

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HİBRİT ARAÇLARDA GÜÇ ELEKTRONİĞİ
SİSTEMLERİNİN GENELLEŞTİRİLMİŞ DURUM UZAY
ORTALAMA (GSSA) YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik - Elektronik Müh. Serhat BAĞCI

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ethem KÖKLÜKAYA

Haziran 2011

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİBRİT ARAÇLARDA GÜÇ ELEKTRONİĞİ
DEVRELERİNİN GENELLEŞTİRİLMİŞ DURUM UZAY
ORTALAMA (GSSA) YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik – Elektronik Müh. Serhat BAĞCI

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜH.

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

Bu tez 23/06/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

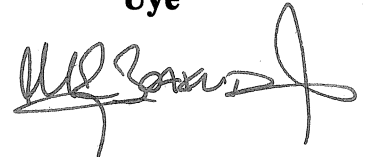
Prof. Dr.
Ethem KÖKLÜKAYA
Jüri Başkanı



Doç. Dr.
Ali Fuat BOZ
Üye



Yrd. Doç. Dr.
M. Recep BOZKURT
Üye



ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Sürekli artan dünya nüfusu, gelişmekte olan ülkeler ve insanların ihtiyacı için artan üretim gereksinimi, insanlığın faaliyetlerinin devamı için enerji talebini artırmaktadır. Günümüzde dünya üzerinde, enerji büyük oranda petrol türevi yakıtlardan elde edilmektedir. Petrol türevi yakıt rezervlerinin bir gün tükeneceği, bu yakıtların yanması ile açığa çıkan doğaya ve insan sağlığına zarar veren atık yanma ürünleri, küresel ısınma tehdidi, petrol kaynaklarına hükmetmek amaçlı yapılan petrol savaşları, insanlığın, huzurlu, barışçıl ve daha doğal yaşam alanları oluşturabilmek için temiz enerji elde etme arayışlarını da artırmıştır. Petrol türevi yakıtların en çok kullanıldığı sektörlerden biri ulaşım ve ulaştırma sektörüdür. Dünya üzerinde ulaşımın büyük bir bölümü karayolu araçları ile yapılmaktadır.

Hibrit (melez) otomobillerin amacı fosil yakıt (benzin, mazot vb.) sarfiyatını azaltmaktır. Bunu sağlamak için sıkışık trafikte, düşük hızlarda benzin/dizel motoru yerine elektrik motorunu kullanmakta ve bu sayede kısmen sıfır emisyon salınımı sağlamaktadırlar. Elektrik motorunun çalışması için gerekli enerji benzin motoru çalıştırıldığı zamanlarda ya da frenleme sırasında akülere şarj edilmektedir. Dolayısıyla bu araçların elektriğe bağlanarak şarj edilmesi gibi bir gereksinim yoktur. 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 MATLAB SIMULINK programında tasarlanarak karşılaştırılması yapılmıştır.

Bu çalışmada yardımını esirgemeyen tez danışmanım Prof.Dr. Ethem KÖKLÜKAYA ve değerli hocam Prof.Dr.Uğur ARİFOĞLU'na teşekkür ederim. Çalışmalarım boyunca sürekli destek olan sevgili eşim Hüsna BAĞCI'ya minnettarım.

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|------|
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR..... | ii |
| İÇİNDEKİLER..... | iii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ..... | vi |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | viii |
| TABLolar LİSTESİ..... | xii |
| ÖZET..... | xiii |
| SUMMARY..... | xiv |
| | |
| BÖLÜM 1. | |
| GİRİŞ..... | 1 |
| | |
| BÖLÜM 2. | |
| ELEKTRİKLİ ARAÇ SİSTEMLERİ..... | 2 |
| 2.1. Tümü Elektrikli Araçlar..... | 2 |
| 2.1.1. Tea teknolojilerinin otomotiv sektörüne etkileri ve yeni oluşumlar..... | 5 |
| 2.2. Hibrit Elektrikli Araçlar..... | 8 |
| 2.2.1. Motor küçültme..... | 10 |
| 2.2.2. Motor durdurma..... | 10 |
| 2.2.3. Rejeneratif frenleme..... | 11 |
| 2.2.4. Güç yönetimi..... | 12 |
| 2.2.5. Seri tahrik sistemi (Seri hibrit)..... | 13 |
| 2.2.6. Paralel tahrik sistemi (Paralel hibrit)..... | 15 |
| 2.2.7. Seri / Paralel tahrik sistemi (Seri/Paralel hibrit)..... | 17 |
| 2.2.8. Hibrit elektrikli araçların avantajları ve dezavantajları..... | 18 |
| 2.2.8.1. Hibrit elektrikli araçların avantajları..... | 18 |
| 2.2.8.2. Hibrit elektrikli araçların dezavantajları..... | 19 |

