinin düşürülmesi (özellikle katalizörler), elektriksel stabilite, yakıt sistemleri, güvenilirlik, bakım, hidrojen depolama sistemi ve güvenlik teknolojileri geliştirilmeye açık alanlar olarak tanımlanmaktadır.

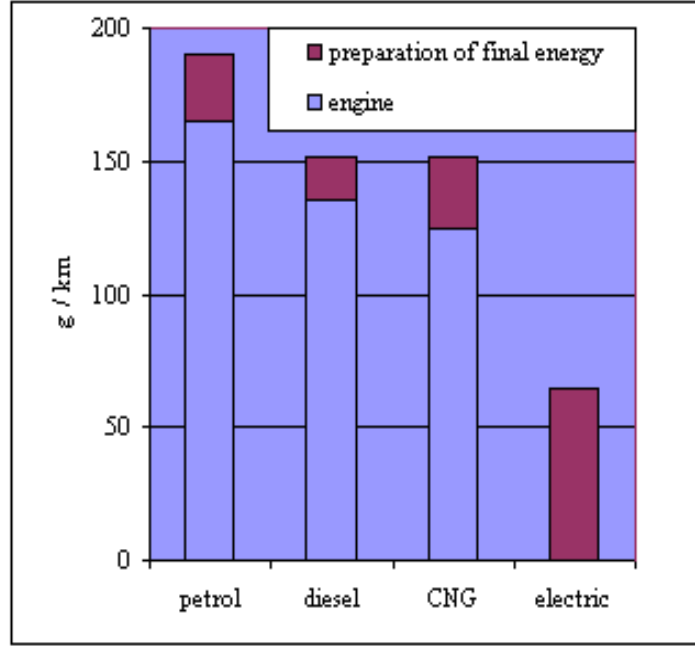
3.7 Güç Üretim Sistemi ve Zararlı Gaz Salımı

Büyük metropollerin en önemli sorunlarının başında gelen hava kirliliği üzerinde ulaşım sistemleri büyük rol oynamaktadır. İçten yanmalı motor kaynaklı zararlı gaz sal her geçen gün sıkılaştıran çevre standartlarının getirdiği önlemler ile azaltılmaya çalışılmaktadır. Konu hakkında önemli miktarlarda araştırma bütçeleri ayrılmaktadır. Amerikan Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından 1970 yılında yayınlanan Temiz Hava Akd'inde hava kirliliğine neden olan 189 hava kirletici listelenmiştir. Kirletici gazlar arasında karbon monoksit, azot oksitler, sülfür oksitler, uçucu organik ve kurşun temelli bileşikler yer almaktadır (Tablo 3.3 ve 3.4).

Tablo 3.3: 2002 yılında Avrupa'daki araçların zararlı gaz salım oranları (petrol, dizel, LPG, elektrik) [5].



Tablo 3.4: 2002 yılında Avrupa'daki şehirlerde enerji üretiminin ve motorların CO2 yayma oranları [5].



Fosil kökenli yakıtların, içten yanmalı motorlarda yanması neticesinde ortaya çıkan kirleticiler, atmosferde dağılmakta ve güneş ışığının etkisi ile reaksiyonlara girerek ozon ve sera gazlarının oluşumuna neden olmaktadır.

Küresel ısınmaya neden olan gazlar arasında başta karbondioksit olmak üzere metan ve kloroflorokarbon yer almaktadır. Diğer gazlara nazaran, kara taşımacılığı kaynaklı karbondioksit küresel ısınmada daha baskındır. EA'ların batarya ve yakıt pilli uygulamaları, sıfır zararlı gaz salımlı araçlar olarak anılmaktadır. Sıfır zararlı gaz salımlı araçlar çevre duyarlılığı açısından büyük ilgi uyandıran son derece önemli bir slogandır. Konu bu yönü ile değerlendirildiğinde EA'ların gelecekte kullanımı ve yaygınlaşması adına önemli bir gösterge olarak kabul edilebilir.

İçten yanmalı motorlardan yayılan zararlı gaz salımları kullanılan yakıtı göre değişmektedir. Dizel ve benzinli motorlardan yayılan zararlı gazlar göreceli olarak karşılaştırıldığında özellikle benzinli motorlara ait karbonmonoksit miktarının çok yüksek olduğu görülmektedir. Zararlı gaz salım değerleri; yanma performansı, motor çalışma şartları ve yakıt cinsine göre değişiklik göstermektedir.

4. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN ALT SİSTEMLER

4.1 Hibrit Elektrikli Araçlarda Enerji Kaynakları

4.1.1 Geleneksel enerji depolama sistemleri (Bataryalar)

HEA teknolojisinin geleceğinin büyük ölçüde akü teknolojisinin geleceğine bağlı olduğu görülmektedir. Elektrik enerjisinin depolanmasında bu güne kadar meydana gelen gelişmeler, elektrikli araçların tahrik gereksinmesini istenen biçimde karşılayacak şekilde oluşabilmiş değildir. Akü teknolojisinin elektrikli araçlara uygun olması için aşağıdaki ölçütlerin yüksek değerlerde olması gerekmektedir. Bunlar;

- Enerji yoğunluğu (Wh/kg),
- Güç yoğunluğu (W/kg),
- Doldurulma güç yoğunluğu (W/kg),
- Ömür veya toplam çevrim sayısı,
- Birim maliyet (Wh enerji başına ilk yapım maliyeti (USD/Wh)).

Enerji yoğunluğu kısaca depolanabilen enerjinin göstergesi olup, birim ağırlık için akülerin ne kadar süreyle enerji verebileceğini gösterir. Güç yoğunluğu ise akünün anlık enerji verebilme yeteneğinin bir göstergesidir. Akünün ömrü denildiğinde, dolma ve boşalma olarak tanımlanan bir tam devrimden en çok kaç defa tekrar edilebileceği anlaşılır. Akünün birim maliyeti depolanan enerjinin maliyeti demektir. Bunlara ek olarak, Wh/hacim, sıcaklık ve titreşim gibi ortam koşullarına dayanıklılık, güvenilirlik, patlama, yanma riski ve mukavemeti gibi büyüklükler de akü teknolojilerinin karşılaştırılmasında göz önüne alınan parametreler arasındadır. Tablo 4.1 de “Derin Döngü” durumunda elektrikli araçlarda kullanılan akülerin genel bir karşılaştırılması yapılmıştır.

Tablo 4.1: Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan akülerin genel bir karşılaştırılması [1].

Derin Döngü Uygulamasında Yüksek Enerji Tasarımı		Kurşun Asit	Nikel Metal Hibrid	Lityum İyon
Enerji Yoğunlu	(Wh/kg)	35	55	>80
Güç Yoğunluğu	(Wh/kg)	150	230	1000
Doldurabilme Yeteneği	(Wh/kg)	50	200	600
Ömür (Çevrim sayısı)	%80 salımda	125	3000	2500
	%5 salımda	50000	300000	140000
Maliyet Derecesi	USD/kWh	150	450	500

Tablo 4.2’de HEA’larda kullanılan ve gelişme altındaki bataryaların listesi verilmektedir. Azami enerji yoğunluğu; batarya ağırlığının her bir kilogramından, 3 saatlik deşarj döngüsü boyunca elde edilen enerji miktarını belirtmektedir. Bu gösterge batarya tamamen deşarj olmadan ne kadar kullanılabileceğini ifade etmektedir.

Tablo 4.2: Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan batarya özellikleri [2].

Batarya Tipi	Azami Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Azami Güç Yoğunluğu (W/kg)	En hızlı %80 tekrar Şarj Zamamı (dakika)	Çalışma Sıcaklığı	Çevrim sayısı %80 Deşarj durumunda	Maliyet (\$/kWh)
Kurşun-asit	35	150	Veri yok	Ortam	1000	60
Nikel-demir	50	100	Veri yok	Ortam	2000	150-200
Nikel-çinko	70	150	Veri yok	Ortam	300	150-200
Nikel-kadmiyum	50	200	15	Ortam	2000	300
Nikel-metal Hidrür	70	200	35	Ortam	2000+	250
Sodyum-sülfür	110	20	Veri yok	350 °C	1000	150
Sodyum-nikel klorür	100	150	Veri yok	300 °C	700+	250
Lityum-demir sülfat	150	300	Veri yok	450 °C	1000	200
Lityum-katı polimer	200	350	Veri yok	80-120 °C	1000	150
Lityum-iyon	120-150	120-150	<60	Ortam	1000+	150
Alüminyum-hava	220	30	Veri yok	Ortam	Veri yok	Veri yok
Çinko-hava	200	80-140	Veri yok	Ortam	200	100

Azami güç yoğunluğu depolanan enerjinin bataryadan ne kadar hızla çekilebileceğini göstermektedir. Tablo 4.2’de ayrıca her bataryanın çalışma sıcaklıkları verilmiştir. Çalışma sıcaklığı hangi bataryanın kullanılacağına karar verilmesi aşamasında çok önemli bir faktördür. Sodyum-sülfür, sodyum nikel klorür, lityum –demir sülfür gibi daha yüksek sıcaklıklarda çalışan bataryalar için özel sistemlerin kurulmasına ihtiyaç duyulur.

Batarya ömrü de bir diğer önemli faktördür. Bir batarya için hedef 1000 çevrim ömüre sahip olmasıdır. Bu yaklaşık olarak 3-4 yıllık bir kullanım ömrüne karşılık gelmektedir. Birçok batarya çeşidinde derin deşarj çevrimi bataryanın hem enerji hem de güç yoğunluğunu bir miktar azaltmaktadır. Bu nedenle bataryanın ömrü azalmaya yakın, performansı da önemli ölçüde azalmaktadır.

Günümüzde HEA’lar için maliyet açısından bir değerlendirme yapıldığında enerji depolama konusunda en uygun batarya teknolojisinin kurşun-asit olduğu ifade edilmektedir. Ancak kurşun-asit bataryaların aracın menzilini doğrudan etkileyen enerji yoğunluğu oldukça düşüktür. Gelişmekte olan batarya tiplerinden nikel kadmiyum, nikel metal hidrür, lityum iyon yüksek enerji yoğunluğu ile öne çıkmaktadır. Diğer yandan sodyum sülfür gibi yüksek sıcaklık bataryaları da elektrikli araç uygulamalarında kullanım alanı bulmaktadırlar [2].

4.1.1.1 Kurşun - asit batarya

Tüm İYM’larda ilk hareket bataryası olarak kullanılan düşük maliyet versiyonları negatif kurşun elektrotu, pozitif kurşun dioksit elektrotu ve de sülfürik asit elektrolit çözeltisinden oluşmaktadır. Genelde 6 tane hücre yaklaşık 12 voltu sağlamak için seri bir şekilde bağlanır.

Bu batarya 100 yıllık bir gelişme süreci geçirmesine rağmen 25–35 Wh/kg gibi düşük bir enerji yoğunluğuna sahiptir. Buna karşın güç yoğunluğu ise 150 W/kg gibi yüksek bir değerdir.

Kurşun asit bataryaları düşük çevre sıcaklıklarından şiddetli bir şekilde

etkilenmektedir. Özellikle 10°C'nin altındaki çalışma koşullarında hem enerji hem de güç yoğunluğunda belirgin ölçüde düşüş görülür. Bu batarya tipini kullanan elektrikli araçların daha düşük ortam sıcaklıklarına maruz kalması durumunda yardımcı bir batarya ısıtmasına ve izolasyonuna ihtiyaç duyulur.

Kurşun asit bataryalarının ömrü yaklaşık %80 derin deşarj koşulunda 1000 çevrimdir. Bu yaklaşık 3 yıla tekabül etmektedir.

4.1.1.2 Nikel-demir batarya

Nikel demir bataryaları 1901 yılında Thomas Edison tarafından elektrik araçlarının daha uzun yol kat edebilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Nikel demir bataryaları güvenilir, uzun ömürlü, fakat pahalı bir sekonder bataryadır. Bataryada nikel pozitif elektrot, demir negatif elektrot ve potasyum hidroksit ise sıvı elektrolittir.

Süre gelen geliştirme çalışmaları sayesinde enerji yoğunluğu 50 Wh/kg. mertebesine ulaşmıştır. Bu gelişme aktif malzeme oranının artırılması ve pasif batarya bileşenlerinin ağırlıklarının azaltılması ile sağlanmıştır.

Nikel demir bataryalar -20 °C'de dahi nispeten performanslarını korumaktadır. Azami güç yoğunluğu 100 W/kg dır ve bu değer ivmelenme için iyi bir değerdir. Bununla beraber güç yoğunluğu deşarjın derinliği ile önemli bir biçimde etkilenir. Bu bataryaların yaklaşık 6 yıla karşılık gelen, 2000 derin deşarj çevrimine kadar kullanım ömrü vardır.

4.1.1.3 Nikel-çinko batarya

Şarj edilebilen nikel çinko bataryalar ilk olarak 1899 yılında icat edilmiştir. Şarj esnasında çinko plakanın üzerinde dendritler kullanım ömrünü kısalttığından, bu bataryalar kullanımı yaygınlaşmamıştır. Son dönemde yüksek güç ve enerji yoğunluğu sayesinde HEA'larda kullanım imkanı doğmuştur. Enerji yoğunluğu 70 Wh/kg ve güç yoğunluğu 150 W/kg olmasına rağmen bu bataryalarda temel problem dendrit oluşumu nedeniyle kullanım ömrünün 300 çevrim kadar kısa olmasıdır.

Bataryanın geniş bir çalışma sıcaklığı toleransı vardır (-39 ile +81 °C arası). 30 günlük kullanım sonrası %60 şarj azalması görülmektedir. Son zamanlarda bataryaların ömürlerinin uzatılabilmesi için bazı çalışmalar yapılmasına karşın nikel-çinko bataryaların gelişimi konusundaki araştırmaların yoğunluğu gittikçe azalmaktadır.

4.1.1.4 Nikel kadmiyum batarya

Son yıllarda nikel-kadmiyum (NiCd) bataryalar özgül enerji, özgül güç, çevrim ömrü ve güvenilirlik bakımından en iyi dengeyi sağlayan bataryalar olarak kabul edilmektedir.

NiCd batarya sinterlenmiş pozitif nikel elektrot, negatif kadmiyum elektrot ve sulu elektrolit olarak potasyum hidroksitten oluşmuştur. NiCd bataryaları kurşun asit bataryalarına göre birim ağırlık başına bir miktar daha fazla enerji depolamaktadır. Bataryanın enerji yoğunluğu 50 Wh/kg ve güç yoğunluğu 200 W/kg'dır. Bu bataryalar yüksek şarj ve deşarj oranlarına sahip olduklarından EA'larda kullanılabilir. Derin deşarj çevrim sayısı 2000 civarındadır.

Kadmiyumun toksik ve çevreye zararlı olmasından dolayı, NiCd bataryaların geri kazanımı oldukça önemli ve bir o kadar karmaşıktır. Çevreye verdikleri zarardan dolayı kullanımları durdurulmuştur.

4.1.1.5 Nikel-metal hidrür batarya

Nikel-metal hidrür (NiMH) bataryalar, toksik özelliği olmayıp daha iyi performansa sahip olduklarından son zamanlarda birçok elektrikli araç uygulamalarında nikel kadmiyum bataryanın yerini almıştır. NiMH, nikel kadmiyum bataryalara göre daha fazla enerji depolamaktadır. Batarya, metal hidrür karışımı olan negatif elektrot, potasyum hidroksit elektroliti ve de aktif malzemesi nikel hidroksit olan pozitif elektrottan oluşmaktadır. Negatif elektrot olarak hidrojen içeren metal alaşım kullanılır.

Hidrojen içeren metal alaşımları iki kategoriye ayrılmaktadır:

- AB_5 alaşımları; nikel bileşikleri
- AB_2 alaşımları; titanyum vanadyum ve zirkonyum alaşımlı nikel bileşikleri.

NiMH bataryası 70 Wh/kg'dan fazla enerji yoğunluğuna ve 200 W/kg dan daha fazla güç yoğunluğuna sahiptir. Batarya %80 derin deşarj durumunda 600'ün üzerinde tam şarj/deşarj çevrimine sahiptir ve hızlı bir şekilde %80 tekrar şarj olması yaklaşık 35 dakikadır. NiMH bataryalar, kurşun asit bataryalardan yaklaşık 5 katı kadar daha pahalıdır.

4.1.1.6 Sodyum-sülfür batarya

Sodyum sülfür batarya, ilk olarak 1960'li yıllarda Ford Araştırma laboratuvarında elektrikli taşıtlar için gerekli enerji ve güç yoğunluğunu sağlamak için geliştirilmiştir. Birçok Avrupa, Amerika ve Japon şirketinde ticari prototiplerde kullanılmaktadır. Batarya negatif sodyum elektrotundan ve pozitif sülfür elektrotundan oluşmaktadır. Batarya yüksek sıcaklıklarda (350°C) çalışmaktadır ve her iki elektrot bileşenleri de sıvı durumdadır.

Sodyum sülfür bataryalar, 110 Wh/kg gibi yüksek enerji yoğunluğu ile 150 W/kg gibi yüksek güç yoğunluğu ve 1000 derin deşarj çevrimi sağlamaktadır. Bataryanın optimum çalışma sıcaklığı 350°C'dir ve 200°C'nin altında çalışılması durmaktadır. Bu sıcaklığın altında sodyum elektrolit donmaktadır. Sodyumun donması reaksiyonu yavaşlatarak, mekanik gerilmelere yol açması nedeniyle bataryaya zarar vermektedir.

4.1.1.7 Sodyum-nikel klorür batarya

Sodyum-nikel klorür bataryasında, nikel klorür pozitif elektrot sodyum ise negatif elektrottur. Sodyum tuzu elektroliti yerine sodyum klorür elektrotu yer almaktadır. Bu elektrodun donma noktası daha düşük olup 160°C civarındadır. Bu batarya türü, sodyum sülfür bataryasına göre bir miktar düşük sıcaklıklarda çalışmakta (300°C) olup, benzer enerji (100 Wh/kg) ve azami güç yoğunluğuna (150 W/kg) sahiptir.

4.1.1.8 Lityum-demir sülfat batarya

Hibrit elektrikli taşıtlarda potansiyel kullanım alanı bulunan üçüncü yüksek sıcaklık bataryasıdır. Lityum, özellikle üstün enerji depolama yeteneği sağlayan yüksek elektrot potansiyeline sahip olmasından dolayı bataryalarda kullanılması uygundur. Bataryanın demir sülfat pozitif elektrotu ve alüminyum lityum negatif elektrotu vardır. Çalışma sıcaklıkları 450 °C civarındadır. Azami enerji yoğunluğu 150 Wh/kg, güç yoğunluğu 300 W/kg ve derin deşarj çevrimi 1000 mertebesinde.

4.1.1.9 Lityum-katı polimer batarya

Lityum-katı polimer bataryada diğer yüksek sıcaklık bataryalarından farklı olarak, ergimiş tuz elektroliti yerine iletken polimerler kullanılmaktadır. 150 Wh/kg enerji ve 300 W/kg güç yoğunluğuna sahiptir. Bataryanın düşük güçte dış ortam sıcaklıklarında çalışması mümkün olmakla birlikte, optimum çalışma sıcaklığı 80°C ve 120°C aralığındadır.

4.1.1.10 Lityum-iyon batarya

Lityum-iyon hücrelerin yapısı lityum-katı polimer batarya hücrelerine benzemektedir. Ancak negatif lityum metal plaka yerine grafit veya kalay oksit gibi negatif “host” kullanılmasıdır. Deşarj esnasında lityum iyonları negatif “host”tan organik elektrot yardımıyla manganez, kobalt ya da nikel oksit pozitif “host”a geçer. Şarj esnasında da tam tersi proses gerçekleşir. Lityum iyonları katot ve anot arasında sarkaç gibi hareket eder. Lityum-iyon bataryalar yaklaşık 120 Wh/kg enerji yoğunluğuna ve 1000 çevrimlik derin deşarj çevrimine sahiptirler. Bu bataryalar, %80 şarj durumuna 1 saatten daha kısa sürede tekrar şarj edilebilmektedir.

Bu bataryayı, elektrikli araç uygulamalarında kullanılabilecek maliyet ve özelliklere getirebilmek için Japonya (Sony ve Panasonic), Avrupa (SAFT ve Varta) ve ABD’de (Duracell) çeşitli çalışmalar sürdürülmektedir. Sony, 3500 derin deşarj çevrimli 35 kWh kapasite ve 120 Wh/kg enerji yoğunluğuna sahip bir lityum-iyon batarya yaptığını bildirmiştir.

Lityum-katı polimer bataryalar ve lityum-iyon bataryalar yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle, elektrikli araç uygulamaları için en uygun potansiyele sahip bataryalar olarak değerlendirilmektedir. Gelecek 15–20 yıl içinde lityum-iyon bataryanın henüz yüksek olan maliyetlerinin düşerek HEA’larda kullanılacak ekonomik seviyeye inebileceği öngörülmektedir.

4.1.1.11 Alüminyum -hava ve çinko -hava bataryalar

HEA’larda kullanılan bir diğer batarya türü metal-hava bataryalarıdır. Çinko ve alüminyum, bu türden uygulamalarda en fazla kullanılan metal elektrotlardır. Tüm metal hava bataryalarda ince gaz geçirgen katot ve potasyum hidroksit gibi alkali su bazlı elektrolit kullanılır.

Alüminyum-hava bataryasının azami enerji yoğunluğu 220 Wh/kg, çinko-hava bataryasının ise 200 Wh/kg olarak belirtilmektedir. Ancak hava ve elektrolit arasındaki değiş-tokuş hızı güç yoğunluğunu belirler ve bu hız oldukça düşüktür.

HEA teknolojisinin geleceğinin büyük ölçüde batarya teknolojisinin geleceğine bağlı olduğu görülmektedir. Hibrid taşıtlarda batarya kullanımından başka alternatifler de olmasına rağmen (volanlar, süperkapasitörler, ultrakapasitörler) tercih daha çok bataryalarının üzerinde yoğunlaşıyor. Genel olarak HEA’larda kullanılacak bataryaların belirli güç (W/kg), belirli enerji (Wh/kg) seviyelerinin yüksek, uzun ömürlü ve düşük maliyetli olması gereklidir. Ancak bu özelliklerin tümünü bir arada barındıran mükemmel batarya bulunmamaktadır. HEA’ta kullanılacak bataryalar, araçta kullanılan enerji yönetim sistemi ve araç konfigürasyonuna göre seçilmelidir.

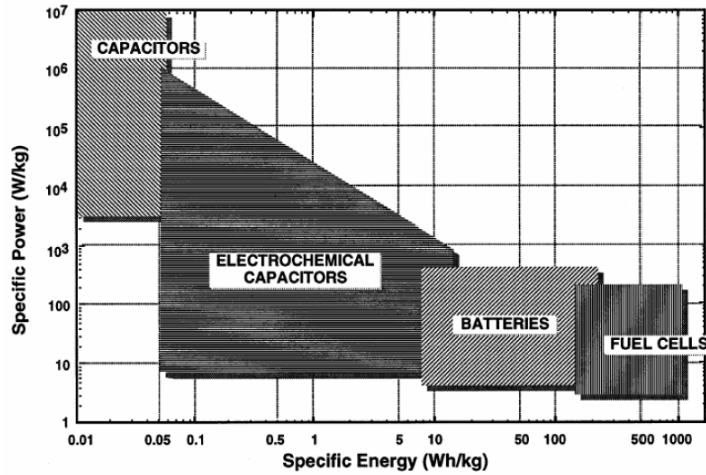
HEA’larda batarya, şarj seviyesinin %50’lerin altına düşmemesi prensibine göre tasarlanmış, derin deşarja dayanabilecek bataryalar seçilir. Sessiz sürüş modu için de derin deşarj kabiliyetine sahip bataryalar kullanılmalıdır. Ancak kullanım süresince şarj seviyesi belli aralıklarda değişecek şekilde tasarlanmış hibrit sistemlerde kullanılacak bataryaların belirli gücünün yüksek olması gereklidir.

Bataryaların taşıtlarda kullanımında bir takım problemler çıkmıştır. Mesela sodyum-kükürt bataryalarda ergimiş sodyum ve kükürt elektronların su ile teması tehlikeli

olduğundan bu bataryalarda sızdırmazlık çok önemlidir. Bataryalarda ayrıca kullanılmadıkları zaman elektrotların katılma sorunu da vardır. Çinko–Klorür ve Çinko–Bromür bataryaların ağır olma, sızdırmazlığı ve kullanım dışı boşalma gibi problemleri vardır. Taşıt performansını etkileyen faktörlerden biride batarya kasalarıdır. Bu kısımda meydana gelen en önemli nokta batarya kasasının sıcaklığının uygun bir sabit seviyede tutulmasıdır. Bataryanın şarj ve deşarj sürelerini etkileyen faktörler ise; ortam sıcaklığı, şehir-içi şehir-dışı kullanım ve şarj şekli bulunmaktadır.

4.1.2 Süperkapasitörler ve ultrakapasitörler

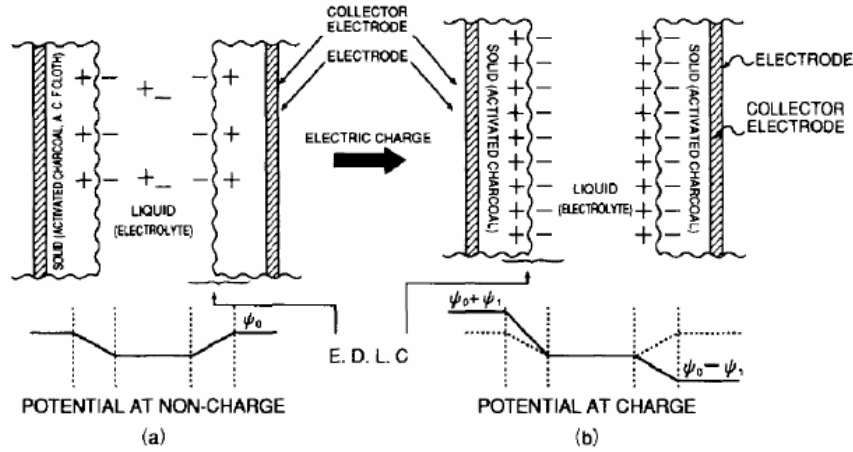
Süperkapasitörler (supercapacitor) ticari adını Japon üretici firma olan Nippon Electric Company (NEC) firmasından almıştır. Ultrakapasitörler ise Amerikan şirketi Pinnacle Research Institute (PRI) tarafından üretilmektedirler. Teknik terim olarak her ikisi de elektrokimyasal çift tabakalı kapasitör (electrochemical double-layer capacitor, EDLC) olarak adlandırılmaktadırlar. Süperkapasitörler ve ultrakapasitörler enerji depolama elemanı olarak UPS'ler de elektrikli taşıtlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Şekil 4.1'te enerji depolayan elemanların belirli enerji ve belirli güç durumlarındaki durumları gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Enerji depo eden (kapasitörler, süper ve ultrakapasitörler, bataryalar, yakıt pilleri) elemanların özel durumdaki ihtiyaçlarına göre birbirleri ile karşılaştırılması [10].

EDLC sistemlerin elektrik yükü ile yüklenmesi geleneksel kapasitörlere tarzına benzerdir. Fakat farklı olarak bu sistemlerde yükler iki iletken üzerinde birikmezler.

Onun yerine yükler, iletken ve elektrolitik çözelti arasındaki ara yüzeylerde birikirler. Birkaç santimin yüz milyonda biri kadar sırayla oluşan her bir ayrı katmanda birikmiş yüklerden dolayı çift elektrik katmanları oluşmaktadır (Şekil4.2).



Şekil 4.2: EDLC sistemlerinin elektrik yükü ile nasıl yüklendiklerini gösteren şema [10].

Kapasitörler enerjiyi pozitif ve negatif elektrostatik yüklerin ayrışmasıyla depo eden cihazlardır. Kapasitör iki tane plaka olarak adlandırılan iletkenle, bunları ayıran ve dielektrik olarak adlandırılan yalıtkandan oluşmaktadır. Geleneksel kapasitörlerin güç yoğunlukları çok yüksektir ($\sim 10^{12} \text{ W/m}^3$), fakat enerji yoğunlukları çok düşüktür ($\sim 50 \text{ Wh/m}^3$). Geleneksel kapasitörler genellikle elektrolitik kapasitörler olarak adlandırılırlar. Depolanan yük miktarı yani enerji miktarı plakaların alanına ve aralarındaki mesafeye bağlıdır. Yüksek kapasite için alan büyük ve plakaların arasındaki boşluk az olmalıdır. Süperkapasitörler geleneksel kapasitörlerin geliştirilmiş halidir. Süperkapasitörlerin güç ve enerji yoğunlukları sırayla yaklaşık olarak 10^6 W/m^3 ve 10^4 Wh/m^3 mertebesindedir. Enerji yoğunlukları bataryalara göre daha azdır. Ancak deşarj süreleri hızlı ve çevrim ömrü daha fazladır. Bir süperkapasitörde plakaların arasındaki boşluk katı polimerden oluşan elektrolitle doludur. Burada plakalar bataryada olduğu gibi elektrottur. Ancak kimyasal reaksiyonlar gerçekleşmez, sadece elektrot yüzeylerinde iyonlaşma olur. Elektrotlar çok yüksek yüzey alanına sahip delikli malzemeden yapılmıştır ($>2000 \text{ m}^2/\text{g}$). Süperkapasitörlerde elektrostatik yükler iyonlar şeklinde elektrolitte depolanmaktadır. Devam eden araştırmalar 4000 W/kg ve 15 Wh/kg civarında kapasiteye sahip kapasitörlerin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Süperkapasitörlerin primer enerji kaynağı olarak HEA'larda kullanılması için enerji yoğunluklarının

artırılması gereklidir. Tablo 4.3'te kurşun asit batarya, volan ve süperkapasitörün mukayesesi gösterilmiştir.

Tablo 4.3: Kurşun-asit batarya, volan ve süperkapasitörlerin birbirlerine göre teknik özelliklerinin karşılaştırılması [2].

Enerji Kaynakları Teknik Özellikler	Kurşun-asit	Volan	Süperkapasitör
	Özgül enerji (Wh/kg) (kJ/kg)	50 180	5-15 18-55
Özgül Güç (W/kg)	150	500	300-500
Depolama verimi (%)	77	93	80-90
Normal şarj zamanı (saat)	8	Çok kısa	Çok kısa
Çevrim ömrü	600-1200	>1 000 000	>100 000

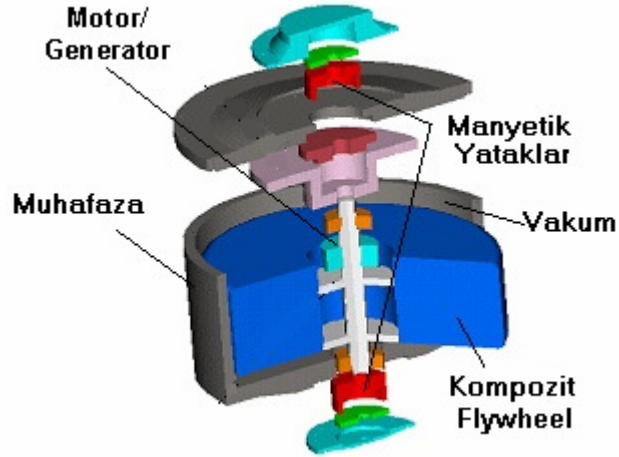
Süperkapasitörler ivmelenme ve yokuş çıkma gibi ani güç gereksinmelerinde bataryalara ya da yakıt piline yardımcı enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır.

4.1.3 Volanlar

Volan (flywheel) veya diğer adıyla magneto-dinamik enerji depolama (MDS) sistemi, bir kinetik enerji depolama ünitesidir. Volanlar, dönen bir ağırlık sayesinde kinetik enerjiyi depo etmektedir. Hali hazırda Volanlar, İYM'lu araçlarda enerjinin depolanabilmesi için kullanılmaktadır. İYM'lu araçlarda kullanılan mevcut volanlarda depolanan enerji miktarı oldukça düşüktür. Volanlar özellikle HEA'larda İYM ile birlikte yardımcı güç ünitesi olarak kullanılır. Alternatif olarak volanlar, EA'larda bataryaların yerine veya bataryalarla birlikte de kullanılabilir. Mevcut volanların, karmaşık, büyük ve ağır olmalarından dolayı özgül enerji yoğunlukları düşüktür. Ancak çevrim ömrü, güç yoğunluğu, enerji depolama verimi oldukça yüksektir.

Hem ortalama güç alma hem de etkili frenleme elektromekanik bataryalarla ve volanlı enerji depolama sistemleri (FESS) ile karşılaştırıldığında FESS kullanmak önemli kazanç sağlar. Kimyasal bataryalar yüksek enerji yoğunluğuna sahip olabilirler fakat bir FESS'e göre daha düşüktürler. Çünkü batarya sistemleri için zaruri değiş-tokuşlar FESS için gerekli değildir.

Volanlar enerji dönüşümünü ve enerji depolama fonksiyonunu sağlamak için iki farklı araç olan volan ve motor-jeneratör kullanırlar (Şekil 4.3). Böylece her iki benzer parametreler özel uygulamalar için en iyi şekilde kullanılırlar. Volanlarda kullanılan malzeme hafif yoğunluklu ve yüksek mukavemetli olmalıdır. Bu nedenle modern volanlar enerji yoğunluğunun artması için karbon fiber gibi kompozit malzemelerden üretilmektedir.



Şekil 4.3: HEA kullanılan enerji depolama elemanlarından volanın yapısı [2].

Volanlar az bakım gerektirir ve fiyat yönünden bataryalardan daha avantajlıdır. Diğer teknolojilerden fazla olarak birçok avantaj sağlar. Bir sıra kurşun asit bataryasından daha az kütleye sahiptir. Volan hasara uğramaksızın yüzlerce şarj deşarj devrine katlanabilir. Etkin frenleme, boyunca volan frenlemede sürekli kaybolan enerjiyi tekrar kazanabilir. Tablo 4.4'te volan enerji depolama sisteminin hibrit elektrikli araçlarda yoğun olarak kullanılan kurşun-asit bataryaya göre karşılaştırılması yapılmıştır.

Tablo 4.4: Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan volan enerji depolama sisteminin kurşun-asit bataryaya göre karşılaştırılması [2].

Özellikler	Kurşun-asit bataryaya göre oran
Enerji yoğunluğu	0.025
Özgül güç	0.25
Çıkış güç yoğunluğu	6
Özgül çıkış gücü	7
Çevrim ömrü	1000
Tekrar şarj oranı	240

Güç talebi az olduğu zaman örneğin sabit hızda düz yolda gidildiğinde motor volanı şarj edebilir. Bir tepeye tırmanma gibi yüksek güç gerektiren durumlarda sistem volandan enerjiyi geri alır. Yokuştan aşağı inerken ise elektrik motoru jeneratöre dönüşür ve volanın enerjisini besler. Volanların enerji yoğunluğu özellikle dönme hızına bağlıdır. Bunun yanında yüksek dönme hızı özel yataklar ve yüksek mukavemetli malzemeler gerektirdiğinden maliyetleri artırmaktadır.

Volanlarda depolanan enerji U:

$$U = \frac{1}{2} Jw^2 \quad (4.1)$$

Burada J atalet momenti, w ise açısal hızdır.

Depolanan enerji atalet momenti ile doğru, açısal hızın ise karesiyle doğru orantılı olarak artar.

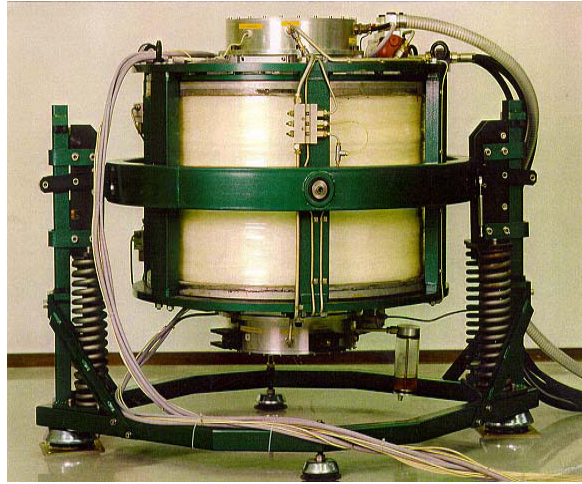
Birim kütle başına depolana enerji;

$$\frac{U}{m} = k \frac{\sigma}{\rho} \quad (4.2)$$

Burada k, geometriye bağlı bir sabit sayı, σ gerilme direnci, ρ ise malzeme yoğunluğudur.

Volanların enerji kaynağı olarak bataryalara göre çeşitli avantajları bulunmaktadır. Volan sistemlerinin en önemli avantajları yüksek çevrim ömrü, yüksek güç yoğunluğu, iyi depolama verimi ve tekrar şarj zamanının kısa olmasıdır. Teorik olarak volanların özgül gücü 5-10 kW/kg kadardır. Bir volanın enerji depolama verimi %90'nın üzerindedir. Volanlar saniyeler mertebesinde tam şarja ulaşırlar. Volanlar toksik emisyonlar ve atık malzemeler açığa çıkmaz, çevreye karşı daha duyarlıdır.

Volanların avantajları yanında bazı dezavantajları da vardır. Volan enerji depolama sisteminin uygulanmasındaki en büyük zorluk sistemin çalışması için gerekli ekstra donanıma ihtiyaç duyulmasıdır. Ekstra donanımlar araca ek ağırlık getirmektedir. Özellikle Almanya'da Magnet Motor ve Hollanda'da CCM HEA'larda kullanılmak üzere volan enerji depolama sistemini geliştirmiştir (Şekil 4.4). Özellikle Magnet-Motor firmasının ürettiği volanlar 1988'den beri Avrupa'nın çeşitli başkentlerinde dizel elektrikli trolleybüs vb. araçlarda güvenle kullanılmaktadır.

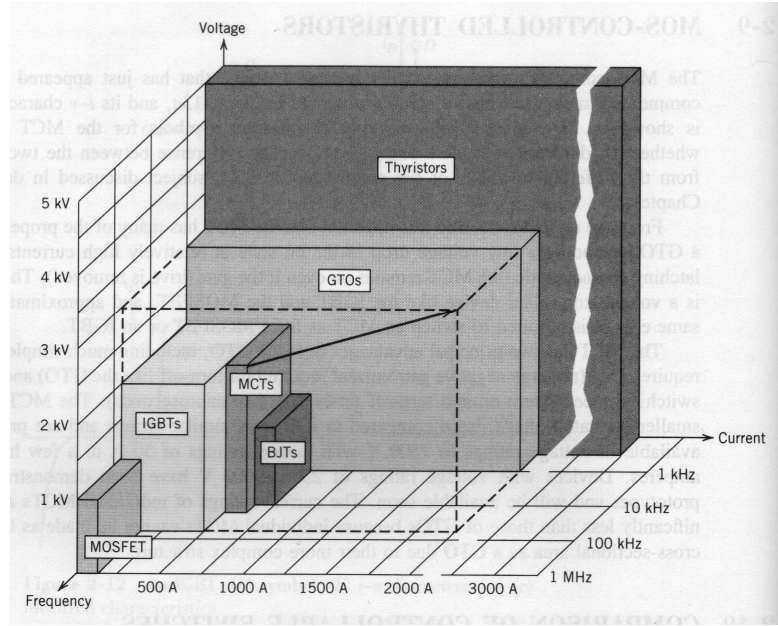


Şekil 4.4: CCM firmasının Emafer adını verdiği volan sistemi [2].

CCM volanları kompozit malzemelerden üretilmiştir. Volan vakum altındaki koruma haznesi içerisinde 15000 d/d ile dönmektedir. Enerji depolama verimi yaklaşık %93'dür. Motor volan ile birlikte dönmektedir. CCM tarafından geliştirilen volanlar test amaçlı olarak trolleybüslerde kullanılmıştır. Şehir-içi sürüş şartlarına uygun tasarlanmış standart dizel otobüsüne göre volanın enerji depolama verimi %93'dür ve %35 yakıtın geri kazanımı sağlanmıştır.

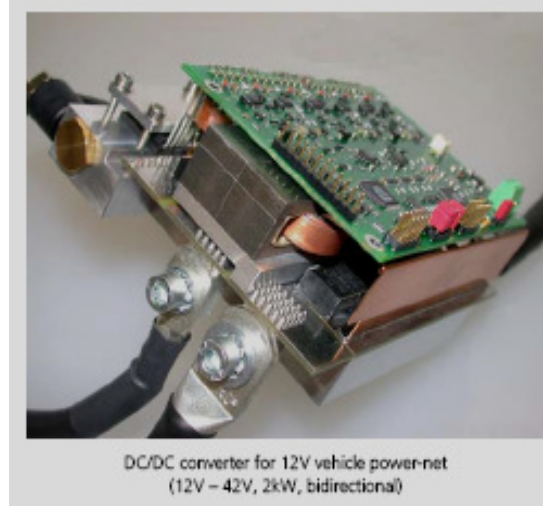
4.2 Hibrit Elektrikli Araçlarda Güç Kontrol Sistemleri

Elektrikli araç teknolojileri içerisinde güç elektroniği devreleri önemli bir yer tutmaktadır. MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor), IGBT (Insulated gate bipolar transistor), IGCT (Insulated gate controlled thyristor) ve MCT (mos controlled thyristor) gibi yarı iletken anahtarların geliştirilmesi ile elektrik sistemlerinin kontrolünde önemli gelişmeler sağlanmıştır (Şekil 4.5).

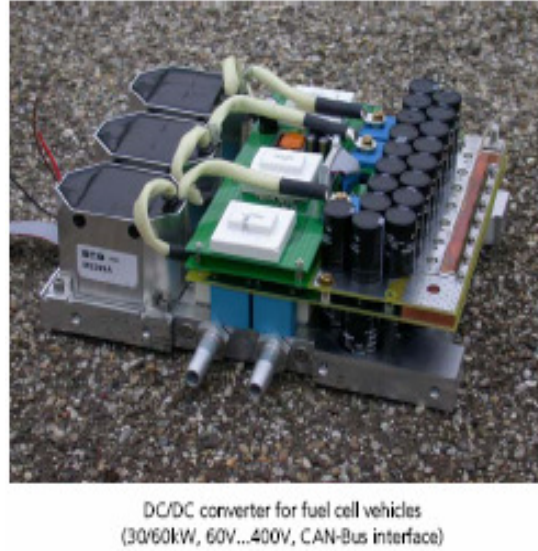


Şekil 4.5: Güç elektroniğinde kontrol amaçlı kullanılan yarı iletken güç elemanlarının akım, gerilim ve anahtarlama frekanslarına göre karşılaştırılması [11].

Tahrik sisteminin kontrolü, üretilen AC gerilimin DC'ye çevrilmesi, yakıt pili çıkış geriliminin düzenlenmesi, akü şarjının uygun yöntemlerle sağlanması vb., klasik güç elektroniği devrelerinin çeşitli kontrol yöntemleriyle kontrol edilmesiyle sağlanmaktadır (Şekil 4.6-4.7).



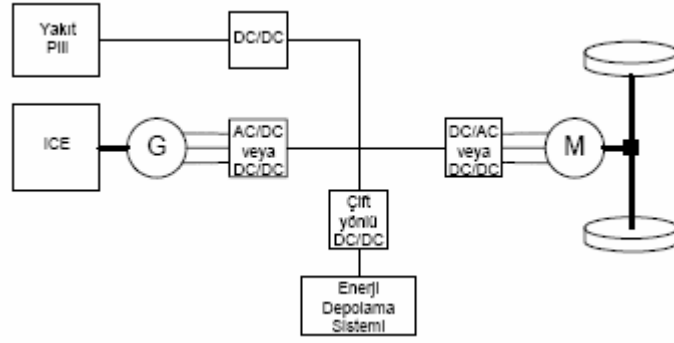
Şekil 4.6: HEA kullanılan 12V-24V iki yönlü DC/DC dönüştürücü [12].



Şekil 4.7: Yakıt pilli HEA kullanılan 60V...400V ayarlı DC/DC dönüştürücü [12].

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi hibrit elektrikli araçlarda kullanılan güç kontrol sistemleri, klasik güç elektroniği devrelerinden oluşmaktadır. Bu devreler 4 ana başlık altında incelenebilir;

- Doğrultucular (AC/DC),
- Çeviriciler (DC/DC),
- Eviriciler (DC/AC),
- Kısıyıcılar (AC/AC) dir.



Şekil 4.8: Hibrit elektrikli güç sistemi [2].

AC/AC kısıyıcılar, elektrikli araçlarda uygulama alanına sahip olmadığından bu çalışmada incelenmeyecektir.

4.2.1 AC/DC dönüştürücüler (Doğrultucular)

Alternatif gerilimin doğru gerilime dönüştürülmesinde doğrultucular kullanılmaktadır (Şekil 4.9). Doğrultucular kontrollü ve kontrolsüz olmak üzere 2 gruba ayrılmaktadırlar. İsimlerinden de anlaşılacağı gibi kontrolsüz doğrultucularda çıkış gerilimi kontrol edilmemekte ve ortalama çıkış gerilimi AC kaynaktaki gerilim değişimlerinden ve yükten etkilenmektedir. Kontrollü doğrultucularda ise kullanılan yarı iletken anahtarların anahtarlama açılarının kontrol edilmesiyle çıkış gerilimi ayarlanabilir sabit değerlerde tutulabilmektedir.

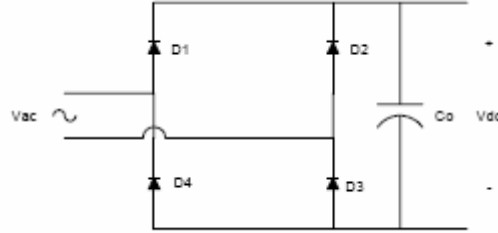


Şekil 4.9: Doğrultucuların blok diyagramı.

HEA'larda doğrultucular ve DC/DC dönüştürücüler, AC generatör kullanılması durumunda, çıkış geriliminin DC baraya bağlanmadan önce doğrultulmasında kullanılır. Bu doğrultucuların AC/DC dönüşümünün yanında bir diğer önemli özelliği enerji yönetim (energy management) sistemi olarak ta görev yapmasıdır.

4.2.1.1 Kontrolsüz Doğrultucular

Kontrolsüz doğrultucularda, yarı iletken anahtar olarak diyotlar kullanılmaktadır. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan doğrultucu türleri köprü doğrultuculardır. Şekil 4.10'da 1 fazlı köprü doğrultucu devre şeması görülmektedir.



Şekil 4.10: Bir fazlı köprü tipi kontrolsüz doğrultucu [2].

AC gerilimin pozitif olduğu sürede D1-D3 diyotları, negatif olduğu sürede ise D2-D4 diyotları ilettime geçmekte ve çıkıştaki kondansatörü doldurmaktadır. Çıkış gerilimindeki dalga şekli, kullanılan kondansatörün değerinin artırılması ile değiştirilebilir.