| | |
|---|----|
| 2.2.8.3. Seri hibrit sistemin dezavantajları..... | 20 |
| 2.2.8.4. Paralel hibrit sistemin dezavantajları..... | 20 |
| 2.3. Yakıt Pili Elektrikli Araçlar..... | 20 |
| 2.3.1. Yakıt pili..... | 20 |
| 2.3.2. Yakıt pili ve yakıt pilli araçların avantajları ve dezavantajları..... | 25 |
| 2.3.2.1. Yakıt pilli araçların avantajları..... | 25 |
| 2.3.2.2. Yakıt pilli araçların dezavantajları..... | 26 |
| 2.5. Güç Üretim Sistemi ve Zararlı Gaz Salımı..... | 26 |

BÖLÜM 3.

| | |
|---|----|
| HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN ALT SİSTEMLER.. | 29 |
| 3.1. Hibrit Elektrikli Araçlarda Enerji Kaynakları..... | 29 |
| 3.1.1. Batarya..... | 29 |
| 3.1.1.1. Batarya kapasitesi..... | 29 |
| 3.1.1.2. Batarya uç gerilimi..... | 30 |
| 3.1.1.3. Batarya şarj-deşarj çevrim sayısı..... | 30 |
| 3.1.1.4. Enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu..... | 30 |
| 3.1.2. Süperkapasitörler ve ultrakapasitörler..... | 31 |
| 3.1.3. Volanlar..... | 34 |
| 3.1.4. Yakıt pilleri..... | 38 |
| 3.2. Hibrit Elektrikli Araçlarda Güç Kontrol Sistemleri..... | 41 |
| 3.2.1. AC/DC dönüştürücüler (Doğrultucular)..... | 42 |
| 3.2.1.1. Kontrolsüz doğrultucular..... | 43 |
| 3.2.1.2. Kontrollü doğrultucular..... | 44 |
| 3.2.1.3. Doğrultucuların elektrikli araçlarda kullanımı.... | 45 |
| 3.2.2. DC/DC dönüştürücüler | 46 |
| 3.2.2.1. Azaltan (Buck) çevirici..... | 46 |
| 3.2.2.2. Yükselten (Boost) çevirici..... | 47 |
| 3.2.2.3. DC/DC Çeviricilerin kontrolü..... | 48 |
| 3.2.2.4. DC/DC Çeviricilerin hibrit elektrikli araçlarda kullanım alanları..... | 49 |
| 3.2.3. İnverterler..... | 50 |

| | |
|--|----|
| 3.2.3.1. Gerilim kaynaklı inverterler..... | 50 |
| 3.2.3.2. Kare dalga inverter..... | 51 |
| 3.2.3.3. PWM inverterler..... | 53 |
| 3.2.3.4. Sinusoidal PWM inverter..... | 53 |
| 3.2.3.5. Uzay vektör PWM inverter..... | 56 |
| 3.2.3.6. Akım kaynaklı inverterler..... | 62 |
| 3.3. Hibrit Elektrikli Araçlarda Kullanılan Motor Tahrik Sistemleri..... | 63 |

BÖLÜM 4.

| | |
|---|----|
| HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA (HEA) KULLANILAN GÜÇ ELEKTRONİĞİ SİSTEMLERİNİN GENELLEŞTİRİLMİŞ DURUM UZAY ORTALAMA YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ..... | 65 |
| 4.1. Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama (GSSA) Metodu..... | 65 |
| 4.2. Yükselten (Boost) DC/DC Dönüştürücünün GSSA Yöntemi ile Matematiksel Olarak Modellenmesi..... | 68 |
| 4.3. Azaltan (Buck) Dönüştürücünün GSSA Yöntemiyle Modellenmesi..... | 75 |
| 4.4. Azaltan-Yükselten (Buck-Boost) DC/DC Dönüştürücünün GSSA İle Matematiksel Olarak Modellenmesi..... | 80 |
| 4.5. AC/DC Doğrultucunun GSSA Yöntemiyle Modellenmesi..... | 86 |