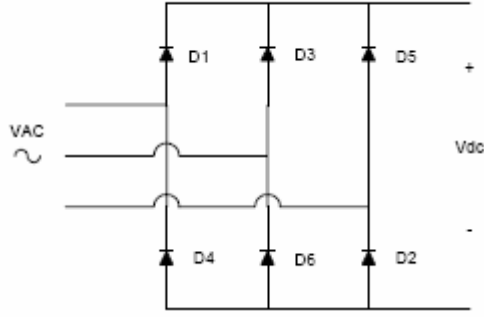
Şekil 4.10'da görülen doğrultucu devresinin çıkış gerilimi, giriş geriliminin tepe değerine eşittir.

$$V_{ac} = \sqrt{2}V_{rms} \cdot \sin(\alpha) = V_m \cdot \sin(\alpha) \quad (4.1)$$

$$V_{dc} = V_m \quad (4.2)$$

Üç fazlı kontrolsüz doğrultucu devre şeması Şekil 4.11'de görülmektedir. Çıkışta elde edilen gerilim değeri şu formülle hesaplanır;

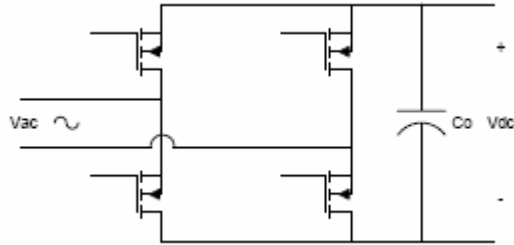
$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3} \cdot V_m}{\pi} \quad (4.3)$$



Şekil 4.11: Üç fazlı kontrolsüz köprü tipi doğrultucu [2].

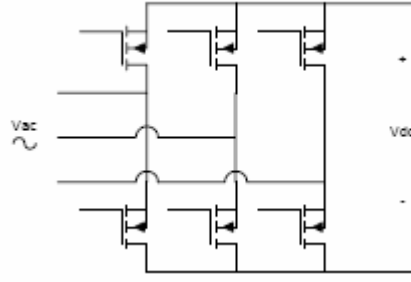
4.2.1.2 Kontrollü Doğrultucular

Kontrollü doğrultucularda, anahtarlama için kontrollü yarı iletken anahtarlar kullanılır. Günümüzde MOSFET ve IGBT'ler, anahtarlama hızlarının yüksek, iletim kayıplarının düşük olması ve yüksek güçlerde üretilmeleri gibi nedenlerle en yaygın olarak kullanılan anahtarlardır. Bunların yanı sıra, tristörler (SCR), GTO, MCT ve bipolar transistor (UJT)'larda kullanılabilir. Şekil 4.12'de bir fazlı kontrollü doğrultucunun şematik resmi görülmektedir.



Şekil 4.12: Bir fazlı kontrollü köprü tipi doğrultucu [2].

Kontrollü doğrultucularda, anahtarların tetikleme açılarının kontrolü ile çıkış gerilimi sabit bir değerde tutulur. Bunun için çeşitli darbe genişlik modülasyonu (PWM) teknikleri kullanılmaktadır. Şekil 4.13'te üç fazlı kontrollü doğrultucunun şematik resmi görülmektedir.

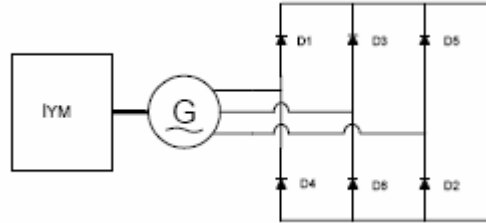


Şekil 4.13: Üç fazlı kontrollü köprü tipi doğrultucu [2].

4.2.1.3 Doğrultucuların Elektrikli Araçlarda Kullanımı

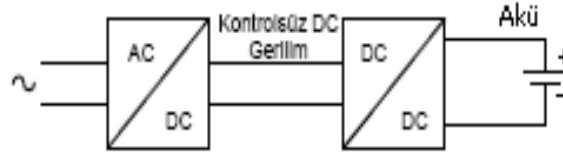
Hibrid elektrikli taşıtlarda kullanılan bara gerilimi DC'dir. Bunun başlıca nedeni, kullanılan elektronik devrelerde senkronizasyon sorununun yaşanmaması, kontrol kolaylığı ve verimliliğin artırılmasıdır. Ancak DC elektrik makinaları bakım gereksinimi ve ömürlerinin kısa olması gibi nedenlerle bu araç uygulamalarında tercih edilmemektedir.

HEA'larda elektrik enerjisi genellikle AC çıkışlı generatörler ile sağlanır. Üretilen elektrik enerjisi DC baraya, doğrultucu devreleri ile bağlanır. Şekil 4.14'de İYM-generatör ve DC bara bağlantısı görülmektedir.



Şekil 4.14: İYM + generatörün DC bara bağlantısı [2].

Doğrultucuların, EA'larda bir diğer kullanım alanı da akü şarj devreleridir. Akülerin şebekeden şarj edilebilmesi için kullanılan güç elektroniği sisteminin bir parçası da doğrultucu devreleridir. Şebeke gerilimi bir kontrolsüz doğrultucu ile doğrultulur. Daha sonra bir DC/DC çevirici ile uygun şarj algoritması kullanılarak akü şarj edilir. Şekil 4.15'te akü şarj sisteminin şematik resmi görülmektedir.



Şekil 4.15: Hibrit elektrikli araçlarda akü şarj devre sistemi [2].

4.2.2 DC/DC dönüştürücüler (Kıyıcılar)

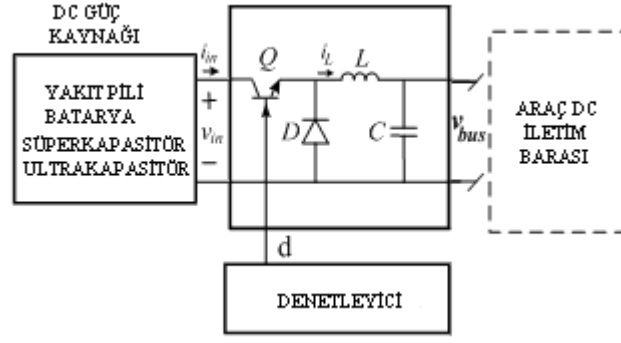
DC-DC çevirici olarak da tanımlanan çeviriciler çoğunlukla regüle edilmemiş DC gerilim kaynağının, kontrollü bir biçimde sabit DC gerilime dönüştürülmesi için kullanılırlar. Regüle edilmemiş DC gerilim, genellikle bir kontrolsüz doğrultucu ile sağlanır. Aküler ve yakıt pilleri de regüle edilmemiş DC gerilim kaynağıdır.

Çeviricilerin genel çalışma prensibi belirli bir periyot içerisinde yarı iletken anahtarın iletme ve kesime geçmesi ve sonucunda da ortalaması giriş geriliminden farklı bir çıkış geriliminin sağlanmasıdır. DC-DC çeviriciler anahtarlama güç kaynakları ve DC motor sürüş sistemlerinde oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. HEA uygulamalarında genellikle farklı gerilim seviyesine sahip DC sistemlerin birbirlerine bağlanması amacıyla kullanılırlar.

Literatürde alçaltıcı (buck) ve yükseltici (boost) olmak üzere 2 temel çevirici topolojisinden söz edilmektedir. Alçaltıcı-yükseltici, flyback, forward çeviriciler, cuk çevirici, yarım köprü çevirici, tam köprü çevirici ve sepic çevirici bu iki temel devrenin kombinasyonları ile türetilmiştir. Bahsi geçen tüm çeviricilerin tek, çift ve dört bölgede çalışan varyasyonları bulunmaktadır.

4.2.2.1 Azaltan (Buck) çevirici

Bu bölümde GSSA metodunun bir DC/DC buck dönüştürücüye uygulanmasına yer verilmiştir. İsminden de anlaşılacağı üzere alçaltıcı çevirici DC giriş geriliminden daha düşük ortalama DC gerilim üretir. Temel alçaltıcı devre şeması Şekil 4.16'da görülmektedir.



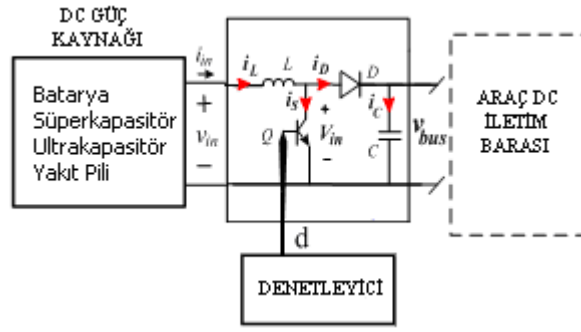
Şekil 4.16: Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan azaltan DC-DC çevirici devre şeması [13].

Belirli bir periyot içerisinde, yarı iletken anahtarın iletme ve kesime geçmesi ile ortalaması giriş geriliminden daha düşük bir DC gerilim elde edilir. Devrenin çıkışında bir L-C filtre bulunmaktadır. Endüktans yük akımındaki dalgalanmayı, kondansatör ise çevirici çıkış gerilimindeki dalgalanmayı azaltmak için kullanılır.

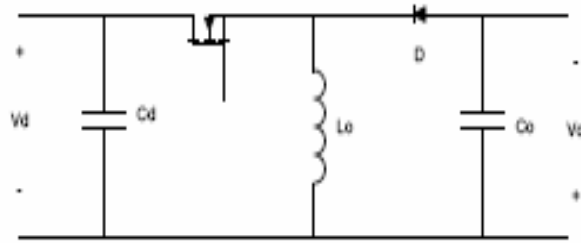
Anahtar iletme geçtiğinde yük endüktans üzerinden beslenir. Bu sırada endüktans üzerinde enerji depolanmaya başlanır. Anahtar kesim durumuna geçtiğinde ise serbest geçiş diyotu olarak adlandırılan diyot iletme geçer. Bu sayede endüktans üzerinde depolanan enerji yük üzerinde harcanır. Devrenin çıkışında bulunan kondansatör, anahtarın kesime gittiği süre içerisinde çıkış gerilimini sabit tutmaya çalışır.

4.2.2.2 Yükselten (Boost) çevirici

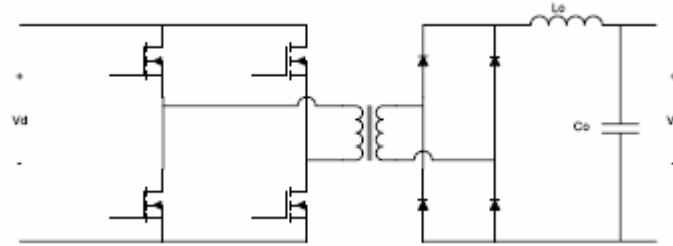
Yükselten çevirici kullanılarak ortalaması giriş geriliminden daha yüksek olan çıkış gerilimi elde edilir. Anahtar iletme geçtiğinde endüktans üzerinde enerji depolanmaya başlanır ve kesime geçtiğinde kaynak ve endüktans geriliminin toplamı diyot üzerinden yükü besler. Anahtarın iletme geçtiği sürede yük, çıkış kondansatörü tarafından beslenir. Şekil 4.17’de yükseltici DC-DC çeviricinin şematik resmi görülmektedir. Ayrıca şekil 4.18 ve 19’da iki farklı çeviricinin resimleri gösterilmektedir.



Şekil 4.17: Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan yükselten DC-DC çevirici devre prensip şeması [13].



Şekil 4.18: Azaltan-yükselten DC-DC çevirici devre şeması [2].



Şekil 4.19: Tam köprü DC-DC çevirici bağlantı şeması [2].

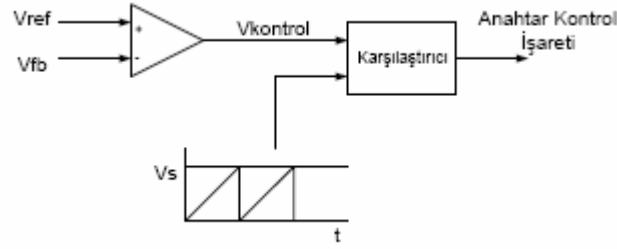
4.2.2.3 Kıyıcıların kontrolü

DC-DC çeviricilerde ortalama DC çıkış gerilimi, giriş gerilimindeki dalgalanmaya veya yükteki bir değişmeye rağmen istenilen bir değerde sabit tutulmalıdır. Çeviriciler, DC gerilimi bir seviyeden diğerine çevirmek için bir veya birden fazla yarı iletken anahtar içerirler.

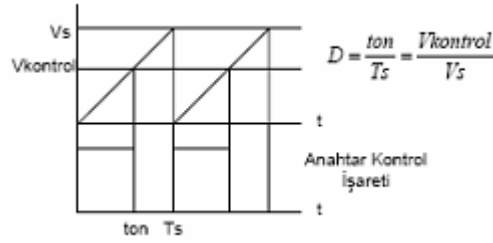
DC-DC çeviricilerde ortalama DC çıkış gerilimi kullanılan bu anahtarların iletim ve kesim sürelerinin değiştirilmesiyle kontrol edilir. En yaygın kontrol yöntemi, sabit bir anahtarlama frekansında, anahtarın iletim süresinin ayarlanmasıdır. PWM adı

verilen bu yöntemde, anahtarın iletim süresinin anahtarlama periyoduna oranı değiştirilir.

PWM işaretinin üretilmesi için çıkış geriliminden geri besleme (Vfb) alınır ve istenilen gerilim seviyesinde bir referans işaretile (Vref) karşılaştırılır (Şekil 4.20). Aralarındaki fark yani hata işareti bir güçlendiriciden geçirildikten sonra, frekansı anahtarlama frekansına eşit olan testere dişli dalga ile kıyaslanır. Kontrol işaretinin (Vkontrol), testere dişli dalgadan daha yüksek olduğu sürece anahtar kontrol işareti üretilir (Şekil 4.21).



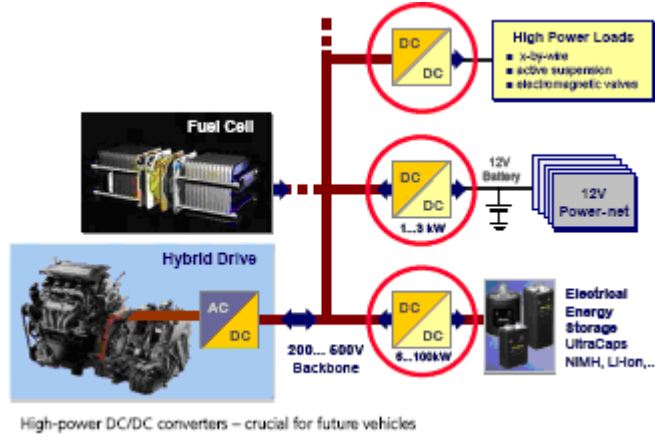
Şekil 4.20: PWM dalga işaretinin üretilmesi [2].



Şekil 4.21: Kontrol işaretinin üretilmesi [2].

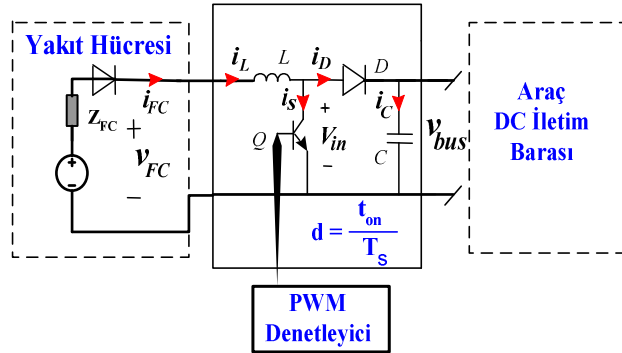
4.2.2.4 Kıyıcların hibrit elektrikli araçlarda kullanım alanları

DC-DC çeviriciler, HEA'larda farklı DC gerilim seviyesine sahip sistemlerin birbirine bağlanması ve DC motor kontrolü olmak üzere iki amaçla kullanılabilirler. Farklı gerilim seviyesine sahip DC sistemler yakıt pili, akü grubu veya alçak gerilim beslemesine ihtiyaç duyan elektronik devreler olabilir. Şekil 4.22'de farklı seviyedeki DC gerilimlerinin paralel bağlanmasının şematik resmi görülmektedir.



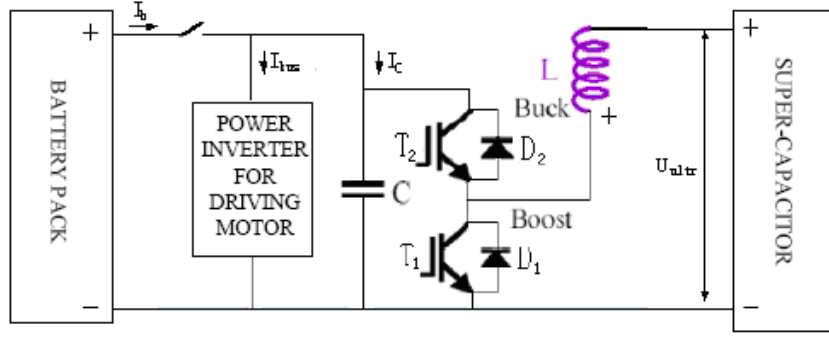
Şekil 4.22: HEA farklı seviyedeki DC gerilimlerin birbirlerine paralel bağlanması [12].

Pek çok binek hibrid elektrikli araç uygulamasında DC bara gerilimi 300 V civarında seçilmiştir. Bara gerilimi, kullanılan akülerin birbirine seri bağlanması ile gerçekleştirilebilir. Örneğin 25 adet 12 V'luk kurşun asit akünün seri bağlanması ile 300 V'luk bara gerilimi oluşturulur. Bu durumda akü grubu için DC-DC çevirici kullanmaya gerek olmayabilir. Ancak yakıt pili sistemlerinin çıkış gerilimi genellikle bu seviyenin altında olduğundan, yakıt pilleri baraya güç yönetim sistemi adı da verilen DC-DC çevirici aracılığı ile bağlanır (Şekil 4.23).



Şekil 4.23: Hibrid elektrikli araçlarda kullanılan yakıt pilinin araç iletim barasına yükseltilen DC/DC çevirici ile bağlanması.

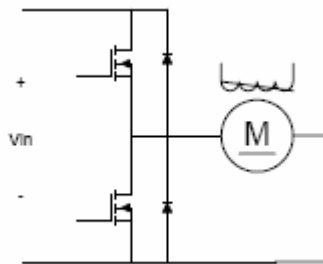
Akü grubu çıkışında kullanılan DC-DC çeviriciler, standart çeviricilerden farklı olarak, çift yönlü güç akışını sağlamalıdır. HEA'larda akü grubu, çeşitli yol koşullarında sistemi besler ve uygun durumlarda tekrar şarj edilir. Bu işlem için kullanılacak çevirici çift yönlü çalışabilmeli veya iki ayrı çevirici kullanılmalıdır (Şekil 4.24). İki çevirici kullanımından ağırlık ve maliyet gibi nedenlerle kaçınılmaktadır.



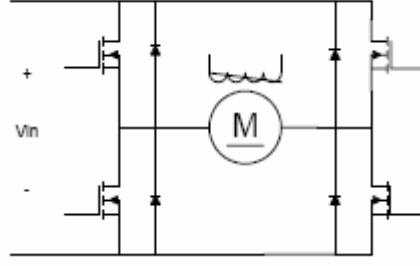
Şekil 4.24: Hibrit elektrikli araçlarda motoru sürmek ve batarya ile süperkapasitör arasındaki enerji akışını sağlayan DC/DC çeviricinin devre şeması [14].

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

DC-DC çeviriciler DC motor sürücüsü olarak da kullanılmaktadır. Bu çeviriciler bir, iki, üç ve dört bölgede çalışabilen sürücüler olarak sınıflandırılırlar. Birinci bölge motor çalışma için kullanılır ve akımın akış yönü kaynaktan yüke doğrudur. İkinci bölge ise geri kazanımlı frenleme içindir ve elektrik makinesi generatör olarak çalışarak akımın kaynağa doğru akmasına neden olur. EA'larda geri kazanımlı frenleme sürüş menziline artırılması için çok önemlidir. Bu nedenle EA'larda DC motor sürücülerini en azından iki bölgede çalışabilmelidir. Ters yönde çalışmanın mekanik anahtarlar yerine elektronik kontrolle yapılmasının istenmesi halinde dört bölgede çalışabilen çeviriciler kullanılır. Şekil 4.25'te iki bölgeli DC motor sürücüsünün ve şekil 4.26'te de dört bölgeli DC motor sürücüsünün şematik resmi görülmektedir.



Şekil 4.25: İki bölgeli DC motor sürücüsü [2].

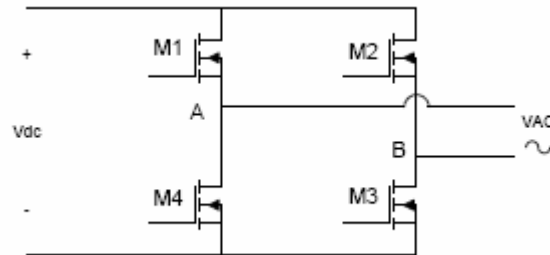


Şekil 4.26: Dört bölge DC motor sürücüsü [2].

4.2.3 DC/AC Dönüştürücüler (Eviriciler)

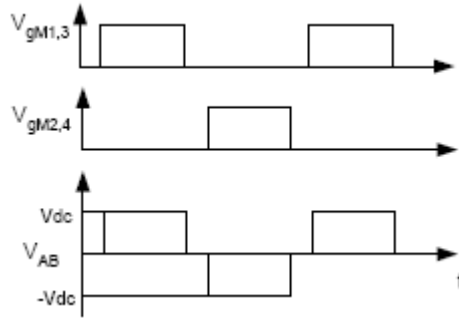
Eviriciler DC giriş gerilimini AC'ye çeviren güç elektroniği devreleridir. Elektrikli taşıt tahrik sistemlerinde, 3 fazlı gerilim beslemeli PWM eviriciler asenkron, sürekli mıknatıslı motor kontrollerinde kullanılmaktadır. Günümüzde anahtarlama elamanı olarak çoğunlukla IGBT'ler tercih edilmektedir. Genel olarak tüm güç elektroniği devrelerinde kullanılan anahtarların nominal gerilimi, anahtarlama sırasında oluşan gerilim yükselmeleri nedeniyle, bara geriliminin iki katı kadar seçilir.

İdeal eviricinin çıkış gerilimi sinüzoidal dalga şeklinde olmalıdır. Ancak uygulamada tam olarak sinüzoidal değildir ve harmonikler içerir. Çıkış gerilimindeki bu harmonikler, yüksek hızlı yarı iletken anahtarların çeşitli anahtarlama teknikleri kullanılarak kontrol edilmesiyle azaltılabilir. Bunun yanında, bazı uygulamalarda, çıkışı kare dalga olan eviricilerde kullanılmaktadır. Anahtarlama için kullanılan çeşitli PWM tekniklerinden bazıları, sinüzoidal PWM, histerisiz bant PWM ve uzay vektörü PWM'dir. Şekil 4.27'de bir fazlı evirici devresinin şematik resmi görülmektedir.



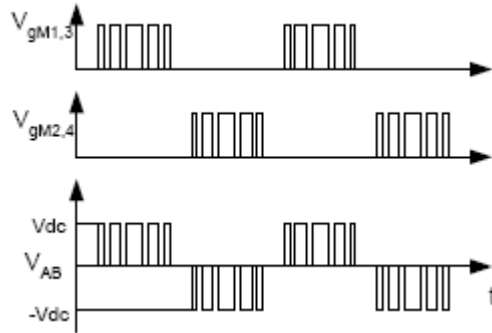
Şekil 4.27: Bir fazlı evirici devresi [2].