BÖLÜM 5.

| | |
|----------------|-----|
| SONUÇLAR..... | 93 |
| KAYNAKLAR..... | 96 |
| EKLER..... | 100 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 106 |

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|----------|--|
| C | : Atmosfer Basıncı |
| Atm | : Kapasite, (Farad) |
| d | : Görev Devri |
| dk | : Dakika |
| f | : Frekans,(hz) |
| J | : Atalet Momenti, (N/kgm) |
| k | : Geometriye bağlı bir sabit sayı, |
| kg | : Kilogram |
| L | : Endüktans, (Henry) |
| m | : Kütle |
| R | : Direnç,(ohm) |
| t | : Zaman (sn) |
| T | : Periyot (1/hz) |
| U | : Volanlarda depolanan enerji, (Joule) |
| w | : Açısal Hız,(rad/sn) |
| σ | : Gerilme Direnci |
| ρ | : Malzeme Yoğunluğu, (kg m-3) |
| W | : Watt |

Kısaltmalar

| | |
|-----|---------------------------|
| AC | : Alternatif Akım |
| BG | : Beygir Gücü |
| CCM | : Sürekli İletim Modu |
| CNG | : Sıkıştırılmış Doğal Gaz |
| CSI | : Akım Kaynaklı İnverter |
| CO | : Karbon Monoksit |
| DC | : Doğru Akım |