Bir fazlı eviricideki anahtarların kontrol girişlerine (Gate) uygun işaretler uygulanarak sırayla ilettime geçirilirler. Kare dalga eviriciye ilişkin kontrol işaretleri ve evirici çıkışı şekil 4.28’te gösterilmiştir. 1 ve 3 numaralı anahtarlar ilettime geçtiğinde A-B noktaları arasında pozitif doğru gerilim uygulanır. 2 ve 4 numaralı anahtarlar ilettime geçtiğinde ise negatif doğru gerilim A-B noktaları arasında görülür. Dolayısıyla bir periyodun yarısında pozitif, diğerinde ise negatif gerilim uygulanarak, harmonikler içeren AC gerilim evirici çıkışında görülür.



Şekil 4.28: Kare dalga evirici kontrol ve çıkış gerilimleri [2].

Harmonikleri daha az ve sinüzoidal AC gerilime daha yakın dalga şekilleri üretebilmek için farklı PWM teknikleri kullanılır. Şekil 4.29’da evirici kontrol ve çıkış gerilimlerinin şematik resimleri görülmektedir.



Şekil 4.29: Evirici kontrol ve çıkış gerilimleri [2].

Çıkışın pozitif olduğu sürede ilettime olan 1 ve 3 numaralı anahtarlar, bu yarı periyotta da ilettime ve kesime geçirilirler. Negatif periyotta aynı yöntem 2 ve 4 numaralı anahtarlara da uygulanır. Bu yöntemde çıkış gerilimi kare dalga çıkışa göre

daha az harmonik içermekte ve daha çok AC gerilime benzemektedir. İdeal AC gerilime yaklaşabilmek için pek çok farklı PWM yöntemi geliştirilmiştir.

Eviriciler asenkron, senkron, sürekli mıknatıslı senkron motor hız kontrolünde kullanılabilir. Bu makinelerin kontrolünde evirici çıkışı sinüzoidaldir. Sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım makinesi kontrolünde ise fazlar kare dalga ile beslenir. HEA'larda motor hız kontrolü için kullanılan eviriciler genellikle kullanılan motorun faz sayısına bağlı olarak 3 fazlıdır.

4.3 Hibrit Elektrikli Araçlarda Kullanılan Motor Tahrik Sistemleri

TEA ve HEA'larda kullanılan tahrik sistemleri elektrik motoru, güç elektroniği ve kontrol ünitelerinden oluşur. Güç elektroniği ve yeni manyetik malzemelerdeki hızlı gelişmeler nedeniyle, bu sistemler her geçen gün yenilenmektedir. HEA'larda ki elektrik tahrik sistemlerinin seçimi, esas olarak üç faktöre bağlıdır. Bunlar; sürücünün beklentileri, araç kısıtları ve enerji kaynaklarıdır. Sürücünün beklentileri; ivmelenme, en yüksek hız, tırmanma kabiliyeti, frenleme ve menzil özelliklerini içeren sürüş profili ile tanımlanır. Araç kısıtları aracın çeşidine, araç ağırlığına ve aracın taşıdığı yüke bağlıdır. Enerji kaynakları ise aküler, yakıt pilleri, süperkapasitörler, volanlar ve değişik hibrid kaynaklarla ilgilidir.

Bugüne gelene kadar farklı elektrik motor tipleri tümü-elektrikli ve HEA'larda denenmiştir. TEA ve HEA motorlarında beklenen özellikler şunlardır:

- Yüksek anlık güç ve yüksek güç yoğunluğu,
- Kalkış ve yokuş tırmanma durumları için düşük hızlarda yüksek moment,
- Normal seyir sırasında yüksek hızlarda yüksek güç,
- Sabit moment ve sabit güç bölgelerini içeren çok geniş hız aralığı,
- Moment ihtiyacına hızlı cevap verebilme,
- Geniş hız ve moment aralıklarında yüksek verim,
- Geri kazanımlı frenleme için yüksek verim,
- Aracın değişik çalışma koşulları için yüksek güvenilirlik ve sağlamlık,
- Kabul edilebilir seviyede maliyet.

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

Güç elektroniği ve kontrol teknolojilerinde gelinen noktada, asenkron motor hız kontrolü problem olmaktan çıkmış ve endüstride oldukça yaygın olarak kullanılan bu motor EA'larda kullanım imkanına kavuşmuştur. Özellikle kısa devre kafesli asenkron motorlar, üretimin kolaylığı, maliyet avantajı ve sağlam yapısı nedenleri ile tercih edilmektedir.

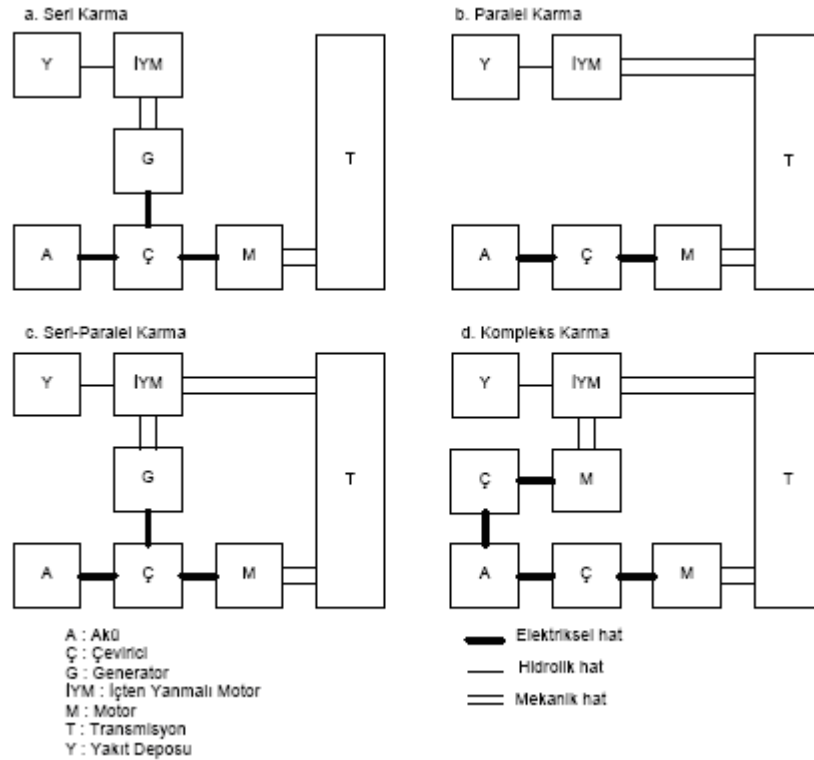
Günümüzde hali hazırda üzerinde çalışılan EA'ların çoğunda vektör kontrollü asenkron motor kullanılmaktadır. Ancak, sürekli mıknatıslı elektrik motorları da gelecek vaat etmektedir. Elektrikli araç tahrik sistemlerinde başlıca 4 elektrik motoru kullanılmaktadır. Bunlar;

- DC motor,
- Asenkron motor,
- Sürekli mıknatıslı motor,
- Anahtarlamaalı relüktans motorlardır.

5. HEA TÜRLERİNİN ENERJİ YÖNETİMİ VE SÜRÜŞ SİSTEMLERİ

5.1 Sürüş Kontrolü ve Sınıflandırma

HEA, tahrik enerjisinin iki ya da daha fazla tipteki enerji kaynağından sağlandığı ve en az birisinin elektriksel enerji ürettiği araçtır. Bu tanıma bağlı kalarak, İYM ve akü, akü ve yakıt pili, akü ve kapasitör gibi birçok çeşit hibrit elektrikli araç mevcuttur. Bu hibrit tanımın yanı sıra, HEA basit anlamda, bir İYM ve bir elektrik motoru bulunan bir araçtır. Bu bölümde, bu tanıma göre tahrik sisteminde hem İYM, hem de elektrik motoru bulunan, enerji kaynağı olarak da İYM ve akü kullanan hibrit elektrikli bir aracın enerji yönetim sistemi incelenecektir. Şekil 5.1'de bu sınıflandırmaya karşılık düşen blok diyagramlar görülmektedir.



Şekil 5.1: Hibrit elektrikli araçların sınıflandırılması [2].

Burada, elektriksel ve mekanik hatlar çift yönlü iken hidrolik hat ise tek yönlüdür. Hibrit elektrikli araçları sınıflandırmada araçlardaki enerji yönetim şekillerinde ortaya çıkan ihtiyaçlar ve farklılıklar günümüzde aşağıdaki sınıflandırmayı doğurmuştur. HEA'lar, geleneksel olarak seri ve paralel olarak iki temel çeşide ayrılırlar. Seri ve paralel HEA'ların özelliklerini gösteren araçların geliştirilmesi ile birlikte bu sınıflandırma seri, paralel ve seri-paralel olarak genişlemiştir. 2000 yılında, bu üç sınıflandırmaya dahil edilemeyen yeni bir çeşidin geliştirilmesiyle HEA'lar dört sınıf halinde gruplandırılmıştır.

- Seri hibrit,
- Paralel hibrit,
- Seri-paralel hibrit,
- Kompleks hibrit.

5.2 Enerji Akışı Kontrolü

HEA'lardaki konfigürasyonların değişikliklerinden dolayı, sistem elemanları arasındaki enerji akışını düzenlemek için farklı güç kontrol stratejileri gereklidir. Bu kontrol stratejileri, HEA'lardaki bazı hedefleri yerine getirmeyi amaçlar. Dört ana hedef vardır. Bunlar;

- Azami yakıt ekonomisi,
- Düşük emisyonlar,
- Düşük sistem maliyeti,
- İyi sürüş performansdır.

HEA'lar için güç kontrol stratejilerinin tasarımı farklı faktörler içerir. Bazı anahtar faktörler aşağıda özetlenmiştir [2]:

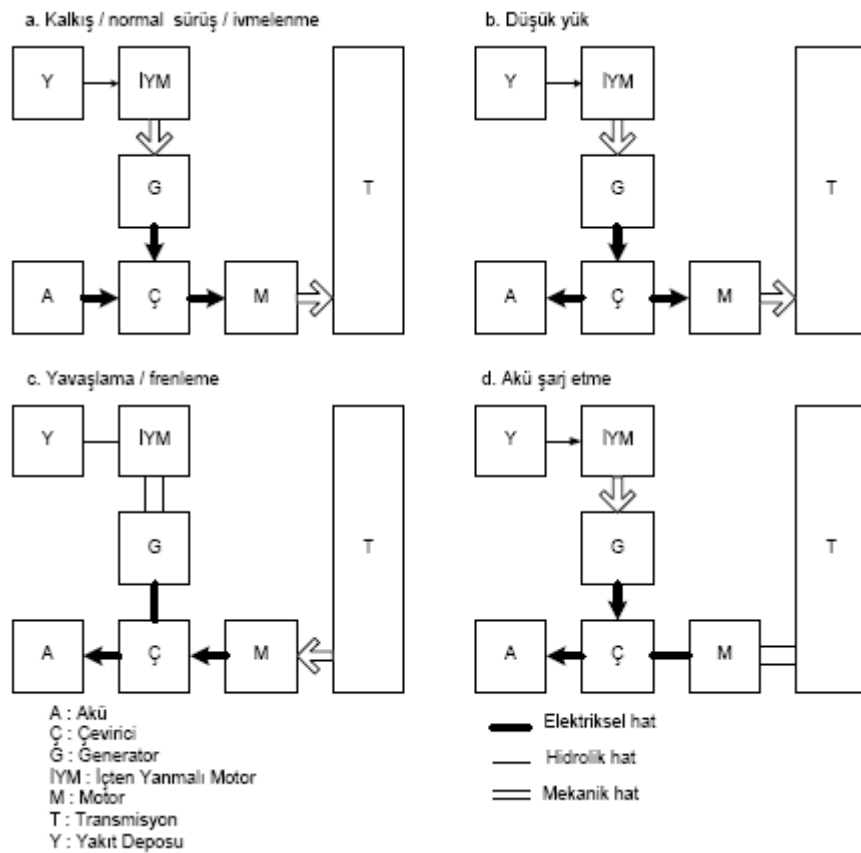
- İYM'un optimal çalışma noktası: Optimal çalışma noktası, İYM'nin moment-hız düzlemi üzerinde azami yakıt ekonomisinin, en düşük emisyonlar ya da yakıt ekonomisi ve emisyonlar arasındaki bir orta nokta esas alınabilir.

- İYM'un optimal çalışma eğrisi: İYM farklı güç ihtiyaçlarını karşılamak durumunda olduğu için bunlara karşılık gelen optimal çalışma noktaları optimal çalışma eğrisini oluştururlar.
- İYM'un optimal çalışma bölgesi: İYM, moment-hız düzlemi üzerinde yakıt verimliliğinin optimum olduğu, tercih edilen bir çalışma bölgesine sahiptir.
- Düşük İYM dinamikleri: İYM'nin çalışma hızının, ani dalgalanmalardan kaçınılacak şekilde düzenlenmesi gerekir.
- Düşük İYM hızı: İYM düşük hızlarda çalıştığı zaman yakıt verimliliği çok düşüktür. İYM'nin hızı belirli bir eşik değerinin altında olduğu zaman kapatılmalıdır.
- Düşük İYM çalıştırma zamanı: İYM çok sık çalıştırılıp kapatılmamalıdır. Aksi halde, bu durum yakıt tüketiminin ve emisyonların artmasına neden olur. Bu dezavantajları engelleyecek bir en düşük çalıştırma zamanı belirlenmelidir.
- Uygun akü kapasitesi: Akü kapasitesi, ivmelenme için yeterli enerjiyi sağlayabilecek, frenleme esnasında ya da yokuş aşağı giderkenki rejeneratif enerjiyi kabul edebilecek uygun bir seviyede korunmalıdır. Akü kapasitesi çok yüksek olduğu zaman, İYM kapatılmalı ya da boşta çalıştırılmalıdır. Bu kapasite çok düşük olduğu zaman ise, İYM aküyü şarj etmek için çıkışını arttırmalıdır.
- Nispi dağıtım: Güç talebinin, İYM ve akü arasındaki dağıtımını sürüş çevrimi boyunca orantılı olarak bölünmelidir.
- Coğrafik politika: Belirli şehirlerde ya da bölgelerde hibrid elektrikli aracı, saf elektrikli moda çalıştırma ihtiyacı doğacaktır. Bu geçiş, elle yada otomatik olarak kontrol edilebilecektir.

5.2.1 Seri hibrit kontrol

Seri hibrit, HEA'nın en basit çeşididir. İYM' nin mekanik çıkışı, bir generatör kullanılarak elektrik enerjisine çevrilir. Elektrik enerjisi ya aküleri şarj eder ya da elektrik motoru ve mekanik transmisyon üzerinden tekerleri tahrik eder.

Kavramsal olarak bakıldığında bu araç geleneksel araçla kıyaslanabilsin diye sürüş menzili oldukça küçük boyutta İYM kullanılarak arttırılmış elektrikli araçtır. İYM'un tahrik sistemi ile mekanik bağlantısı olmadığından, generatör setini yerleşiminde esnekliğe sahiptir. Sürüş sistemindeki basitliğe rağmen, İYM, generatör ve elektrik motoru gibi üç tahrik elemanına ihtiyaç duyar. Bir başka dezavantajı ise, eğer bu araç uzun bir eğimi tırmanmak için tasarlanmışsa bütün tahrik elemanlarının bu eğimi baştan sonuna kadar gidebilecek şekilde azami güçte boyutlandırılması gereklidir. Diğer taraftan, kısa yolculuklar için düşünülürse, buna karşılık generatör seti daha düşük güçte boyutlandırılabilir.



Şekil 5.2: Seri hibrit elektrikli araç çalışma modları [2].

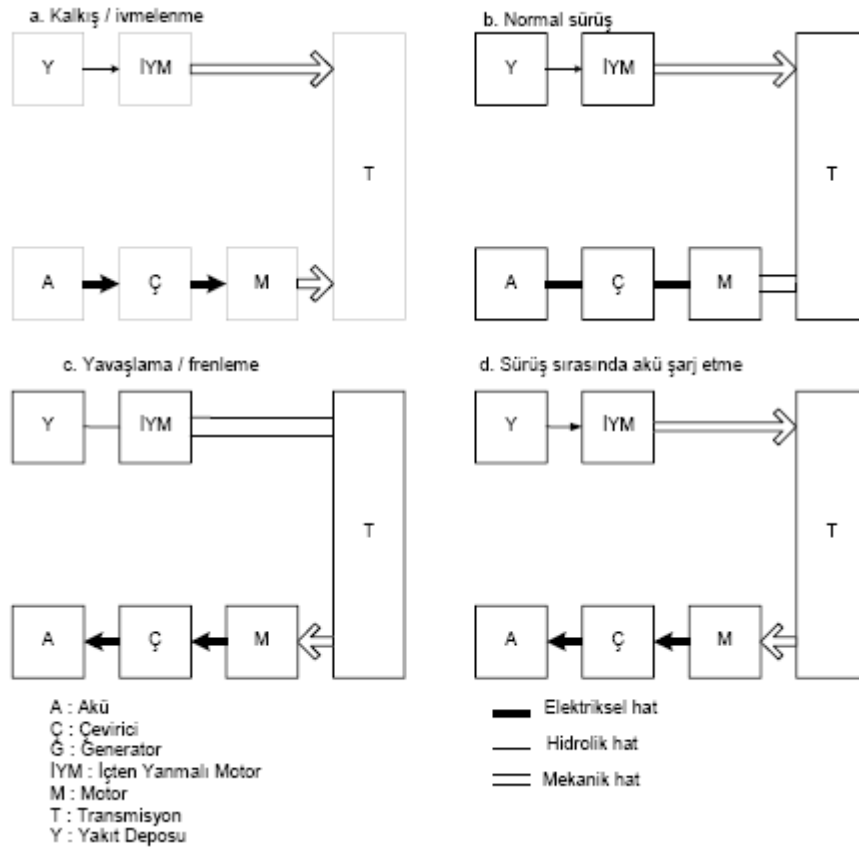
Seri hibrit sistemde enerji akışı kontrolü şekil 5.2’de görüldüğü üzere dört çalışma durumunda gösterilebilir. Seri HEA’ların kalkış, normal sürüş ve ivmelenmesi sırasında, İYM (generatör üzerinden) ve akü elektrik enerjisini güç çeviricisine iletir. Oradan da elektrik motorunu sürerek transmisyon aracılığıyla tekerlekleri tahrik eder. Düşük yükte, İYM’nin çıkışı tekerlekleri sürmek için ihtiyaç olan güçten yüksek olacağından üretilen enerji aynı zamanda aküleri uygun seviyeye ulaştıncaya kadar şarj etmede kullanılır. Frenleme ya da yavaşlama sırasında elektrik motoru generatör olarak çalışıp tekerleklerdeki kinetik enerjiyi elektriğe dönüştürerek çevirici üzerinden aküleri şarj eder. Aynı zamanda, araç tamamen dursa dahi aküler, İYM tarafından generatör ve çevirici üzerinden şarj edilebilirler.

5.2.2 Paralel hibrit kontrol

Seri hibrit sistemden farklı olarak paralel hibrit sistem, İYM ve elektrik motorunun tekerleklere mekanik güç aktarmasını olanaklı kılar. İYM ve elektrik motoru genellikle tekerleklerin şaftına iki dişli aracılığıyla bağlanır. Böylelikle sadece İYM, sadece elektrik motoru ya da her ikisi birlikte tahrik gücünü sağlayabilir.

Kavramsal olarak paralel hibrit sistem, daha düşük emisyonlar ve yakıt tüketimi elde edebilmek için elektrikle desteklenmiş içten yanmalı bir araç modelidir. Elektrik motoru, rejeneratif frenleme esnasında ya da İYM’un verdiği gücün tekerlekleri tahrik edecek güç ihtiyacından fazla olduğu anlarda aküleri şarj etmek için bir generatör olarak kullanılabilir.

Seri HEA’tan üstünlüğü, İYM ve elektrik motoru gibi sadece iki tahrik elemanına ihtiyaç duymasıdır. Seri hibrit sisteme göre bir diğer avantajı ise aynı performansı elde edebilmek için daha küçük bir İYM ve elektrik motoru kullanılabilir. Uzun yol uygulamasında bile, sadece İYM gerekli azami güç için boyutlandırılmaya ihtiyaç duyulurken, elektrik motoru hala yarısı kadar boyutlandırılabilir.



Şekil 5.3: Paralel hibrit elektrikli araç çalışma modları [2].

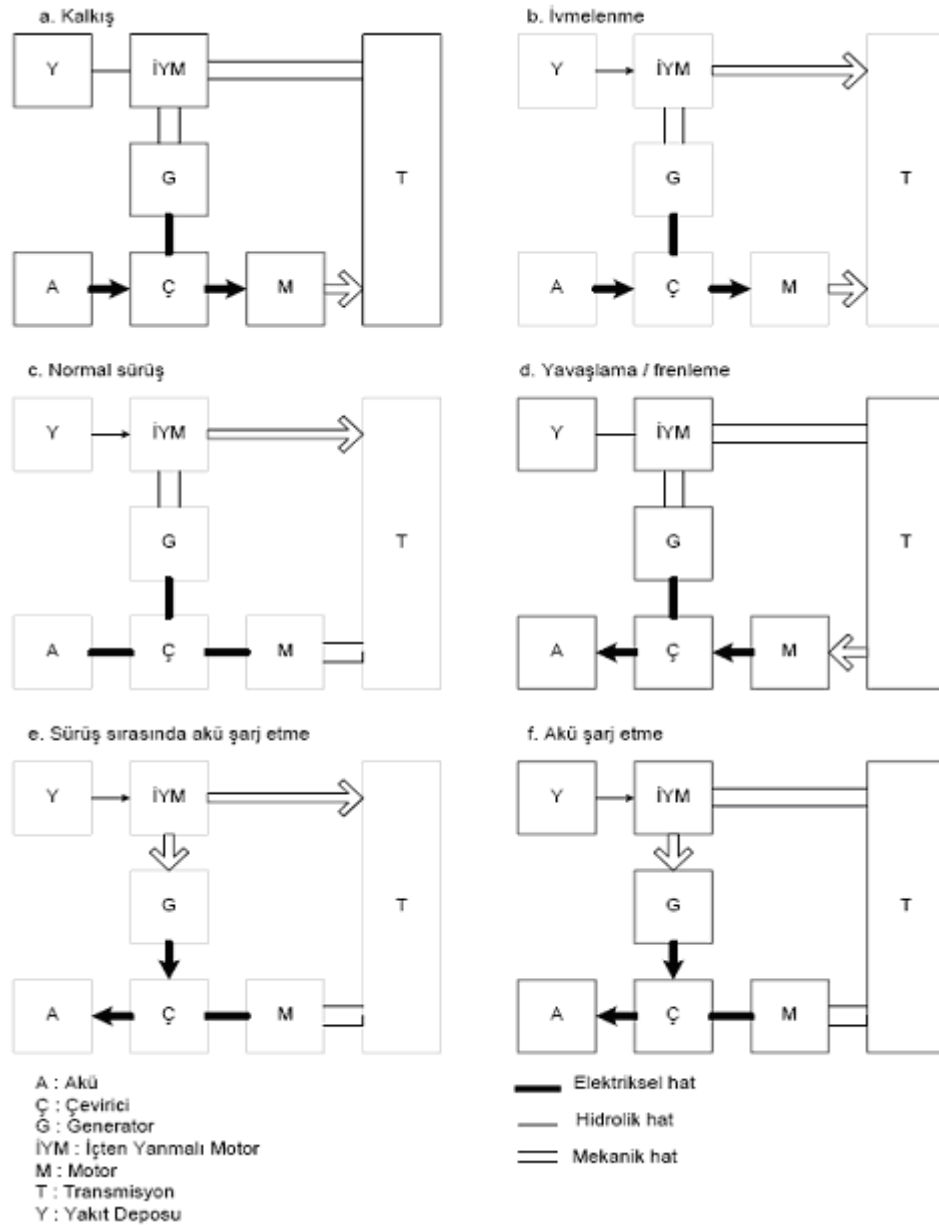
Paralel HEA'taki dört çalışma durumu Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Kalkış ya da ivmelenme sırasında İYM ve elektrik motorunun ikisi de aracı tahrik etmek için gerekli gücü orantılı olarak paylaşırlar. Genel olarak, İYM ve elektrik motoru arasındaki nispi dağılım %80-20'dir. Normal sürüş sırasında, aracı tahrik etmek için gerekli gücü tek başına sağlarken elektrik motoru kapalı durumdadır. Frenleme ya da yavaşlama sırasında elektrik motoru generatör olarak çalışıp çevirici üzerinden aküleri şarj eder. Aynı zamanda, İYM ve elektrik motoru aynı şafta bağlantılı olduğu için araç düşük yüklerdeyken aküler, İYM tarafından elektrik motoru aracılığıyla şarj edilebilir.

5.2.3 Seri-Paralel Hibrit Kontrol

Seri-paralel hibrit sistem, seri ve paralel HEA'ların her ikisinin de özelliklerini gösterirken, seri ile karşılaştırıldığında ilave bir mekanik bağlantı, paralel ile karşılaştırıldığında ilave bir generatör içerir. Her iki sistemin avantajlı özelliklerine

sahip olmasına rağmen seri-paralel hibrit elektrikli araç göreceli olarak daha karmaşık ve maliyetlidir. Bununla birlikte, kontrol ve üretim teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte bazı modern HEA’larda bu sistem uygulanmaktadır.

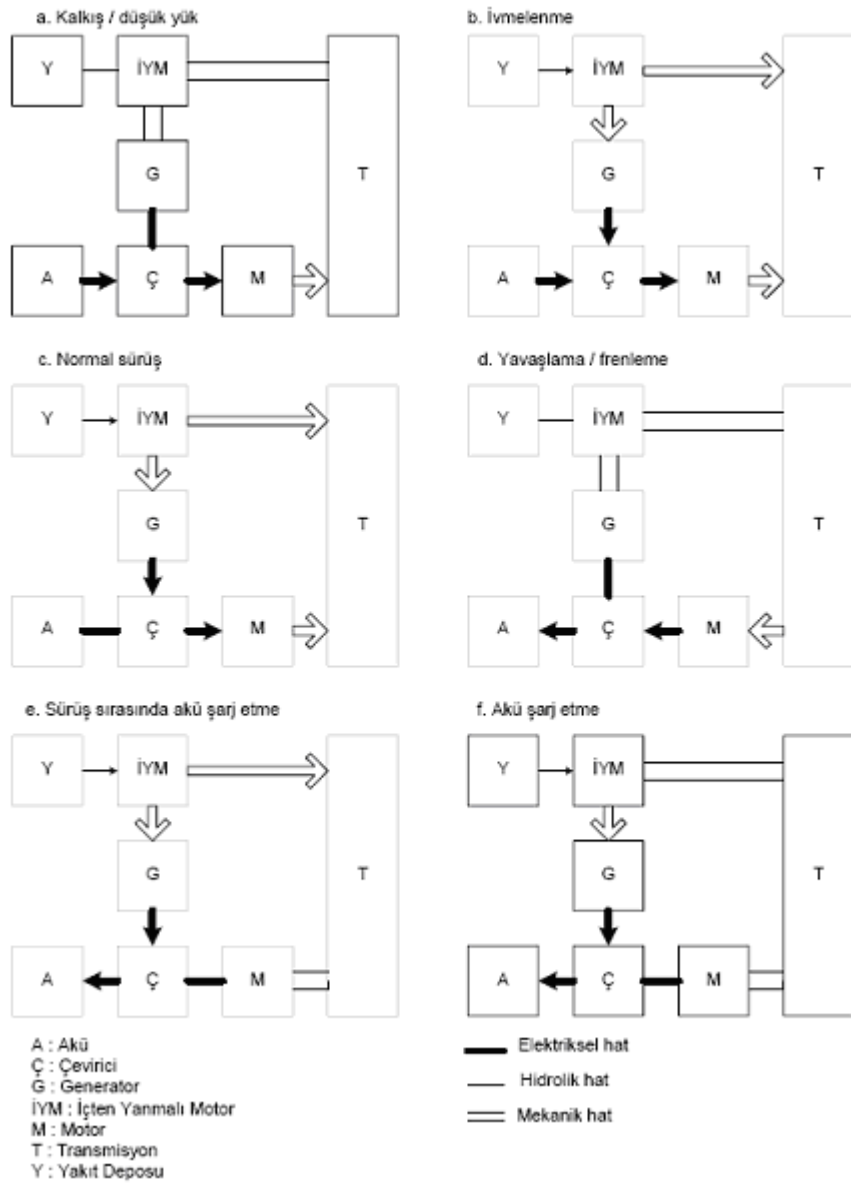
Seri-paralel hibrit sistem, seri ve/veya paralel hibrit sistemin özelliklerini içerir. Bundan ötürü, enerji akışı kontrolünü gerçekleştirmek için olası birçok çalışma durumu mevcuttur.



Şekil 5.4: Seri-paralel hibrit elektrikli araç (içten yanmalı motor ağırlıklı) çalışma modları [2].

Basit olarak, bunları İYM ağırlıklı ve elektrik ağırlıklı olarak iki gruba ayırabiliriz. İYM ağırlıklı sistem, İYM' nin elektrik motorundan daha aktif olduğunu gösterirken elektrik ağırlıklı sistem elektrik motorunun daha aktif olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.4'te altı çalışma durumunun bulunduğu İYM ağırlıklı seri-paralel hibrit sistemi göstermektedir. Kalkış anında, aküler aracı tahrik etmek için gerekli gücü tek başına sağlarken İYM kapalı durumdadır. İvmelenme sırasında hem İYM, hem elektrik motoru aracı tahrik etmek için gerekli gücü orantılı olarak bölüşürler.



Şekil 5.5: Seri-paralel hibrit elektrikli araç (elektrik ağırlıklı) çalışma modları [2].

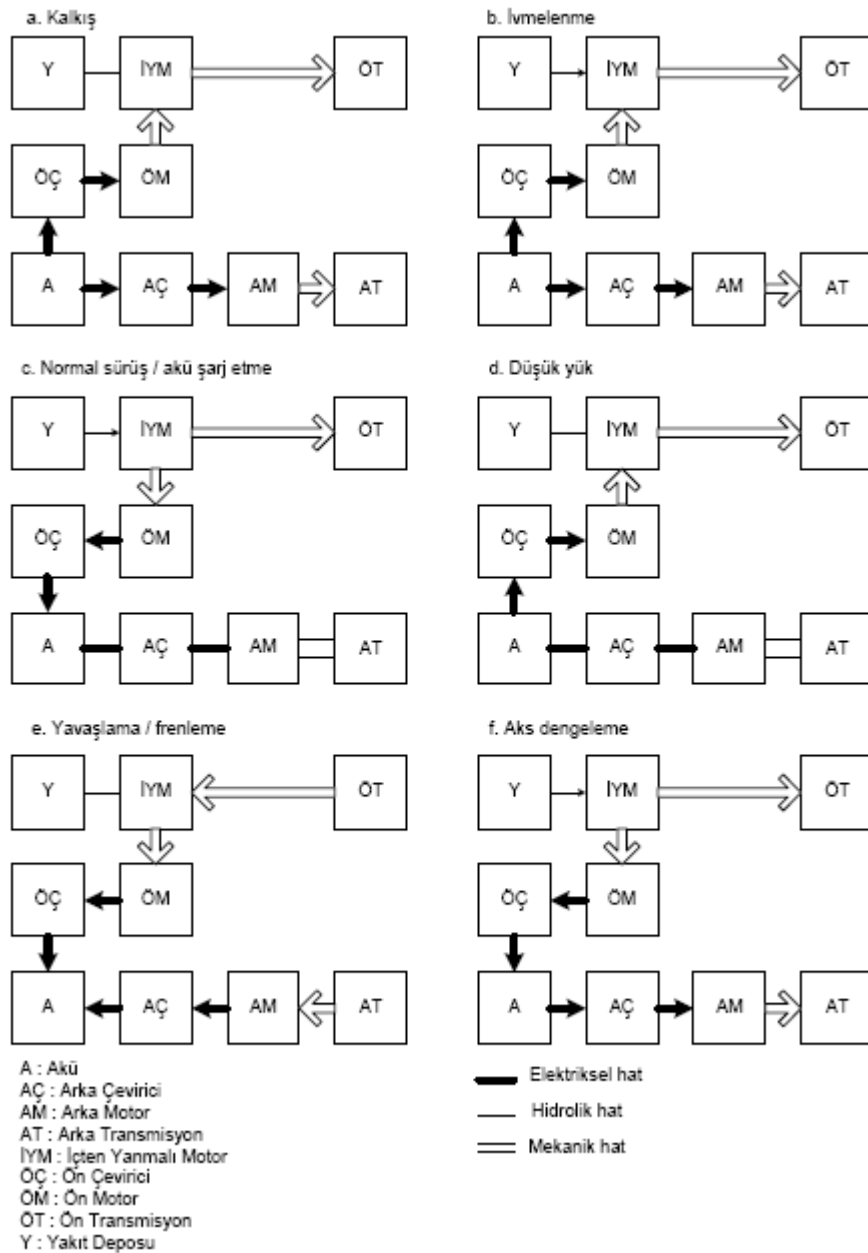
Normal sürüş sırasında, İYM gerekli gücü tek başına sağlarken, elektrik motoru kapalı durumdadır. Frenleme ya da yavaşlama sırasında elektrik motoru generatör olarak çevirici üzerinden aküleri şarj eder. Sürüş esnasında aküyü şarj etmek için, İYM hem aracın tekerleklerini tahrik eder hem de generatör aracılığıyla çevirici üzerinden aküleri şarj eder. Aracın durduğu durumlarda İYM aküleri şarj etmek için generatörü tahrik edebilir.

Şekil 5.5'te altı çalışma durumunun bulunduğu elektrik ağırlıklı seri-paralel hibrit sistemi göstermektedir. Kalkış anında ve düşük yüklerde, aküler aracı tahrik etmek için elektrik motorunu beslerken İYM kapalı durumdadır. İvmelenme ve normal sürüş durumunda, İYM ve elektrik motoru ikisi birden çalışarak aracı tahrik ederler. Anahtar farklılık ivmelenme için kullanılan elektrik enerjisi, hem generatör hem de aküden gelirken, normal sürüş sırasında yalnızca İYM tarafından tahrik edilen generatör tarafından gelir. Bir planet dişlisi (planetary gear) İYM'nin çıkışını ayırmak için kullanılarak, aracı tahrik etmek ve generatörü tahrik etme işlevleri gerçekleştirilir. Frenleme ya da yavaşlama sırasında elektrik motoru generatör olarak çalışarak aküleri çevirici üzerinden şarj eder. Aynı zamanda, sürüş sırasında aküleri şarj etmek için İYM bir yandan generatörü tahrik ederken bir yandan da aracın tekerleklerini tahrik eder. Araç dururken, İYM aküleri şarj edebilsin diye generatörü tahrik edebilir.

5.2.4 Kompleks hibrit sistem

Bu sistem diğer üç sınıflandırmaya dahil edilemeyecek kompleks bir konfigürasyon içerir. Kompleks hibrit, seri-paralel hibrit ile benzer görülmele birlikte generatör ve elektrik motorunun ikisi de elektrik makinasıdır. Bununla birlikte, esas farklılık kompleks hibrit sistemde elektrik motoru çift yönlü enerji akışı yaparken, seri-paralel hibrit de generatör tek yönlü enerji akışı sağlamaktadır. Bu çift yönlü enerji akışı çok çeşitli çalışma durumlarına imkan tanırken, özellikle seri-paralel hibrit sistem tarafından gerçekleştirilemeyen üçlü tahrik (İYM ve iki elektrik motoru) çalışma durumunu gerçekleştirir. Seri-paralel hibrit elektrikli araca benzer şekilde, kompleks hibrit sistem yüksek derecede karmaşıklık ve yüksek maliyete sahiptir. Bununla birlikte, bazı yeni HEA'larda çift akslı tahrik sistemi bulunmaktadır.

Kompleks hibrit kontrolün geliştirilmesi, HEA'lar için çift akslı tahrik sistemi üzerine odaklanmıştır. Bu sistemde, ön tekerleklerin aksı ve arka tekerleklerin aksı ayrı ayrı tahrik edilmektedir. Ön tekerlekler ve arka tekerlekler arasında bir aktarım ya da tahrik şaftı olmadığından, bu durum daha hafif bir tahrik sistemine ve araç içerisinde yerleştirme esnekliğine olanak tanır. Bununla birlikte, dört tekerde yapılan rejeneratif frenleme, aracın yakıt verimliliğini ve dolayısıyla yakıt ekonomisini önemli derecede artırır.



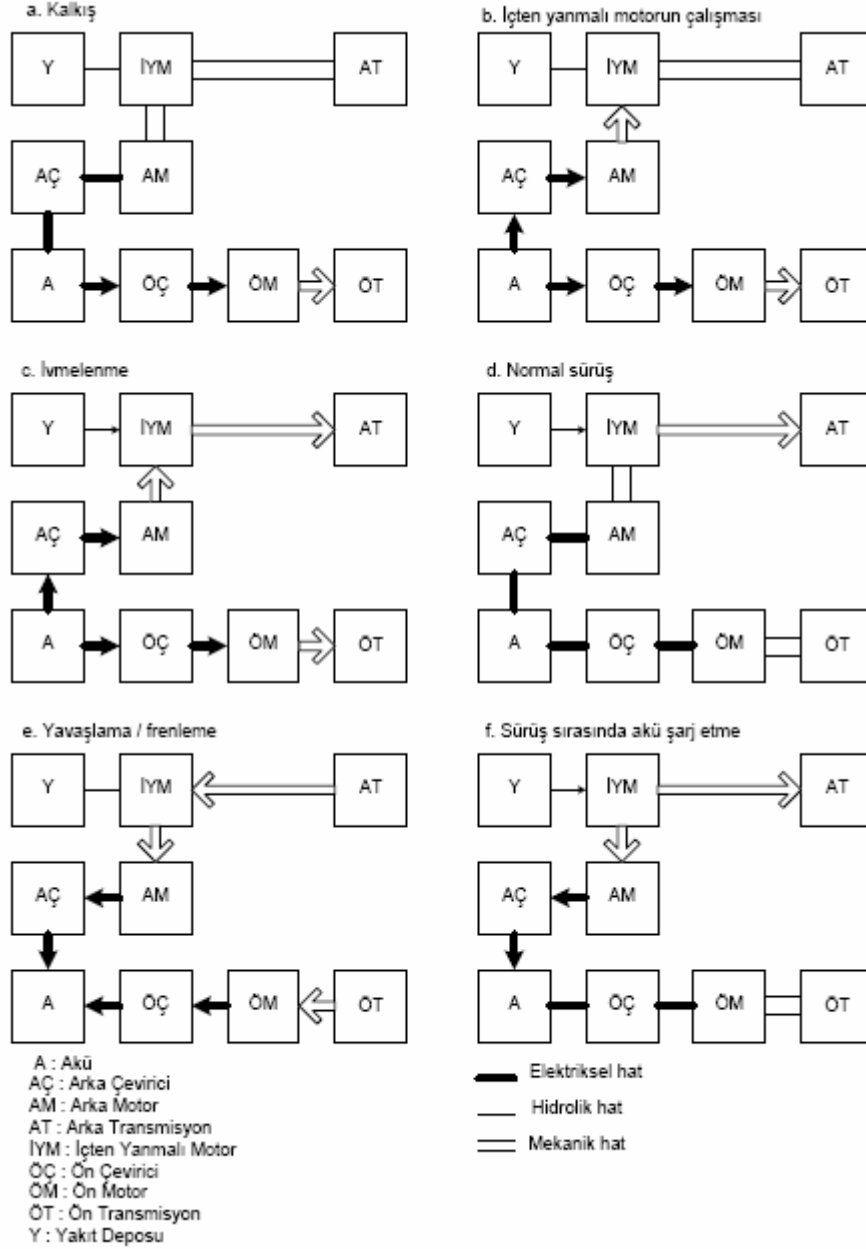
Şekil 5.6: Kompleks hibrit (ön hibrit, arka elektrikli) elektrikli araç çalışma modları [2].

Şekil 5.6'da, ön tekerleklerin hibrit bir sürüş sistemi ve arka tekerleklerin de bir elektrik motoru tarafından tahrik edildiği çift akslı bir kompleks hibrit sistem görülmektedir. Bu sistemde altı çalışma durumu vardır. Kalkış anında, akülerden çekilen enerji ile ön ve arka elektrik motorları, aracın ön ve arka akslarını ayrı ayrı tahrik ederken İYM kapalı durumdadır. İvmelenme sırasında, İYM ve ön elektrik motoru birlikte çalışarak ön aksı tahrik ederken, arka elektrik motoru da aynı zamanda arka aksı tahrik etmektedir. Bu çalışma durumunun üç tahrik elemanı (bir İYM ve iki elektrik motoru) kullanılarak eş zamanlı bir şekilde aracı tahrik ettiğine dikkat edilmelidir. Normal sürüş ve/veya akü şarjı sırasında, İYM'nin çıkış enerjisi bölünerek hem ön aksı tahrik eder, hem de elektrik motorunu (generatör olarak çalışan) tahrik ederek aküyü şarj eder. İYM, ön elektrik motoru ve ön aksı birbirine monte etmek için kullanılan mekanik bağlantı elemanı genellikle bir planet dişlidir.

Düşük yüklerde sürüş sırasında, akülerden çekilen enerjiyle sadece ön elektrik motoru çalıştırılarak ön aks tahrik edilirken, İYM ve arka elektrik motoru kapalı durumdadır. Frenleme ya da yavaşlama sırasında, ön ve arka elektrik motorları ikisi birden aynı anda generatör olarak çalışarak aküleri şarj ederler. Bu çift akslı sistemin kendine has bir özelliği, akslar arasındaki enerji dengeleme kapasitesidir.

Ön tekerleklerin tahrik edilmeden döndüğü durumlarda, ön elektrik motoru generatör olarak çalışarak, İYM'nin çıkış gücündeki değişimleri kullanır ve aküleri şarj eder. Bu güç farkı, daha sonra aküler üzerinden arka tekerlekleri tahrik ederek aksları dengelemek için kullanılır. Toyota Prius hibrit elektrikli aracının geliştirilmiş üst versiyonu, THS-C olarak adlandırdıkları bu enerji akış kontrol modelini kullanmaktadır. Şekil 5.7'de ön tekerleklerin bir elektrik motoru ve arka tekerleklerin de hibrit bir sürüş sistemi tarafından tahrik edildiği çift akslı başka bir kompleks hibrit sistem görülmektedir. Araç tahrik sisteminde altı çalışma durumu mevcuttur.

Kalkış anında akülerden çekilen enerji ile sadece ön elektrik motoru çalışarak aracın ön aksını tahrik ederken, İYM ve arka elektrik motoru kapalı durumdadır. Araç hareket ettikten sonra, akü aynı zamanda arka elektrik motoruna enerji ileterek, İYM'nin hızının artmasını çabuklaştırır ve böylece İYM çalışır.



Şekil 5.7: Kompleks hibrit (ön elektrikli, arka hibrit) elektrikli araç çalışma modları [2].

İvmelenme sırasında, ön elektrik motoru ön aksı tahrik ederken İYM ve arka elektrik motoru birlikte çalışarak arka aksı tahrik eder. Böylece, bu çalışma durumunda üç tahrik elemanı (bir İYM ve iki elektrik motoru) kullanılarak eş zamanlı bir şekilde araç tahrik edilir. Normal sürüş sırasında, İYM aracın arka aksını tahrik etmek için tek başına çalışır. Frenleme ya da yavaşlama sırasında, hem ön hem de arka elektrik motoru generatör olarak çalışarak aküleri şarj ederler. Sürüş sırasında akü şarjı için, İYM'nin enerji çıkışı bölünerek hem arka aksı tahrik eder hem de arka elektrik motorunu tahrik ederek onu generatör olarak çalıştırıp aküleri şarj eder.

6. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA (HEA) KULLANILAN KONVERTÖRLERİN GENELLEŞTİRİLMİŞ DURUM UZAY ORTALAMA YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

6.1 Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama (GSSA) Metodu

Dönüştürücü sistemler ve doğrusal olmayan yükler güç sistemlerinde günümüzde sıkça kullanılmaktadır. Etkili ve verimli güç dönüşümü elde etmek ve şebekeye iyi bir yük olabilmek için bu sistemlerin uygun bir şekilde tasarlanması gerekmektedir. Çünkü tasarım öncesi gerçekleştirilen analizler, sistem davranışı ve uygun tasarım hakkında temel fikir beyan etmektedir [25].

Güç elektroniği dönüştürücüleri; bobin, kondansatör, direnç, SCR, IGBT, MOSFET ve diyot gibi anahtarlama ve pasif elemanları bulunduran devrelerdir. Bu dönüştürücülerin anahtarlama yapıları sebebiyle dinamik davranışları doğrusal olmayan özellikler gösterir. Bu durumda benzetişim ve modelleme güç elektroniğinde analiz ve tasarım sürecinin en önemli unsurlarından biri haline gelmektedir. Bunlar sistemin anlaşılmasında tasarımcıya büyük faydalar sağlamaktadır. Fakat var olan modeller büyük işaret bozulmaların elde edilmesinde ve harmonik bileşenlerin kestiriminde kullanılamamaktadır. Fakat GSSA metodu ile bu sorunlar aşılmıştır [25,26].

Güç elektroniği dönüştürücülerin benzetişim ve analizleri MATLAB, PSPICE, SABER ve PSIM gibi yazılım paketleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Zaman tabanlı yazılımlarda gerçekleştirilen modellemede, sistemin benzetişim doğruluğu için doğrusal olmayan modeller kullanılır. Devre-tabanlı modelleme yapılan yazılımlarda, güç elektroniği anahtarlarının doğrusal olmayan modelleri kullanılır. Bunun neticesinde sistemde kullanılan bileşenlerin doğrusal olmayan özelliklerine, doğrusal olmayan anahtarlama özellikleri de eklenmektedir. Bu yüzden gerçek

elemanların doğrusal olmayan özellikleri, uzun benzetişim süresi, dönüşüm problemleri ve büyük program dosyaları gerektirmektedir [27-28]. Dönüştürücülerin anahtarlama modelleri ile yapılan geçici benzetişimler de benzer ihtiyaç ve problemleri beraberinde getirmektedir. Bu sistemlerin zaman tabanlı modellenmesinin yanı sıra durum uzay anahtarlama veya durum uzay ortalama yöntemleri kullanılarak ta modellenabilir. Bu metodlar daha hızlıdır ve büyük bilgisayar sınırlamaları gerektirmezler. Fakat bu metotlar büyük işaret analizlerinin gerçekleştirilememesi gibi dezavantajlara sahiptirler. Bu nedenle güç elektroniği sistemlerinin modellenmesinde geleneksel olarak ortalama yöntemler kullanılmaktadır. Bununla birlikte hızlı ve büyük işaret değişiklikleri ve devre parametrelerinin harmonik analizi bilindik durum uzay ortalama (SSA) yöntemi ile izlenemez. GSSA modeli kullanılarak sistemin büyük işaret modeli çıkartılmış ve tüm sistem parametrelerinin harmonik karakteristikleri elde edilmiştir. Bu metot Fourier dönüşümüne dayanmaktadır. Bu yolla sistem doğrusal hale getirilmektedir. Böylece sistemin durum denklemleri arasındaki ilişki doğrusal eşitliklerle ifade edilmektedir [29].