| | |
|-----------------|---|
| EA | : Elektrikli Araç |
| EDLC | : Electrochemical Double-Layer Capacitor |
| EPA | : Amerikan Çevre Koruma Ajansı |
| EUCLID | : Avrupa Uzun Vadeli Savunma _sbirligi |
| EVS | : Elektrikli Araç Sempozyumunda |
| FESS | : Volanlı Enerji Depolama Sistemleri |
| GE | : General Electric |
| GSSA | : Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama |
| HEA | : Gate Turn-off Thyristor |
| GTO | : Hibrit Elektrikli Araç |
| IGBT | : Insulated gate bipolar transistor |
| IGCT | : Insulated Gate Controlled Thyristor |
| İYM | : İçten Yanmalı Motor |
| KOYP | : Katı Oksit Yakıt Pili |
| MCT | : Mos Controlled Thyristor |
| MDS | : Magneto-Dinamik Enerji Depolama Sistemi |
| MEA | : Membran Elektrot Grubu |
| MOSFET | : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor |
| NEC | : Nippon Electric Company |
| NiCd | : Nikel-Kadmiyum |
| NO _x | : Nikel-Metal Hidrür |
| NiMH | : Azot Oksitler |
| PEMYP | : Proton Elektrolit Membranlı Yakıt Pili |
| PRI | : Pinnacle Research Institute |
| PWM | : Darbe Genislik Modülasyonu |
| RMS | : Root Mean Square |
| RPM | : Motor Hızı |
| SCR | : Silicon Controlled Rectifier |
| SM | : Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor |
| SSA | : Durum Uzay Ortalama |
| UJT | : Bipolar Transistör |
| VSI | : Gerilim Kaynaklı İnverter |
| TEA | : Tümü Elektrikli Araç |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | | |
|-------------|--|----|
| Şekil 2.1. | Tümü elektrikli araç..... | 3 |
| Şekil 2.2. | Tümü elektrikli araç temel enerji akış dizaynı..... | 4 |
| Şekil 2.3. | Tümü elektrikli araç tahrik sistemi..... | 5 |
| Şekil 2.4. | Hibrit elektrikli araçta enerji akışı | 9 |
| Şekil 2.5. | ECE R15 çevrimi güç gereksinimleri..... | 11 |
| Şekil 2.6. | Motor devrine göre en verimli çalışma çizgisi..... | 12 |
| Şekil 2.7. | Farklı iki motor devri için yakıt tüketimi miktarları..... | 13 |
| Şekil 2.8. | Seri hibrit elektrikli araç tahrik sistemi blok şeması..... | 14 |
| Şekil 2.9. | Seri hibrid system..... | 14 |
| Şekil 2.10. | Bataryalı seri hibrit sistem açık tek hat şeması..... | 15 |
| Şekil 2.11. | Paralel hibrit elektrikli araç tahrik sistemi..... | 16 |
| Şekil 2.12. | Paralel hibrit sistemin yerleşim dizaynı..... | 16 |
| Şekil 2.13. | Seri-paralel hibrit elektrikli araç tahrik sistemi blok şeması..... | 18 |
| Şekil 2.14. | Yakıt pili içyapısı ve elektrik enerjisi üretim prensibi..... | 22 |
| Şekil 2.15. | Bir yakıt pili çalışma prensibinin sematik gösterimi..... | 22 |
| Şekil 2.16. | Yakıt pilli hibrit elektrikli araç tahrik sistemi..... | 24 |
| Şekil 3.1. | Enerji depo eden (kapasitörler, süper ve ultrakapasitörler, bataryalar, yakıt pilleri) elemanların özel durumlardaki ihtiyaçlarına göre birbirleri ile karşılaştırılması | 32 |
| Şekil 3.2. | EDLC sistemlerinin elektrik yükü ile nasıl yüklendiklerini gösteren şema..... | 33 |
| Şekil 3.3. | HEA kullanılan enerji depolama elemanlarından volanın yapısı | 35 |
| Şekil 3.4. | CCM firmasının Emafer adını verdiği volan sistemi..... | 37 |
| Şekil 3.5. | Yakıt pili yapısı..... | 38 |
| Şekil 3.6. | Yakıt pili akım/gerilim karakteristiği..... | 40 |
| Şekil 3.7. | Yakıt pilli elektrikli araç yapısı..... | 40 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Şekil 3.8. | Güç elektroniğinde kontrol amaçlı kullanılan yarı iletken güç elemanlarının akım, gerilim ve anahtarlama frekanslarına göre karşılaştırılması..... | 41 |
| Şekil 3.9. | Hibrit elektrikli güç sistemi..... | 42 |
| Şekil 3.10. | Bir/Üç fazlı köprü tipi kontrolsüz doğrultucu..... | 43 |
| Şekil 3.11. | Bir fazlı kontrollü Buck tipi doğrultucu..... | 44 |
| Şekil 3.12. | Bir fazlı kontrollü Boost tipi doğrultucu..... | 44 |
| Şekil 3.13. | İYM + jeneratörün DC bara bağlantısı..... | 45 |
| Şekil 3.14. | Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan azaltan DC-DC çevirici devre şeması..... | 46 |
| Şekil 3.15. | Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan yükselten DC-DC çevirici devre prensip şeması..... | 47 |
| Şekil 3.16. | Azaltan-yükselten DC-DC çevirici devre şeması..... | 48 |
| Şekil 3.17. | PWM yöntemiyle kontrol işaretinin üretilmesi..... | 49 |
| Şekil 3.18. | HEA farklı seviyedeki DC gerilimlerin birbirlerine paralel bağlanması..... | 50 |
| Şekil 3.19. | Üç fazlı gerilim beslemeli inverter..... | 51 |
| Şekil 3.20. | Üç Faz gerilim beslemeli kare dalga inverterin anahtarlama durumları, akım ve gerilim değişimleri | 52 |
| Şekil 3.21. | SPWM ideal dalga şekilleri a) taşıyıcı ve modülasyon sinyalleri b)1. anahtarın durumu c)3. anahtarın durumu d)AC çıkış gerilimi e)AC çıkış akımı..... | 54 |
| Şekil 3.22. | Üç fazlı inverterde gerilim sınırları..... | 55 |
| Şekil 3.23. | Anahtar konumlarına karşılık gelen gerilim vektörleri..... | 56 |
| Şekil 3.24. | Uzay vektörlerin gösterimi..... | 57 |
| Şekil 3.25. | Referans gerilim vektörünün 1. Bölgede olması durumunda üretilen gerilim vektörleri..... | 59 |
| Şekil 3.26. | Uzay vektör modülasyonu için ideal dalga şekilleri a) modülasyon sinyalleri b-c)anahtarlama durumları d)AC çıkış gerilimi e)AC çıkış akımı f)DC akım..... | 60 |
| Şekil 3.27. | Referans faz gerilim dalgası..... | 61 |
| Şekil 3.28. | Üç faz akım kaynaklı inverter topolojisi..... | 62 |
| Şekil 3.29. | DC akım kaynağından beslenen inverter..... | 62 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Şekil 4.1. | PWM yükselten DC/DC dönüştürücü..... | 69 |
| Şekil 4.2. | Matlab Simulink programından elde edilen yükselten DC/DC dönüştürücünün akım(I_y) zaman eğrisi..... | 69 |
| Şekil 4.3. | Matlab Simulink programından elde edilen yükselten DC/DC dönüştürücünün gerilim(V_o) zaman eğrisi..... | 70 |
| Şekil 4.4. | Yükselten dönüştürücüde anahtarlama fonksiyonu $u(t)$ | 71 |
| Şekil 4.5. | GSSA yöntemi ile elde edilen 4.31 nolu matris denklemin Matlab'ta yazılan Ek A'daki çözümünden alınan devrenin akım gerilim sonuçları..... | 74 |
| Şekil 4.6. | Matlab Simulink programından alınan DC/DC PWM buck dönüştürücü | 75 |
| Şekil 4.7. | Matlab Simulink programından elde edilen alçaltan DC/DC dönüştürücünün akım-zaman eğrisi..... | 76 |
| Şekil 4.8. | Matlab Simulink programından elde edilen alçaltan DC/DC dönüştürücünün gerilim-zaman eğrisi..... | 76 |
| Şekil 4.9. | HEA'ta kullanılan ve GSSA yöntemi ile modellenen alçaltan DC/DC boost dönüştürücü..... | 77 |
| Şekil 4.10. | GSSA yöntemi ile elde edilen (4.53)'teki matris denkleminin Matlab programı ile Ek B' deki çözümünden elde edilen $i_L(t)$ ve $v_o(t)$ sonuçları..... | 80 |
| Şekil 4.11. | Matlab Simulink programından alınan DC/DC buck-boost dönüştürücü devre şeması..... | 81 |
| Şekil 4.12. | Matlab Simulink programından elde edilen alçaltan-yükselten DC/DC dönüştürücünün akım-zaman eğrisi..... | 81 |
| Şekil 4.13. | Matlab Simulink programından elde edilen alçaltan-yükselten DC/DC dönüştürücünün gerilim-zaman eğrisi..... | 82 |
| Şekil 4.14. | HEA'ta kullanılan ve GSSA yöntemi ile modellenen DC/DC buck-boost dönüştürücü..... | 82 |
| Şekil 4.15. | GSSA yöntemi ile elde edilen (4.82)'teki matris denkleminin Matlab programı (Ek C) ile çözümünden elde edilen akım $i_L(t)$ ve gerilim $v_o(t)$ sonuçları..... | 86 |
| Şekil 4.16. | AC / DC doğrultucunun MATLAB SİMULİNK ortamında | |