GSSA metodu kullanılarak geleneksel metotlara nazaran uzun işlem süresi, dönüşüm problemleri ve büyük program dosyaları gibi problemler ortadan kaldırılmıştır. Sistem parametreleri için tam ve hızlı bir yaklaşım elde edilmektedir. Ayrıca bu model geliştirilerek kontrol amacıyla ve kararlılık değerlendirilmesi için de kullanılabilir. Bu metot farklı topoloji ve kontrol teknikleri için de uygulanabilir. Son zamanlarda yapılan çalışmalarla GSSA metodu ve anahtarlama fonksiyon metodunun güç elektroniği devrelerinin modellenmesinde ve analizinde daha yetenekli oldukları kanıtlanmıştır [30].

GSSA periyodik olmayan sinyaller için Fourier transformundan çıkartılmıştır. Genelleştirilmiş durum uzay ortalama metodu, herhangi bir $x(t)$ dalga şekline $(t-T, T]$ sonlu zaman aralığında Fourier dönüşümünün sonlu katsayıları kullanılarak keyfi doğrulukla yaklaşılabilir prensibine dayanmaktadır. Böylelikle daha çok katsayı dikkate alınarak kestirimin duyarlılığı arttırılmıştır. Bir $x(t)$ dalga şeklinin, $(t-T, T]$ zaman aralığında Fourier dönüşümü aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [31-32].

$$x(t) = \sum_{k=-n}^n \langle x \rangle_k(t) e^{jk\omega t} \quad (6.1)$$

Burada;

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (6.2)$$

ve $\langle x \rangle_k$ zamana bağlı Fourier katsayısı olup aşağıda gösterildiği gibi ifade edilir.

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) e^{-jk\omega\tau} d\tau \quad (6.3)$$

Denklem (6.3)' te $\langle x \rangle_k$ gösterimi ortalama (averajlama) çalışmasını göstermek için kullanılmaktadır.

$$x(t) = \langle x \rangle_{-n}(t) \times e^{-jn\omega t} + \dots + \langle x \rangle_{-1}(t) \times e^{-j\omega t} + \langle x \rangle_1(t) \times e^{j\omega t} + \dots + \langle x \rangle_n(t) \times e^{jn\omega t} \quad (6.4)$$

Denklem (6.1)'de n'in değeri gerekli doğruluk derecesine bağlıdır. Eğer n sonsuza giderse, tahmini yaklaşım hatası sifıra gider. Eğer sadece k=0 terimini hesaba katarsak, aynı SSA metodunu hesaplamış oluruz. Fakat daha fazla terimi hesaba katarsak, daha fazla doğruluğa sahip olmuş oluruz. Eğer durum değişkeni sadece sinüse benzer tek bir salınıma sahip ise, k=-1, 1 terimlerini kullanılır. Bu metod birinci harmonik yaklaşım olarak adlandırılır. Eğer durum değişkenininin hem DA bileşeni hem de salınımı varsa, k=-1, 0, 1 terimleri kullanılır [32-36]. Bununla beraber hesaba katılan terimlerin çokluğu, doğruluğu daha fazla arttırır. Eğer n = 0 ise;

$$x(t) \cong \langle x \rangle_0(t) \quad (6.5)$$

$$\langle x \rangle_0(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) \times d\tau \quad (6.6)$$

sonuçları ile aynı durum uzay ortalama değeri hesaplanmış olur. Eğer n = 1 ise;

$$x(t) \cong \langle x \rangle_{-1}(t) \cdot e^{-j\omega t} + \langle x \rangle_0(t) + \langle x \rangle_1(t) \cdot e^{j\omega t} \quad (6.7)$$

$$\langle x \rangle_0(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^T x(\tau) \times d\tau \quad (6.8)$$

$$\langle x \rangle_{-1}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^T x(\tau) \cdot e^{j\omega\tau} d\tau \quad (6.9)$$

$$\langle x \rangle_1(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^T x(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (6.10)$$

denklemleri yardımıyla $x(t)$ dalga işaretinin birinci harmonik yaklaşım (First Harmonic Approximation) değeri hesaplanır.

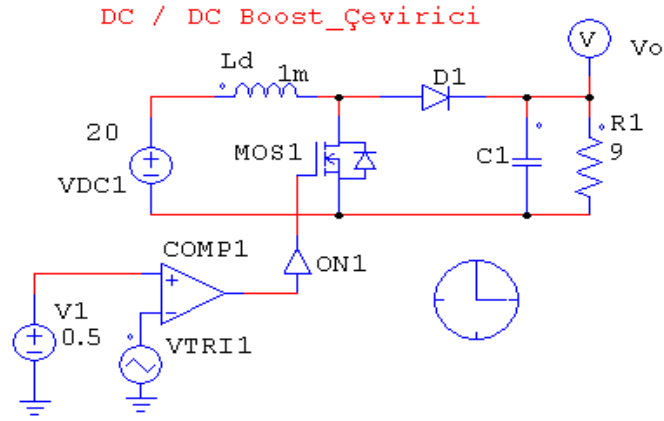
Her bir dönüştürücünün modellenmesinde T'nin seçimi çok önemlidir ve dikkatlice hesaba katılmalıdır. Örneğin kıyıcılarda (DA/DA dönüştürücü) anahtarlamaya periyodu iken eviricilerde (DA/AA inverter) çıkış geriliminin temel dalgasının periyodudur (Emadi, 2004). GSSA tekniğini uygulamak için gerekli olan Fourier transform özelliklerinden olan ve denklem (6.3)'teki Fourier katsayısının zamana karşı türevi ve değişkenlerin çarpımlarının dönüşümü aşağıda gösterilmektedir [37-39].

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle x \rangle_k(t) = -j\omega k \langle x \rangle_k(t) + \left\langle \frac{d}{dt} x \right\rangle_k(t) \quad (6.11)$$

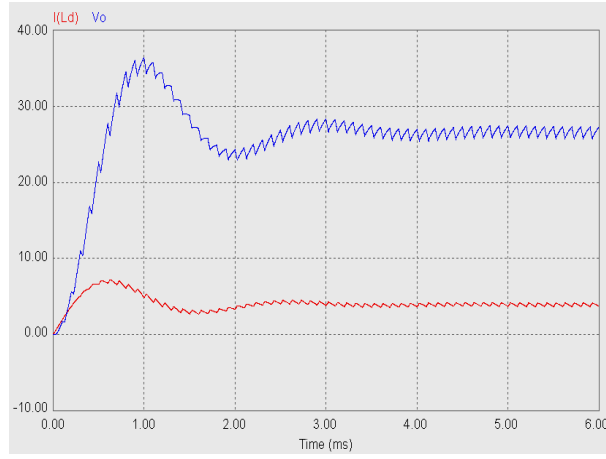
$$\langle x \cdot y \rangle = \sum_{i=-n}^n \langle x \rangle_i \cdot \langle y \rangle_{k-i} \quad (6.12)$$

6.2 Yükselten (Boost) DC/DC Dönüştürücünün GSSA Yöntemi İle Matematiksel Olarak Modellenmesi

HEA kullanılan yükseltici çevirici ortalaması giriş geriliminden daha yüksek olan çıkış gerilimi elde etmek için kullanılır. HEA'larda kullanılan yükselten dönüştürücünün PSIM simülasyon programından alınan değerler şekil 6.1 ve 6.2'te gösterilmiştir. Bundan sonra yapılan çalışmalarda, şekil 6.3'te gösterilen ve PSIM'deki devre ile aynı değerlere sahip yükselten dönüştürücü GSSA yöntemi ile matematiksel olarak modellenmiştir. Ayrıca GSSA tekniğinden çıkartılan sonuçlar PSIM ile karşılaştırılıp önerilen yöntemin doğruluğu ispatlanmıştır [40].

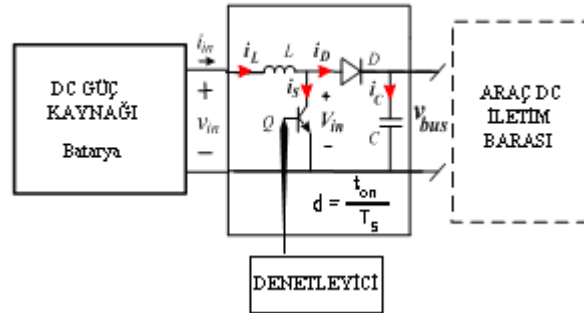


Şekil 6.1: PWM yükselten DC/DC dönüştürücü. ($V_{in}=20\text{ V}$, $R_o=9\ \Omega$, $L=1\text{ mH}$, $C=50\ \mu\text{F}$, $T_s=0.1\text{ ms}$)



Şekil 6.2: Psim programından elde edilen yükselten DC/DC dönüştürücünün akım(I_y)-gerilim(V_o) zaman eğrileri.

Genelleştirilmiş durum uzay ortalama yöntemini uygulamak için önce anahtarlama fonksiyonu $u(t)$ belirlenir.



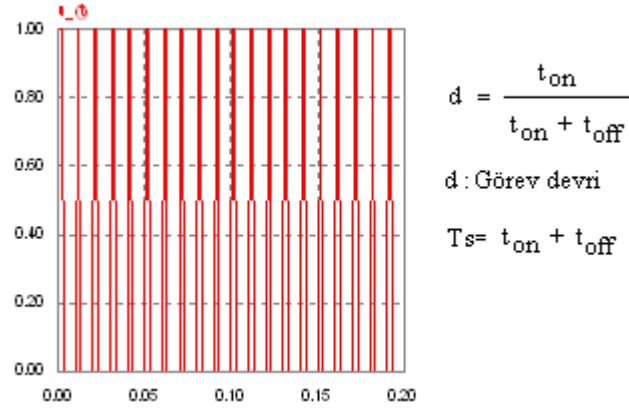
Şekil 6.3: HEA'ta kullanılan ve GSSA yöntemi ile modellenen yükselten dönüştürücü. ($V_{in}=20\text{ V}$, $R_o=9\ \Omega$, $L=1\text{ mH}$, $C=50\ \mu\text{F}$, $T_s=0.1\text{ ms}$)

Anahtarlama fonksiyonu denklem takımları (6.13, 6.14 ve 6.15) arasında ifade edilmiştir.

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT \\ 0, & dT < t < T \end{cases} \quad (6.13)$$

$$V_{in} = (1 - u(t)) \cdot v_o \quad (6.14)$$

$$i_D = (1 - u(t)) \cdot i_L \quad (6.15)$$



Şekil 6.4: Yükselten dönüştürücüde anahtarlama fonksiyonu u(t).

Sürekli iletim modunda çalışan yükselten DC/DC dönüştürücü devresinde; birleşik durum değişkenlerine (6.13-6.15)'teki anahtarlama denklem takımları uygulandığında;

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} [v_{in} - (1 - u(t)) \cdot v_o] \quad (6.16)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C} [(1 - u(t)) \cdot i_L - i_R] \quad (6.17)$$

$$i_{in} = i_L \quad (6.18)$$

durum uzay denklemleri elde edilir. Genelleştirilmiş durum uzay ortalama modelindeki denklem takımında; güncel durum uzay değişkenleri, devre durum değişkenlerinin (v_o ve i_L) Fourier katsayılarıdır. Bu sistemin durum değişkenlerinin Fourier katsayılarına birinci harmonik yaklaşım uygulandığında;

$$i_L(t) = \langle i_L \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle i_L \rangle_0 + \langle i_L \rangle_1 e^{j\omega t} \quad (6.19)$$

$$v_o(t) = \langle v_o \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle v_o \rangle_0 + \langle v_o \rangle_1 e^{j\omega t} \quad (6.20)$$

denklemleri elde edilir. Burada ω devrenin temel frekansdır. $i_L(t)$ ve $v_o(t)$ değişkenlerini bulabilmek için;

$$\langle i_L \rangle_1 = x_1 + jx_2 \quad (6.21)$$

$$\langle i_L \rangle_0 = x_5 \quad (6.22)$$

$$\langle v_o \rangle_1 = x_3 + jx_4 \quad (6.23)$$

$$\langle v_o \rangle_0 = x_6 \quad (6.24)$$

$$\langle i_L \rangle_{-1} = \langle i_L \rangle_1^* \quad (6.25)$$

$$\langle v_o \rangle_{-1} = \langle v_o \rangle_1^* \quad (6.26)$$

altı adet gerçek durum değişkenleri ($x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$) atanır. Burada (*) operatörü karmaşık bir sayının eşleniği anlamına gelmektedir. Atanan durum değişkenleri denklem (6.19) ve (6.20)'de yerlerine yazılırsa;

$$i_L(t) = x_5 + 2x_1 \cos \omega t - 2x_2 \sin \omega t \quad (6.27)$$

$$v_o(t) = x_6 + 2x_3 \cos \omega t - 2x_4 \sin \omega t \quad (6.28)$$

sırasıyla akım ve gerilim ifadeleri elde edilir. Anahtarlama fonksiyonu $u(t)$ 'nin Fourier katsayı (6.3) analizi yapıldığında;

$$\langle u(t) \rangle_0 = d \quad (6.29)$$

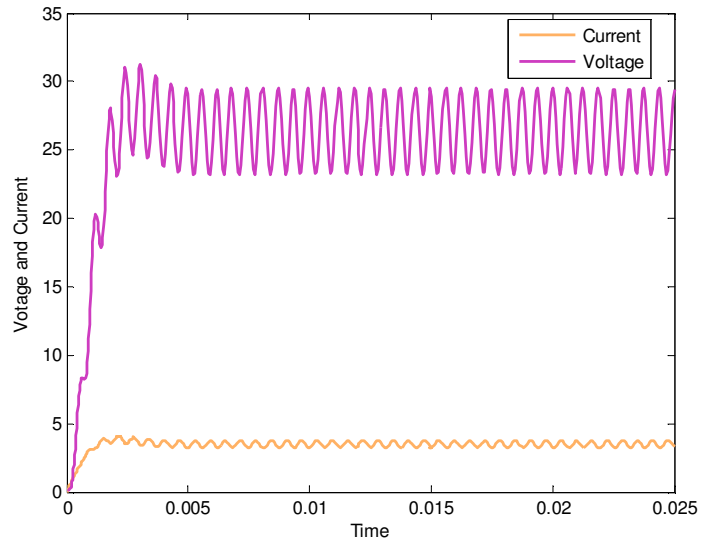
$$\langle u(t) \rangle_1 = \frac{\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \quad (6.30)$$

sonuçları elde edilir. Daha sonra devrenin (6.16-6.18)'deki durum değişkenlerine; Fourier dönüşüm katsayıları durum değişkenlerinin, zamana karşı türevleri ve çarpımlarının dönüşümleri olan (6.11-6.12) denklemleri uygulanmıştır. Aynı

zamanda anahtarlama fonksiyonu $u(t)$ 'nin Fourier katsayılarının yerlerine konulmasıyla yükselten DC/DC dönüştürücünün GSSA modeli çıkartılmıştır. Çıkartılan GSSA modelinde bilinmeyen değişkenleri bulmak için (6.31)'nolu matris kullanılmaktadır. Bu matris MATLAB gibi bir yazılım programında EK-A'da yazılan bir yazılım ile kolaylıkla çözülebilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega & -\frac{1-d}{L} & 0 & 0 & \frac{\sin 2\pi d}{2\pi L} \\ -\omega & 0 & 0 & -\frac{1-d}{L} & 0 & -\frac{\sin^2 \pi d}{\pi L} \\ \frac{1-d}{C} & 0 & -\frac{1}{RC} & \omega & -\frac{\sin 2\pi d}{2\pi C} & 0 \\ 0 & \frac{1-d}{C} & -\omega & -\frac{1}{RC} & \frac{\sin^2 \pi d}{\pi C} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sin 2\pi d}{\pi L} & -\frac{2 \sin^2 \pi d}{\pi L} & 0 & -\frac{1-d}{L} \\ -\frac{\sin 2\pi d}{\pi C} & \frac{2 \sin^2 \pi d}{\pi C} & 0 & 0 & \frac{1-d}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{V_m}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.31)$$

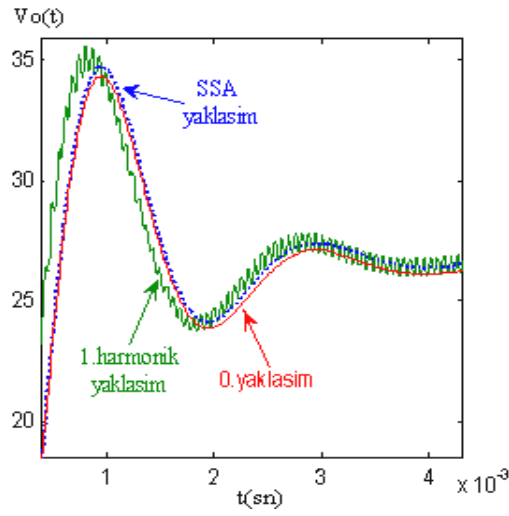
Denklem 6.31'deki matrisin çözümünden elde edilen altı adet gerçek durum değişkenleri olan x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve x_6 denklem (6.27) ve (6.28)'de yerlerine konularak devrenin akım-gerilim değerleri bulunur.



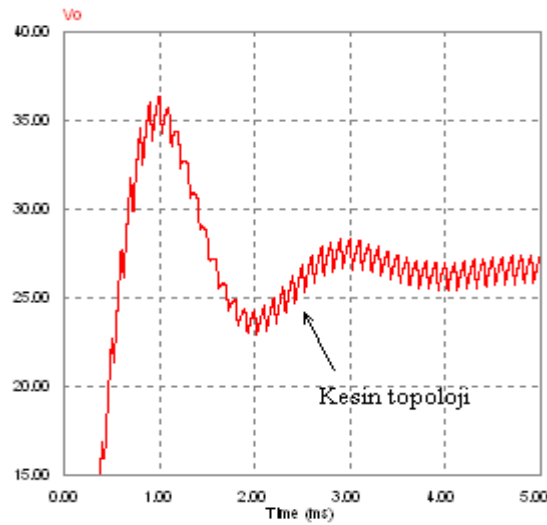
Şekil 6.5: GSSA yöntemi ile elde edilen 6.31 nolu matris denklemin Matlapta yazılan EK-A'daki çözümünden alınan devrenin akım gerilim sonuçları.

6.2.1 Yükselten Boost dönüştürücünün modellenmesinde PSIM ile GSSA'nın karşılaştırmalı analizi

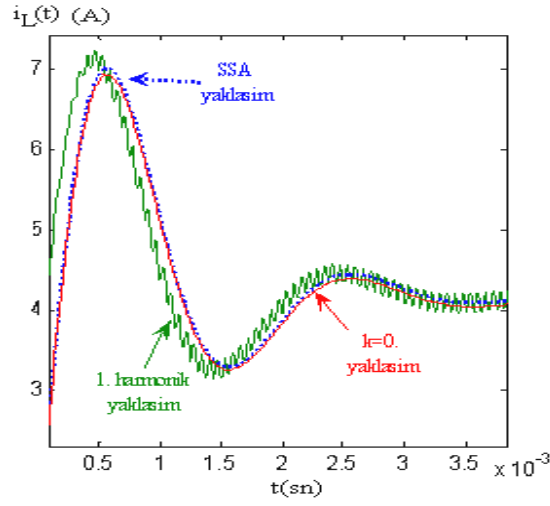
Yükselten DC/DC dönüştürücü için yapılan GSSA modelinin sonuçları, SSA modelden elde edilen benzetişim sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca GSSA yönteminin benzetişim sonuçlarının geçerliliğini göstermek amacıyla PSIM programında yapılan gerçek zaman benzetişim sonuçları ile karşılaştırarak analiz edilmiştir.



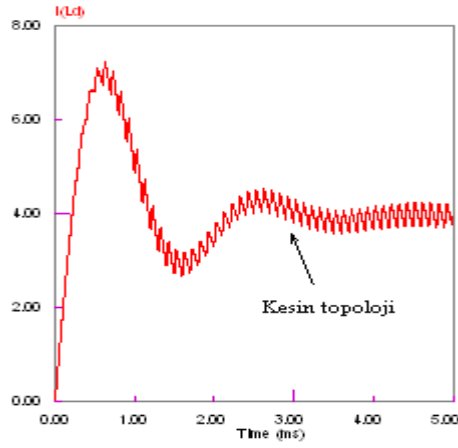
Şekil 6.6: Yükselten dönüştürücünün $d=0.25$ görev devri için çıkış gerilimi $v_o(t)$ 'nin GSSA ve SSA dalga şekilleri [2].



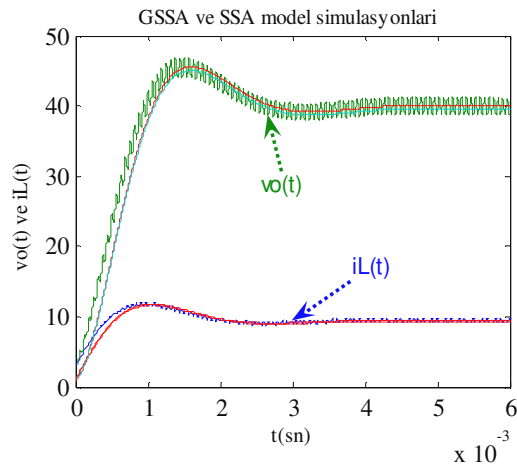
Şekil 6.7: Yükselten dönüştürücünün $d=0.25$ görev devri için PSIM programından alınan çıkış gerilimi $v_o(t)$ 'nin benzetişim sonuçları.



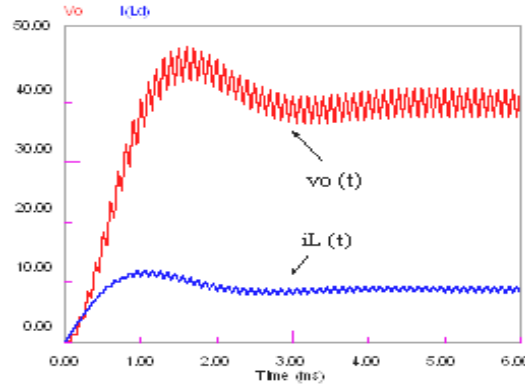
Şekil 6.8: Yükselten dönüştürücünün $d=0.25$ görev devri için akım $i_L(t)$ 'nin GSSA ve SSA dalga şekilleri.



Şekil 6.9: Yükselten dönüştürücünün $d=0.25$ görev devri için PSIM programından alınan akım $i_L(t)$ 'nin benzetişim sonuçları.



Şekil 6.10: Yükselten dönüştürücünün $d=0.5$ görev devri için akım $i_L(t)$ ve gerilim $v_o(t)$ 'nin GSSA ve SSA dalga şekilleri.

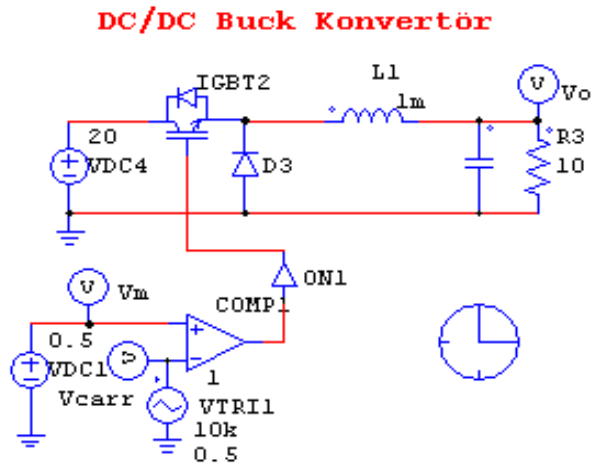


Şekil 6.11: Yükselten dönüştürücünün $d=0.5$ görev devri için PSIM programından alınan akım $i_L(t)$ ve gerilim $v_o(t)$ benzetişim sonuçları.

Yükselten dönüştürücünün farklı görev devri ($d=0.25$ ve 0.5) değerlerinde PSIM ve GSSA metoduyla elde edilen benzetişim sonuçları şekil 6.6–6.11 arasında sırasıyla gösterilmiştir. DC/DC dönüştürücüleri matematiksel olarak modellemede kullanılan durum uzay ortalama (SSA) modelinin yetersiz kaldığı şekillerden anlaşılmaktadır. Fakat GSSA modelin PSIM modeline ne kadar benzer olduğu görülmektedir. Ayrıca $k=0$. harmonik yaklaşım modelinin SSA modeliyle aynı sonuçları verdiği gözükmemektedir [2].

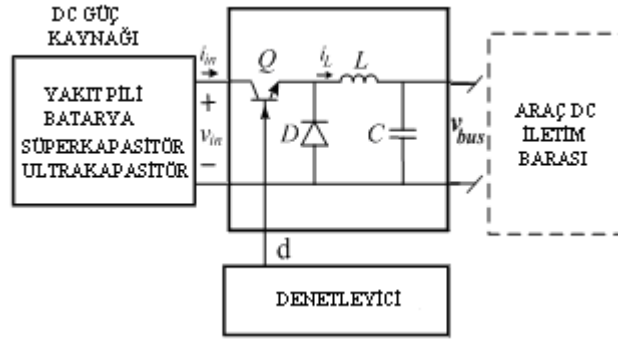
6.3 GSSA Metodunun Alçaltan (Buck) Dönüştürücülere Uygulanması

Bu bölümde GSSA metodunun bir DC/DC alçaltan buck dönüştürücüye uygulanmasına ve simülasyonlarına yer verilmiştir.



Şekil 6.12: PSIM programından alınan DC/DC PWM buck dönüştürücü ($v_{in}=20V$, $R_o=9\Omega$, $L=1mH$, $C=50\mu F$, $T_s=0.1ms$).

İsminden de anlaşılacağı üzere alçaltıcı çevirici DC giriş geriliminden daha düşük ortalama DC gerilim üretir. Şekil 6.12 temel DC/DC PWM alçaltıcı PSIM devre şeması ve şekil 6.13’de ise HEA’larda kullanılan buck dönüştürücü devre bağlantı şema örneği görülmektedir. Örnek sistemde; HEA’larda kullanılan DC/DC konvertör, yardımcı enerji kaynakları ile araç iletim barasına bağlanarak istenen gücü karşılamaktadır. DC/DC dönüştürücü, İYM’la veya tek başına gücü kontrol ünitesine iletmektedir (Şekil 6.13).



Şekil 6.13: HEA’ta kullanılan ve GSSA yöntemi ile modellenen alçaltan DC/DC boost dönüştürücü ($v_{in}=20\text{ V}$, $R_o=9\ \Omega$, $L=1\text{ mH}$, $C=50\ \mu\text{F}$, $T_s=0.1\text{ ms}$).

Şekil 6.13’te kullanılan dönüştürücünün; sürekli iletim modunda (CCM), T anahtarlama periyodu ve d görev devri ile çalışan bir PWM DC/DC buck dönüştürücü olduğu kabul edilmiştir [10]. Bu durumda genelleştirilmiş durum uzay ortalama metodunun uygulanması için, anahtarlama fonksiyonu $u(t)$ ve 1. harmonik yaklaşım uygulanmış anahtarlama denklemleri;

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (6.32)$$

$$v_{in}^g = v_{in} \cdot u(t) \quad (6.33)$$

$$\langle u(t) \rangle_0 = d \quad (6.34)$$

$$\langle u(t) \rangle_1 = \frac{j}{2\pi} (e^{-j2\pi d} - 1) \quad (6.35)$$

eşitlikleri elde edilir. Devrenin durum uzay denklemleri ise;

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} [v_{in} - v_0] \quad (6.36)$$

$$\frac{dv_0}{dt} = \frac{1}{C} [i_L - i_{out}] \quad (6.37)$$

Denklemleri ile çıkartılmıştır. Anahtarlama denklemleri devre durum uzay eşitliklerinin iki takımına uygulanır. Böylece; sürekli iletim çalışma modunda devre durum değişken eşitliklerinin birleşik seti elde edilir (6.38) – (6.40).

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} [v_{in} u(t) - v_0] \quad (6.38)$$

$$\frac{dv_0}{dt} = \frac{1}{C} \left[i_L - \frac{v_0}{R} \right] \quad (6.39)$$

$$i_{in} = i_L u(t) \quad (6.40)$$

Bununla birlikte, genelleştirilmiş durum uzay ortalama modelinin (6.38)-(6.40) denklem takımında; güncel durum uzay değişkenleri, devre durum değişkenlerinin ($i_L(t)$ ve $v_0(t)$) Fourier katsayılarıdır. $i_L(t)$ ve $v_0(t)$ değişkenlerini bulabilmek için birinci harmonik yaklaşımı kullanılarak, Fourier katsayılarına altı gerçek durum değişkeni ($x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$) atanır (6.41)-(6.46).

$$\langle i_L \rangle_1 = x_1 + jx_2 \quad (6.41)$$

$$\langle i_L \rangle_0 = x_5 \quad (6.42)$$

$$\langle v_0 \rangle_1 = x_3 + jx_4 \quad (6.43)$$

$$\langle v_0 \rangle_0 = x_6 \quad (6.44)$$

i_L ve v_0 gerçek olduğu için;

$$\langle i_L \rangle_{-1} = \langle i_L \rangle_1^* \quad (6.45)$$

$$\langle v_0 \rangle_{-1} = \langle v_0 \rangle_1^* \quad (6.46)$$

Burada (*) operatörü kompleks bir sayının konjügesi anlamına gelmektedir. Bu eşitliklerden devre durum değişkenleri hesaplanırsa;

$$i_L(t) = x_5 + 2x_1 \cos \omega t - 2x_2 \sin \omega t \quad (6.47)$$

$$v_0(t) = x_6 + 2x_3 \cos \omega t - 2x_4 \sin \omega t \quad (6.48)$$

elde edilir [10]. (6.38)-(6.40) denklem takımında Fourier katsayılarının zamana göre türevinin alınması, komütasyon fonksiyonu $u(t)$ 'nin ve bilinmeyen durum değişkenleri Fourier katsayılarında yerine koyulmasıyla;

$$\dot{x}_5 = \frac{1}{L} [d.v_{in} - x_6] \quad (6.49)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{C} \left[x_5 - \frac{x_6}{R} \right] \quad (6.50)$$

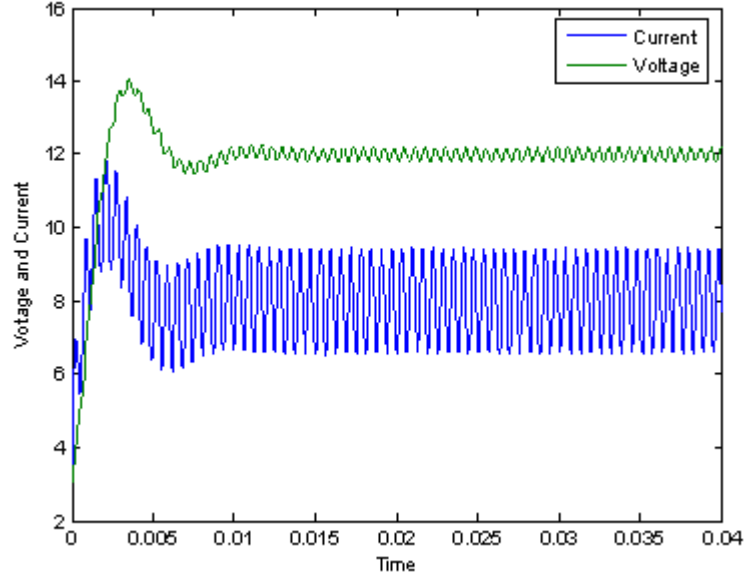
$$\dot{x}_1 + j\dot{x}_2 = -j\omega(x_1 + jx_2) + \frac{1}{L} \left[\frac{v_{in}}{2\pi} (\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)) - (x_3 + jx_4) \right] \quad (6.51)$$

$$\dot{x}_3 + j\dot{x}_4 = -j\omega(x_3 + jx_4) + \frac{1}{C} \left[(x_1 + jx_2) - \frac{(x_3 + jx_4)}{R} \right] \quad (6.52)$$

sonuçları bulunur. Bu sonuçlardan, bilinmeyen durum değişkenlerini bulmak için (6.53)'teki matris formundan faydalanılmıştır. Bu matris buck dönüştürücünün genelleştirilmiş durum uzay ortalama modelini göstermektedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega & -\frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & 0 & 0 & -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & -\frac{1}{RC} & \omega & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & -\omega & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{in}}{2\pi} \sin 2\pi d \\ -\frac{V_{in}}{2\pi} (1 - \cos 2\pi d) \\ 0 \\ 0 \\ \frac{d}{L} V_{in} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.53)$$

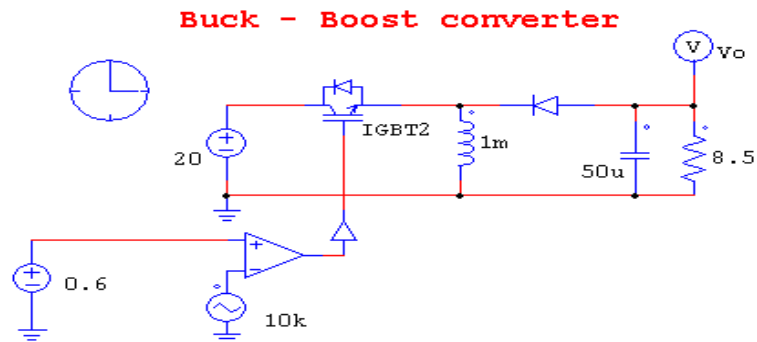
Çıkartılan (6.53) matris denklemi Matlab' ta yazılan EK-B'deki program yardımıyla çözümlenmiştir. GSSA çözümünden elde edilen x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve x_6 durum değişkenleri denklem 6.47 ve 6.48 de yerlerine konulduğunda $i_L(t)$ ve $v_o(t)$ bulunmuş ve zamana bağlı değişimleri şekil 6.14'de gösterilmiştir.



Şekil 6.14: GSSA yöntemi ile elde edilen (6.53)'teki matris denkleminin Matlab programı ile EK-B'deki çözümünden elde edilen akım $i_L(t)$ ve gerilim $v_o(t)$ sonuçları.

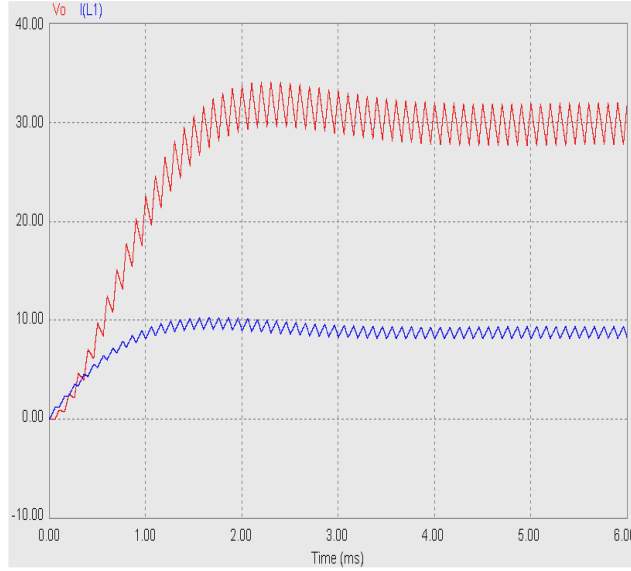
6.4 Alçaltan-Yükselten (Buck-Boost) DC/DC Dönüştürücünün GSSA İle Matematiksel Olarak Modellenmesi

Bu bölümde GSSA metodunun bir DC/DC alçaltan-yükselten dönüştürücüye uygulanmasına ve simülasyonlarına yer verilmiştir.

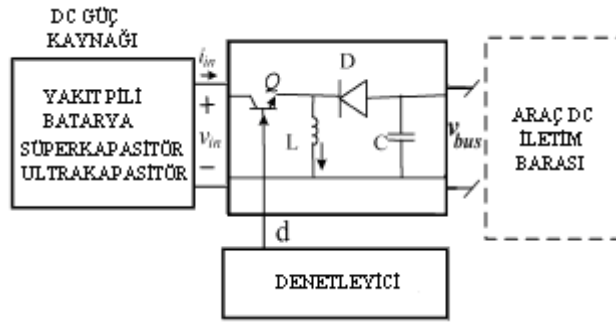


Şekil 6.15: PSIM programından alınan DC/DC buck-boost dönüştürücü devre şeması.

İsminden de anlaşılacağı üzere alçaltıcı-yükseltici çevirici DC giriş geriliminden daha düşük ve yüksek ortalama DC gerilim üretir. Şekil 6.15'te temel DC/DC PWM alçaltıcı-yükseltici PSIM devre şeması alınan sonuçlar görülmektedir (Şekil 6.16).



Şekil 6.16: PSIM programından elde edilen Buck-Boost DC/DC dönüştürücünün akım $i_L(t)$ – gerilim $v_o(t)$ zaman eğrileri.



Şekil 6.17: HEA'ta kullanılan ve GSSA yöntemi ile modellenen DC/DC buck-boost dönüştürücü ($v_{in}=20\text{ V}$, $R_o=8,5\ \Omega$, $L=1\text{ mH}$, $C=50\ \mu\text{F}$, $T_s=0.1\text{ ms}$).

Şekil 6.17'de kullanılan dönüştürücünün; CCM'ta, T anahtarlama periyodu ve d görev devri ile çalışan bir PWM DC/DC buck-boost dönüştürücü olduğu kabul edilmiştir [10]. Bu durumda genelleştirilmiş durum uzay ortalama metodunun uygulanması için, anahtarlama fonksiyonu $u(t)$ ve birinci harmonik yaklaşım uygulanmış anahtarlama denklemleri;

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dTs \\ 0, & dTs < t < Ts \end{cases} \quad (6.54)$$

$$\langle u(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T u(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} \cdot d(\tau) \quad (6.55)$$

$$\langle u(t) \rangle_0 = d \quad (6.56)$$

$$\langle u(t) \rangle_1 = \frac{\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \quad (6.57)$$

çıkartılır. Devrenin durum uzay denklemleri ;

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} [v_{in} \cdot u(t) - (1 - u(t)) \cdot v_0] \quad (6.58)$$

$$\frac{dv_0}{dt} = \frac{1}{C} \left[(1 - u(t)) \cdot i_L - \frac{v_0}{R} \right] \quad (6.59)$$

ile ifade edilir. $i_L(t)$ ve $v_0(t)$ değişkenlerini bulabilmek için birinci harmonik yaklaşımı kullanılarak, Fourier katsayılarına altı gerçek durum değişkeni ($x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$) atanır (6.60)-(6.65).

$$\langle i_L \rangle_1 = x_1 + jx_2 \quad (6.60)$$

$$\langle i_L \rangle_0 = x_5 \quad (6.61)$$

$$\langle v_0 \rangle_1 = x_3 + jx_4 \quad (6.62)$$

$$\langle v_0 \rangle_0 = x_6 \quad (6.63)$$

i_L ve v_0 gerçek olduğu için;

$$\langle i_L \rangle_{-1} = \langle i_L \rangle_1^* = x_1 - jx_2 \quad (6.64)$$

$$\langle v_0 \rangle_{-1} = \langle v_0 \rangle_1^* = x_3 - jx_4 \quad (6.65)$$

Devrenin durum uzay denklemlerine GSSA yönteminin özelliklerinden olan birinci harmonik yaklaşım;

$$\frac{d}{dt}\langle i_L \rangle_1 = -j\omega\langle i_L \rangle_1 + \frac{1}{L}[\langle v_{in}.u(t) \rangle_1 - \langle v_0 \rangle_1 + \langle v_0.u(t) \rangle_1] \quad (6.66)$$

$$\frac{d}{dt}\langle v_0 \rangle_1 = -j\omega\langle v_0 \rangle_1 + \frac{1}{C}\left[\langle i_L \rangle_1 - \langle i_L.u(t) \rangle_1 - \left\langle \frac{v_0}{R} \right\rangle_1\right] \quad (6.67)$$

ve ortalama değer,

$$\frac{d}{dt}\langle i_L \rangle_0 = \frac{1}{L}[\langle v_{in}.u(t) \rangle_0 - \langle v_0 \rangle_0 + \langle v_0.u(t) \rangle_0] \quad (6.68)$$

$$\frac{d}{dt}\langle v_0 \rangle_0 = \frac{1}{C}\left[\langle i_L \rangle_0 - \langle i_L.u(t) \rangle_0 - \left\langle \frac{v_0}{R} \right\rangle_0\right] \quad (6.69)$$

uygulandığında (6.66–6.69) denklemleri elde edilir. Burada bulunması gereken değerler $\langle v_{in}.u(t) \rangle_1$, $\langle v_0.u(t) \rangle_1$, $\langle i_L.u(t) \rangle_1$, $\langle v_{in}.u(t) \rangle_0$, $\langle v_0.u(t) \rangle_0$ ve $\langle i_L.u(t) \rangle_0$ değerleridir. Bunlara da GSSA yöntem hesaplamalarından olan çarpımlarının donüşümü (6.12) uygulandığında;

$$\langle v_{in}.u(t) \rangle_1 = v_{in} \left(\frac{\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \right) \quad (6.70)$$

$$\langle v_0.u(t) \rangle_1 = x_6 \cdot \left(\frac{\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \right) + (x_3 + jx_4).d \quad (6.71)$$

$$\langle i_L.u(t) \rangle_1 = x_5 \cdot \left(\frac{\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \right) + (x_1 + jx_2).d \quad (6.72)$$

$$\langle v_{in}.u(t) \rangle_0 = v_{in}.d \quad (6.73)$$

$$\begin{aligned} \langle v_0.u(t) \rangle_0 &= (x_3 - jx_4) \cdot \left(\frac{\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \right) + x_6.d + \\ &+ (x_3 + jx_4) \cdot \left(\frac{\sin 2\pi d - j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \right) \end{aligned} \quad (6.74)$$

$$\begin{aligned} \langle i_L.u(t) \rangle_0 &= (x_1 - jx_2) \cdot \left(\frac{\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \right) + x_5.d + \\ &+ (x_1 + jx_2) \cdot \left(\frac{\sin 2\pi d - j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \right) \end{aligned} \quad (6.75)$$

sonuçları elde edilir. Bu bulunan sonuçlar birinci harmonik ve ortalama değer denklemlerinde (6.66–6.69) yerlerine konulduğunda;

$$\dot{x}_1 = \omega x_2 + \frac{v_{in} \cdot \sin 2\pi d}{2\pi L} - \frac{1}{L} x_3 + \frac{\sin 2\pi d}{2\pi L} x_6 + \frac{d}{L} x_3 \quad (6.76)$$

$$\dot{x}_2 = -\omega x_1 + \frac{v_{in} \cdot (\cos 2\pi d - 1)}{2\pi L} - \frac{1}{L} x_4 + \frac{(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi L} x_6 + \frac{d}{L} x_4 \quad (6.77)$$

$$\dot{x}_3 = \omega x_4 + \frac{1}{C} x_1 - \frac{\sin 2\pi d}{2\pi C} x_5 - \frac{d}{C} x_1 - \frac{1}{RC} x_3 \quad (6.78)$$

$$\dot{x}_4 = -\omega x_3 + \frac{1}{C} x_2 - \frac{(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi C} x_5 - \frac{d}{C} x_2 - \frac{1}{RC} x_4 \quad (6.79)$$

$$\dot{x}_5 = \frac{d}{L} v_{in} - \frac{1}{L} x_6 + \frac{\sin 2\pi d}{\pi L} x_3 + \frac{(\cos 2\pi d - 1)}{\pi L} x_4 + \frac{d}{L} x_6 \quad (6.80)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{C} x_5 - \frac{\sin 2\pi d}{\pi C} x_1 - \frac{(\cos 2\pi d - 1)}{\pi C} x_2 - \frac{d}{C} x_5 - \frac{1}{RC} x_6 \quad (6.81)$$

bilinmeyen durum değişkenleri değerleri bulur.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega & \frac{d-1}{L} & 0 & 0 & \frac{\sin 2\pi d}{2\pi L} \\ -\omega & 0 & 0 & \frac{d-1}{L} & 0 & \frac{(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi L} \\ -\frac{1-d}{C} & 0 & -\frac{1}{RC} & \omega & -\frac{\sin 2\pi d}{2\pi C} & 0 \\ 0 & -\frac{1-d}{C} & -\omega & -\frac{1}{RC} & -\frac{(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi C} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sin 2\pi d}{\pi L} & \frac{(\cos 2\pi d - 1)}{\pi L} & 0 & \frac{1-d}{L} \\ \frac{\sin 2\pi d}{\pi C} & -\frac{(\cos 2\pi d - 1)}{\pi C} & 0 & 0 & -\frac{1-d}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_{in} \sin 2\pi d}{2\pi L} \\ \frac{v_{in} (\cos 2\pi d - 1)}{2\pi L} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{d}{L} v_{in} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.82)$$

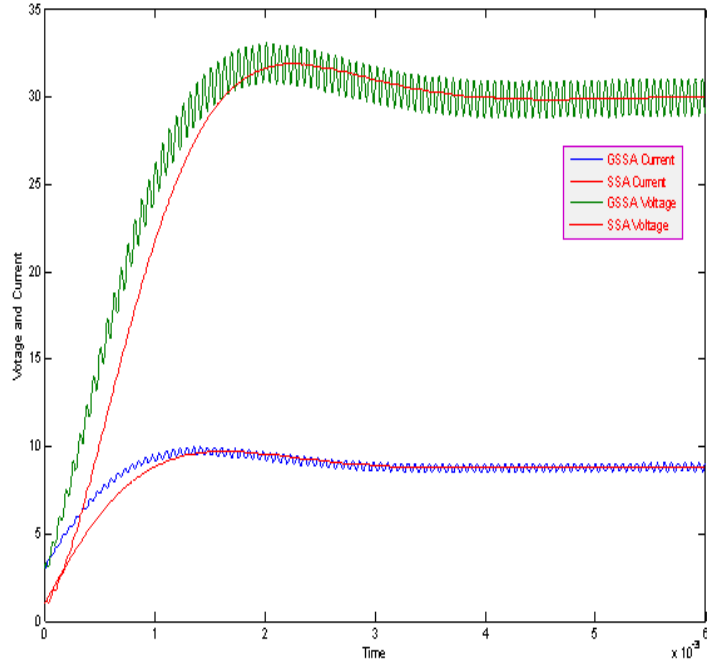
Bilinmeyen durum değişkenlerini bulmak için (6.82)'deki matris formu oluşturulmuştur. Bu matris buck-boost dönüştürücünün GSSA modelini göstermektedir. Oluşturulan matris denklemi (6.82) Matlab' ta yazılan EK-C'deki program yardımıyla durum değişkenleri hesaplanmıştır. GSSA çözümünden elde edilen x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve x_6 durum değişkenleri denklem 6.85 ve 6.86 da yerlerine konulduğunda akım $i_L(t)$ ve gerilim $v_0(t)$ değerleri hesaplanarak zamana bağlı değişimleri şekil 6.18'de gösterilmiştir.

$$i_L(t) = \langle i_L \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle i_L \rangle_0 + \langle i_L \rangle_1 e^{j\omega t} \quad (6.83)$$

$$v_0(t) = \langle v_0 \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle v_0 \rangle_0 + \langle v_0 \rangle_1 e^{j\omega t} \quad (6.84)$$

$$i_L(t) = x_5 + 2x_1 \cos \omega t - 2x_2 \sin \omega t \quad (6.85)$$

$$v_0(t) = x_6 + 2x_3 \cos \omega t - 2x_4 \sin \omega t \quad (6.86)$$



Şekil 6.18: GSSA yöntemi ile elde edilen (6.82)'teki matris denkleminin Matlab programı (EK-C) ile çözümünden elde edilen akım $i_L(t)$ ve gerilim $v_0(t)$ sonuçları.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, hibrit elektrikli araçların geçmişten günümüze kadar olan gelişmeleri incelenmiş ve bu araçların özelliklerinden bahsedilmiştir. Ayrıca HEA'larda kullanılan konvertörlerin kullanım amaçlarından ve yapılarından bahsedilmiştir. PSIM benzetişim programı ile yapılan gerçek zaman simülasyonu, durum uzay ortalama (SSA) modeli ve geliştirilmiş durum uzay ortalama (GSSA) metodu ile yapılan DC/DC boost dönüştürücü benzetişim sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda, GSSA yönteminin temel DC/DC dönüştürücülere en son uygulanabilir metod olduğu kanıtlanmıştır. Sonuçlardan da görüleceği üzere GSSA yöntemine k 'nın diğer harmonik değerleri de hesaba katılırsa kesin topoloji (gerçek-zaman) sonuçlarına daha yaklaşılabileceği görülmektedir.