| | | |
|-------------|---|----|
| | oluşturulan modeli..... | 87 |
| Şekil 4.17. | AC/DC Doğrultucu Simulink'te elde edilen çıkış gerilim- zaman eğrisi..... | 87 |
| Şekil 4.18. | Şekil 4.17. AC/DC Doğrultucu Simulink'te elde edilen çıkış akım-zaman eğrisi..... | 88 |
| Şekil 4.19. | AC/DC doğrultucu devre Şeması..... | 88 |
| Şekil 4.20. | GSSA yöntemi ile elde edilen 4.108 nolu matris denkleminin Matlab'ta yazılan Ek D'deki çözümünden alınan devrenin akım gerilim sonuçları..... | 91 |

TABLolar LİSTESİ

| | | |
|------------|---|----|
| Tablo 2.1. | Halen geliştirilmekte olan yakıt pilleri ve teknik değerleri..... | 24 |
| Tablo 2.2. | 2002 yılında Avrupa'daki araçların zararlı gaz salım oranları (petrol, dizel, LPG, elektrik)..... | 27 |
| Tablo 2.3. | 2002 yılında Avrupa'daki şehirlerde enerji üretiminin ve motorların CO2 yayma oranları..... | 27 |
| Tablo 3.1. | Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan batarya türleri ve karşılaştırma..... | 31 |
| Tablo 3.2. | Kursun-asit batarya, volan ve süperkapasitörlerin birbirlerine göre teknik özelliklerinin karşılaştırılması..... | 34 |
| Tablo 3.3. | Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan volan enerji depolama sisteminin kursun-asit bataryaya göre karşılaştırılması..... | 36 |
| Tablo 3.4. | İnverterde anahtarlama konumuna bağlı olarak VDs ve VQs çıkış gerilimleri..... | 58 |

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama Metodu (GSSA), Güç Elektroniği Devreleri, Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA)

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 elektrikli ve hibrit elektrikli araçların günümüze kadar gelişiminden söz edilmiştir. Daha sonra hibrit elektrikli araçların yapısı ve araçta kullanılan alt sistemler anlatılmıştır. Hibrit elektrikli araçların alt yapısında kontrol ve aktarma işlemlerinin gerçekleşmesinde güç elektroniği devreleri kullanılmaktadır. 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 benzetim; güç elektroniği devrelerinin analiz ve tasarım sürecinin en önemli unsurlarından biri haline gelmektedir. Bu tezde, güç elektroniği dönüştürücülerinin 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 dönüştürücülerin MATLAB SIMULINK benzetim programı ile yapılan gerçek zaman benzetimleri ile genelleştirilmiş durum uzay ortalama (GSSA) yönteminden alınan sonuçlar karşılaştırılmış ve önerilen yöntemin geçerliliği ispatlanmıştır.

POWER ELECTRONICS CIRCUITS OF HYBRID ELECTRIC VEHICLE MODELLING WITH GENERALIZED STATE-SPACE AVERAGING METHOD

SUMMARY

Key Words: Hybrid Electric Vehicles (HEVs), Generalized State-Space Averaging Method (GSSA), Power Electronics Circuits

Hybrid Electrical Vehicles (HEVs) are defined as a vehicle, where its energy is provided by two or more energy sources and one of these sources has to be an electrical energy in hybrid electrical vehicle. Firstly a brief history of electrical and hybrid electrical vehicles and their historical developments are mentioned in this thesis. After that, subsystems of hybrid electrical vehicles using and HEVs structure are explained in detail. Power electronics circuits are used for control and realization of transfer operations in subsystems of HEVs. These are periodic time-variant systems because of their switching operation. Therefore, converters have non-linear characteristic as dynamic behavior. Analysis and design of such systems is rather difficult. In this case, modeling and simulation is becoming one of the most important elements of power electronic circuit's analysis and design process. 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 relationship between the system state variables is described by using these linear equations. In the last section of the thesis converters have been analyzed using MATLAB SIMULINK program as a sample.

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 using real-time MATLAB simulations applications. Consequently, the validity of suggested method has been proved in this study.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İlk hibrit aracı 27 yaşındayken Ferdinand Porsche yapmıştır. 1902 yılında “Mixte-Wagen” adını verdiği aracı Viyanalı bir fayton üreticisi olan Ludwig Lohner ile birlikte çalışan Porsche 4 silindirli bir Daimler motoruna aküler, bir jeneratör ve elektrik motorları eklemiştir. Bu haliyle Mixte benzinli motor stop edildiğinde bile akülerin çalıştırdığı elektrikli motorla ilerlemeye devam edebilmekteydi. Hibrid arabaların yaklaşık 10 yıl içerisinde, benzin motorlu arabaların yerini alacağı düşünülmektedir. Toyota, Honda, Renault, Mercedes gibi birçok büyük otomotiv firması hibrit araç üretmektedir [1].

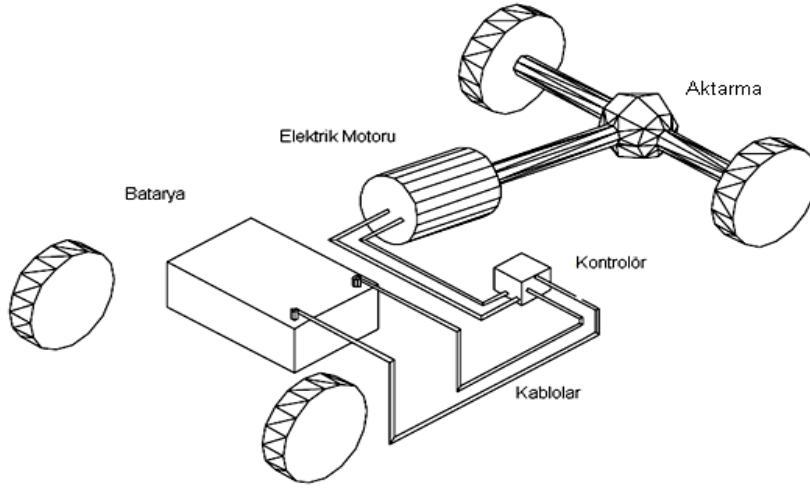
Günümüzde enerji büyük oranda petrol türevi yakıtlardan elde edilmektedir. Petrol türevi yakıt rezervlerinin azalması, bu yakıtların yanması ile açığa çıkan zararlı atıklar, küresel ısınma tehdidi ve petrol savaşları temiz enerji elde etme arayışlarını da artırmıştır. Petrol türevi yakıtların en çok kullanıldığı sektörlerden biri ulaştırma sektörüdür. Dünya üzerinde ulaşımın büyük bir bölümü karayolu araçları ile yapılmaktadır. Hibrit (melez) otomobillerin amacı fosil yakıt sarfiyatını azaltmaktır. Bunu sağlamak için belirli şartlarda benzin/dizel motoru yerine elektrik motorunu kullanmakta ve kısmen sıfır emisyon salımı sağlamaktadırlar. Hibrit araçlarda enerji aktarım ve şarj işlemleri güç elektroniği dönüştürücüleri tarafından yapılmaktadır. Güç elektroniği sistemlerinde kullanılan elemanlar nonlineer özellikler taşıdığı için klasik yöntemlerle (devre/zaman tabanlı modelleme, durum uzay anahtarlama ve ortalama yöntemleriyle vb.) modelleme esnasında uzun benzetişim süresi ve dönüşüm problemleri ortaya çıkmaktadır. Yani devrenin davranışı tasarım aşamasında tam olarak ve hızlı bir şekilde tespit edilememektedir. Bu tezde bu sorunun çözümü için geliştirilen genelleştirilmiş durum uzay ortalama metodunun güç elektroniği devrelerinde uygulandığını ve sonuçlarını ortaya koymaktadır. Bu metodun sorunun çözümünde çok etkili bir yöntem olduğu karşılaştırılmalı analizle ortaya çıkarılmıştır.

BÖLÜM 2. ELEKTRİKLİ ARAÇ SİSTEMLERİ

Elektrikli araçlar, araç içerisine yerleştirilmiş enerji üretim, dağıtım ve tahrik sistem elemanları ile birlikte çalışmaktadır. Sistem içerisindeki elemanların birbirine bağlanma şekillerine ve enerji akışındaki farklılıklarına göre tahrik sistem yapısı tanımlanmıştır. Elektrikli araçlarda üç farklı tahrik teknolojisi vardır. Bunlar bataryalı elektrikli araç (tümü-elektrikli), birden fazla tahrik gücüne sahip (örneğin elektrik motoru ve İYM) hibrit elektrikli araçlar ve bataryalı ya da bataryasız yakıt pilli araçlardır.

2.1. Tümü Elektrikli Araçlar

Tümü-elektrikli araç, modern elektrikli tahrik teknolojisi kullanılarak geliştirilmiş elektrik motoru, güç konvertörü içeren kontrolör ve enerji kaynağı olan bir batarya içermektedir. Şekil 2.1’de görülen bu araçların yapısı aslında karmaşık değildir. Bu yapıda bataryalar dışarıdan şarj edilirler. Hibrit elektrikli araçlardaki gibi yakıttan elektrik enerjisi elde edilmemektedir. Elektrik enerjisi batarya veya süperkapasitörler ile depolanmaktadır. Ayrıca dört bölgesel çalışma ile motorun rejeneratif frenlemesi yoluyla bataryaların şarj edilmesi de arzu edilir. Tümü-EA’lar yeni bir aracın ötesinde taşımacılık hizmetlerinin, sıfır zararlı gaz salımı ve daha yüksek verim ile sağlanmasına yol açacak köklü bir değişimdir.