Güç elektroniği dönüştürücüleri; bobin, kondansatör, direnç, tristör, IGBT, mosfet ve diyot gibi anahtarlama ve pasif elemanları bulunduran devrelerdir. Bu dönüştürücülerin anahtarlama yapıları sebebiyle dinamik davranışları doğrusal olmayan özellikler gösterir. Bu durumda benzetişim ve modelleme güç elektroniğinde analiz ve tasarım sürecinin en önemli unsurlarından biri haline gelmektedir. Bunlar sistemin anlaşılmasında tasarımcıya büyük faydalar sağlamaktadır. Fakat var olan modeller büyük işaret bozulmaların elde edilmesinde ve harmonik bileşenlerin kestiriminde kullanılamamaktadır. Fakat GSSA metodu ile bu sorunlar aşılmıştır. GSSA metodu kullanılarak;

- Durum denklemleri arasındaki ilişki doğrusal eşitliklerle ifade edilmektedir.
- Tüm sistem parametrelerin harmonik karakteristikleri elde edilmiştir.
- Sistemin büyük işaret modeli çıkartılmıştır.
- Gerçek anahtar veya anahtarın yaklaşık modeline bile ihtiyaç yoktur.
- Simülasyon anında uzun işlem süresi, dönüşüm problemleri ve büyük program dosyaları gibi sorunlar ortadan kaldırılmıştır.
- Sistem parametreleri için tam ve hızlı bir yaklaşım elde edilmektedir.

Yapılan tezin amacı ise;

- Sürücülü kontrol sistemleri ve doğrusal olmayan yükler güç sistemlerinde günümüzde sıkça kullanılmaktadır.
- Etkili ve verimli güç dönüşümü elde etmek ve şebekeye iyi bir yük olabilmek için bu sistemlerin uygun bir şekilde tasarlanması gerekmektedir.
- Tasarım öncesi gerçekleştirilen analizler, sistem davranışı ve uygun tasarım hakkında temel fikir beyan etmektedir.
- Güç elektroniği dönüştürücülerin benzetim ve analizleri MATLAB, PSPICE, SABER ve PSIM gibi yazılım paketleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir.
- Zaman tabanlı yazılımlarda gerçekleştirilen modellemede, sistemin benzetim doğruluğu için doğrusal olmayan modeller kullanılır.
- Bunun neticesinde sistemde kullanılan bileşenlerin doğrusal olmayan özelliklerine, doğrusal olmayan anahtarlama özellikleri de eklenmektedir.
- Bu yüzden gerçek elemanların doğrusal olmayan özellikleri, uzun benzetim süresi, dönüşüm problemleri ve büyük program dosyaları gerektirmektedir.
- Dönüştürücülerin anahtarlama modelleri ile yapılan geçici benzetimler de benzer ihtiyaç ve problemleri beraberinde getirmektedir.
- Bu sistemlerin zaman tabanlı modellenmesinin yanı sıra durum uzay anahtarlama veya durum uzay ortalama yöntemleri kullanılarak ta modellenebilir.
- Bu metodlar daha hızlıdır ve büyük bilgisayar sınırlamaları gerektirmezler.
- Fakat bu metodlar büyük işaret analizlerinin gerçekleştirilememesi gibi dezavantajlara sahiptirler.
- GSSA modeli kullanılarak sistemin büyük işaret modeli çıkartılmış ve tüm sistem parametrelerin harmonik karakteristikleri elde edilmiştir.
- Bu metod Fourier dönüşümüne dayanmaktadır. Bu yolla sistem doğrusal hale getirilmektedir.
- Böylece sistemin durum denklemleri arasındaki ilişki doğrusal eşitliklerle ifade edilmektedir.
- Gerçek anahtar veya anahtarın yaklaşık modeline bile ihtiyaç yoktur.

- GSSA metodu kullanılarak anahtar modelinin hesaba katılmaması geleneksel metotlara nazaran uzun işlem süresi, dönüşüm problemleri ve büyük program dosyaları gibi problemler ortadan kaldırılmıştır.
- Sistem parametreleri için tam ve hızlı bir yaklaşım elde edilmektedir.
- Ayrıca bu model geliştirilerek kontrol amacıyla ve kararlılık değerlendirilmesi için de kullanılmaktadır.
- Bu metot farklı topoloji ve kontrol teknikleri için de uygulanabilir.
- Son zamanlarda yapılan çalışmalarla GSSA metodunun güç elektroniği devrelerinin modellenmesinde ve analizinde daha yetenekli olduğu kanıtlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Tuncay R. N., Üstün Ö., “Otomotiv Elektroniğindeki Gelişmeler”, *IX. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu*, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, İstanbul, 27-28 Mayıs (2005).
- [2] Ünlü N., Karahan Ş., Tür O., Uçarol H., Özsu E., Yazar A., Akgün F., Tırıs M., “Elektrikli Araçlar”, *TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü*, Gebze-Kocaeli, (2003).
- [3] <http://www.ele-drive.com/>., “What are EVs?”, 2nd European Ele-Drive Transportation., 30th May - 1st June ., (2007)., (**Ziyaret tarihi: 10 Mayıs 2007**).
- [4] <http://www.howstuffworks.com/>., How Electric Cars Work?., (2002)., (**Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2007**).
- [5] Çitler, M., Varhan, F.,C., “HEV (Hybrid Electric Vehicle)”, Mezuniyet Tezi, *Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi*, Ankara, (2002).
- [6] Brown, D.R., “Hybrid Electric Vehicles”, *Mobile Sources Technical Review Subcommittee*, Ford Motor Company, February 12, (2003).
- [7] <http://www.volvo.com/> ., (**Ziyaret tarihi: 8 Mayıs 2007**).
- [8] Emadi A., “Modelling and Analysis of Multi-Converter DC Power Electronic Systems Using the Generalized State Space Averaging Method”, *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, 51, 661-668, (2004).
- [9] Sanders S., R., Noworolski J. M., Liu X., Z., Verghese G. C., “Generalized Averaging Method for Power Conversion Circuits”, *IEEE Trans. On Power Electronics*, 6, 251-259, (1991).
- [10] Thounthong, P., Rael, S., Davat, B., “Fuel Cell and Supercapacitors for Automotive Hybrid Electrical System”, *Ecti Transactions On Electrical Eng. Electronics and Communications*, 3, 20–30, (2005).
- [11] Selüloz, B., “Yakıt Pilleri ve Otomotiv ‘de kullanımı”, Bitirme Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi*, Kocaeli, 1-5, (2000).
- [12] Baş, M. E., “Katı oksit yakıt pilleri.”, BitirmeTezi, *Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü*, Bursa, (2005).

- [13] Williamson, S.S., Lukic, S.M., Emadi, A., “Comprehensive Drive Train Efficiency Analysis of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Based on Motor-Controller Efficiency Modeling”, *IEEE Transactions On Power Electronics*, 21, May, (2006).
- [14] Zhu, J.G., “Super Capacitors”, *48550 Electrical Energy Technology*, Faculty of Engineering University of Technology, Sydney, (2005).
- [15] Ryssel, H., Les_Flyer_2005gb., Power Electronic [online], Institute of Integrated Systems and Device Tecnology, <http://www.iisb.fraunhofer.de> (**Ziyaret tarihi: 15 Nisan 2007**).
- [16] Lovatt, H.C., Dunlop, J.B., “Power Transfer in Hybrid Electric Vehicles With Multiple Energy Storage Units”, *CSIRO Telecommunication & Industrial Physics*, Australia. (2003).
- [17] Emadi, A., Khaligh, Alireza., Rivetta C.H., Williamson G.A., “Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Automotive Systems: Definition, Modeling, Stability, and Control of Power Electronic Converters and Motor Drives”, *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 55, July, (2006).
- [18] Lemofouet, S., Rufer, A., “Hybrid Energy Storage System based on Compressed Air and SuperCapacitors with MEPT (Maximum Efficiency oint Tracking)”, *The 2005 International Power Elektronik Conference*, 461-468, (2005).
- [19] Mahdavi, J., Nasiri, R.M., Agah, A., Emadi, A., “Application of Neural Networks and State-Space Averaging to DC/DC PWM Converters in Sliding-Mode Operation”, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 10, February, (2005).
- [20] Li, R., Pottharst, A., Fröhleke, N., Böcker J., Witting, K., Dellnitz M., Znamenshchykov, O., Feldmann R., “*Design and Implementation of a Hybrid Energy Supply System for Railway Vehicles*”,.
- [21] Toyota Tecncal Training , Toyota hybrid system operation Section 2 course 071 <http://www.Toyoto Hybrid System.com.>, (**Ziyaret tarihi: 7 Mayıs 2007**).
- [22] Onoda, S., Emadi, A., “PSIM-Based Modeling of Automotive Power Systems: Conventional, Electric, and Hybrid Electric Vehicles”, *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 53, 390-400, March , (2004).
- [23] Jinrui, N., Fengchun, S., Qinglian, R., “A Study of Energy Management System of Electric Vehicles”, (2003).
- [24] Caliskan, V.A., Verghese, G.C., Stankovi´c, A.M., “Multifrequency Averaging of DC/DC Converters”, *IEEE Transactions On Power Electronics*, 14, 124-133, (1999).

- [25] Ergün Amaç A., “Yeni Aktif Filtre Topolojileri Kullanarak Akım ve Gerilim Harmoniklerinin Azaltılması ve KGS sistemlerine Uygulanması”, Doktora Tezi, *KOÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2003).
- [26] Tuna, M., Amaç Ergün, A., “Gerilim Kaynaklı Paralel Aktif Filtrenin Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama (GSSA) Metodu ile Modellenmesi”, *EVK’2007 - II. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, Kocaeli, 67-71, 17-18 Mayıs (2007).
- [27] Tuna, M., Amaç Ergün, A., Ak, M., “Hibrit Elektrikli Araçlarda Kullanılan Yükselten DC/DC Dönüştürücünün Karşılaştırmalı Analizi”, *UMES’07 - Ulusal Teknik Eğitim Mühendislik ve Eğitim Bilimleri Genç Araştırmacılar sempozyumu*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 212-215, 20-22 Haziran (2007).
- [28] Altınay M., Ergün Amaç, A., Karakaş E., “İdeal Bir DC/DC Buck Dönüştürücünün Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama Metodu İle Modellenmesi.”, *EVK’2005 - I.Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, Kocaeli, 17-18 Mayıs, (2005).
- [29] Altınay, M., “Buck Tipi Darbe Genişlik Ayarlı (DGA) Doğrultucunun Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama Metodu ile Modellenmesi”, Doktora Tezi, *KOÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 98-116, (2005).
- [30] Emadi A., “Modelling of Power Electronic Loads in AC Distribution System Using the Generalized State-Space Averaging Method”, *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, 51, 992-1000, (2004).
- [31] Mahdavi J., Emadi A., Bellar M., D., Ehsani M., “Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State Space Averaging Approach”, *IEEE Trans. On Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 44, 767-770, (1997).
- [32] Nasiri A., Emadi A., “Modelling, Simulation, and Analysis of Active Filter Systems Using Generalized State Space Averaging Method”, *29th IEEE Industrial Electronics Society*, 1999-2004, (2003).
- [33] Gaviria, C., Fossas, E., Griñó, R., “Robust Controller for a Full-Bridge Rectifier Using the IDA Approach and GSSA Modeling”, *IEEE Transactions On Circuits And Systems*, 52, 609-616, (2005).
- [34] Batlle, C., Biel, D., Fossas, E., Gaviria, C., Griñó R., “Control and Analysis of GSSA and VSS Models”, *Institut d’Organitzacioi Control de Sistemes Industrials*, Technical University of Catalonia, IOC-DT-P-2004-20, 12-16, (2004).
- [35] Batlle, C., Biel, D., Fossas, E., Gaviria, C., Griñó R., “GSSA and VSS Models”, *Institut d’Organitzacioi Control de Sistemes Industrials*, Technical University of Catalonia, IOC-DT-P-2004-21, 16-23, (2004).

- [36] Nasiri A., “Harmonics in Sea and Undersea Vehicles: Sources, Effects, and Solutions”, *IEEE Industrial Applications Conference*, 161-167, (2005).
- [37] Krein P., T., Bentsman J., Bass R., M., Lesieutre B., “On the Use of Averaging for the Analysis of Power Electronic Systems”, *IEEE Trans. On Power Electronics*, 5, 182-190, (1990).
- [38] Yazdani A., Iravani R., “A Generalized State-Space Averaged Model of the Three-Level NPC Converter for Systematic DC-Voltage-Balancer and Current-Controller Design”, *IEEE Trans. On Power Delivery*, 20, 1105-1114, (2005).
- [39] Emadi, A., Nasiri, A., Bekiarov, S.,B., “Uninterruptible Power Supplies and Active Filters”, *Illinois Institute of Technologj Elektrical and Computer Engineering Department Chicago*, 246-259, (2005).
- [40] Rivetta, C.H., Emadi, A., Williamson, G.A., Jayabalan, R., Fahimi, B., “Analysis and Control of a Buck DC–DC Converter Operating With Constant Power Load in Sea and Undersea Vehicles”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42, 559-568, March/April, (2006).

EK-A

Boost Dönüştürücünün GSSA yöntemi ile modellenmesi sonucunda elde edilen 6.31 'deki matris denkleminin Matlab'ta yazılan çözüm programı.

```
function boost_cevirici
clc;
clear;
close all;
global MAT_A MAT_B;
VIN = 20;
R = 10;
L = 5e-3;
C = 50e-6;
t = [0 0.025];
x0 = [0; 0; 0; 0; 0; 0];
w = 1e4;
d = 0.25;
MAT_A = [ 0      w  -(1-d)/L  0  0  sin(2*pi*d)/(2*pi*L)
          -w      0  0  -(1-d)/L  0  -(1-cos(2*pi*d))/(2*pi*L)
          (1-d)/C  0  -1/(R*C)  w  -(sin(2*pi*d))/(2*pi*C)  0
          0  (1-d)/C  -w  -1/(R*C)  (1-cos(2*pi*d))/(2*pi*C)  0
          0  0  sin(2*pi*d)/(pi*L)  -2*(1-cos(2*pi*d))/(2*pi*L)  0  -(1-d)/L
          -(sin(2*pi*d))/(pi*C)  2*(1-cos(2*pi*d))/(2*pi*C)  0  0  (1-d)/C  -1/(R*C)];
MAT_B = [0 0 0 0 VIN/L 0]';
[t,x] = ode45(@f,t,x0);
[xrows xcolumns] = size(x);
[trows tcolumns] = size(t);
x1= x(:,1);
x2= x(:,2);
x3= x(:,3);
x4= x(:,4);
x5= x(:,5);
x6= x(:,6);
for inc = 1:trows
    iL(inc) = (x5(inc)) + 2*x1(inc)*(cos(w*t(inc))) - 2*x2(inc)*(sin(w*t(inc)));
    vO(inc) = (x6(inc)) + 2*x3(inc)*(cos(w*t(inc))) - 2*x4(inc)*(sin(w*t(inc)));
    % state space averaging method
    ssa_iL(inc) = (x5(inc));
    ssa_vO(inc) = (x6(inc));
    ssa_iL1(inc) = 0.9885*(x5(inc));
    ssa_vO1(inc) = 0.9885*(x6(inc));
end
figure
plot(t,iL,t,vO)
legend('Voltage')
legend('Current')
xlabel('Time')
ylabel('Votage and Current')
function dxdt = f(t,x)
global MAT_A MAT_B;
dxdt = MAT_A * x + MAT_B;
```

EK-B

Alçaltan buck dönüştürücünün GSSA yöntemi ile modellenmesi sonucunda elde edilen 6.53 'deki matris denkleminin Matlab'ta yazılan çözüm programı.

```
function buck
clc; clear; close all;
global BUCK_MAT_A BUCK_MAT_B;
BUCK_VIN = 48;
BUCK_VO = 12;
BUCK_R = 1.5;
BUCK_L = 0.0015;
BUCK_C = 0.0008;
BUCK_tspan = [0 0.04];
BUCK_x0 = [1; 1; 1; 1; 1; 1];
BUCK_W = 1e4;
BUCK_D = BUCK_VO/BUCK_VIN;
BUCK_MAT_A = [ 0 -1/BUCK_L 0 0 0 0
              1/BUCK_C -1/(BUCK_R*BUCK_C) 0 0 0 0
              0 0 0 BUCK_W -1/BUCK_L 0
              0 0 -BUCK_W 0 0 -1/BUCK_L
              0 0 1/BUCK_C 0 -1/(BUCK_R*BUCK_C) BUCK_W
              0 0 0 1/BUCK_C -BUCK_W -1/(BUCK_R*BUCK_C)];
BUCK_MAT_B=[(BUCK_D*BUCK_VIN)/BUCK_L 0 (BUCK_VIN*sin(2*pi*BUCK_D)) /
(2*pi*BUCK_L) - (BUCK_VIN*(1-cos(2*pi*BUCK_D))) / (2*pi*BUCK_L) 0 0];
[BUCK_t,BUCK_x] = ode45(@BUCK_f,BUCK_tspan,BUCK_x0);
[BUCK_xrows BUCK_xcolumns] = size(BUCK_x);
[BUCK_trows BUCK_tcolumns] = size(BUCK_t);
BUCK_x1= BUCK_x(:,1);
[BUCK_x1rows BUCK_x1columns] = size(BUCK_x1);
BUCK_x2= BUCK_x(:,2);
[BUCK_x2rows BUCK_x2columns] = size(BUCK_x2);
BUCK_x3= BUCK_x(:,3);
BUCK_x4= BUCK_x(:,4);
BUCK_x5= BUCK_x(:,5);
BUCK_x6= BUCK_x(:,6);
for inc = 1:BUCK_trows
    BUCK_iL(inc) = BUCK_x1(inc) + 2*BUCK_x3(inc)*cos(BUCK_W*BUCK_t(inc)) -
2*BUCK_x4(inc)*sin(BUCK_W*BUCK_t(inc));
    BUCK_vO(inc) = BUCK_x2(inc) + 2*BUCK_x5(inc)*cos(BUCK_W*BUCK_t(inc)) -
2*BUCK_x6(inc)*sin(BUCK_W*BUCK_t(inc));
end
BUCK_Avg_iL = mean(BUCK_iL);
plot(BUCK_t,BUCK_iL,'-',BUCK_t,BUCK_vO,'-')
legend('Current','Voltage')
xlabel('Time')
ylabel('Voltage and Current')
function BUCK_dxdt = BUCK_f(BUCK_t,BUCK_x)
global BUCK_MAT_A BUCK_MAT_B;
BUCK_dxdt = BUCK_MAT_A * BUCK_x + BUCK_MAT_B;
```

EK-C

Alçaltan-yükselten (buck-boost) dönüştürücünün GSSA yöntemi ile modellenmesi sonucunda elde edilen 6.82 'deki matris denkleminin Matlab çözüm programı.

```
function buck_boost_cevirici
clc; clear;
close all;
global MAT_A MAT_B;
Vin = 20;
R = 8.5;
L = 0.001;
C = 50e-6;
t = [0 0.006];
x0 = [1; 1; 1; 1; 1; 1];
w = 1e5;
d = 0.6;
MAT_A = [ 0      w      -(1-d)/L      0      0      sin(2*pi*d)/(2*pi*L)
          -w      0      0      -(1-d)/L      0      -(1-cos(2*pi*d))/(2*pi*L)
          (1-d)/C  0      -1/(R*C)      w      -(sin(2*pi*d))/(2*pi*C)  0
          0      (1-d)/C  -w      -1/(R*C)      (1-cos(2*pi*d))/(2*pi*C)  0
          0      0      sin(2*pi*d)/(pi*L)  -(1-cos(2*pi*d))/(pi*L)  0      -(1-d)/L
          -(sin(2*pi*d))/(pi*C) (1-cos(2*pi*d))/(pi*C) 0      0      (1-d)/C      -1/(R*C) ];
MAT_B = [ Vin*sin(2*pi*d)/(2*pi*L) Vin*cos(2*pi*d-1)/(2*pi*L) 0 0 (Vin*d)/L 0 ];
[t,x] = ode45(@f,t,x0);
[xrows xcolumns] = size(x);
[trows tcolumns] = size(t);
x1= x(:,1);
x2= x(:,2);
x3= x(:,3);
x4= x(:,4);
x5= x(:,5);
x6= x(:,6);
for inc = 1:trows
    iL(inc) = (x5(inc)) + 2*x1(inc)*(cos(w*t(inc))) - 2*x2(inc)*(sin(w*t(inc)));
    vO(inc) = (x6(inc)) + 2*x3(inc)*(cos(w*t(inc))) - 2*x4(inc)*(sin(w*t(inc)));
    % state space averaging method
    ssa_iL(inc) = (x5(inc));
    ssa_vO(inc) = (x6(inc));
end
figure
plot(t,iL,t,ssa_iL,'r',t,vO,t,ssa_vO,'r')
legend('Current')
figure
plot(t,vO,t,ssa_vO,'r')
legend('Voltage')
xlabel('Time')
ylabel('Voltage and Current')
function dxdt = f(t,x)
global MAT_A MAT_B;
dxdt = MAT_A * x + MAT_B;
```

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Bursa'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Bursa'da tamamladı. 1999-2000 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü'nden 2004 yılında Elektrik Öğretmeni olarak mezun oldu. Bir sonraki yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi yüksek lisans programına kabul edildi. Halen Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir.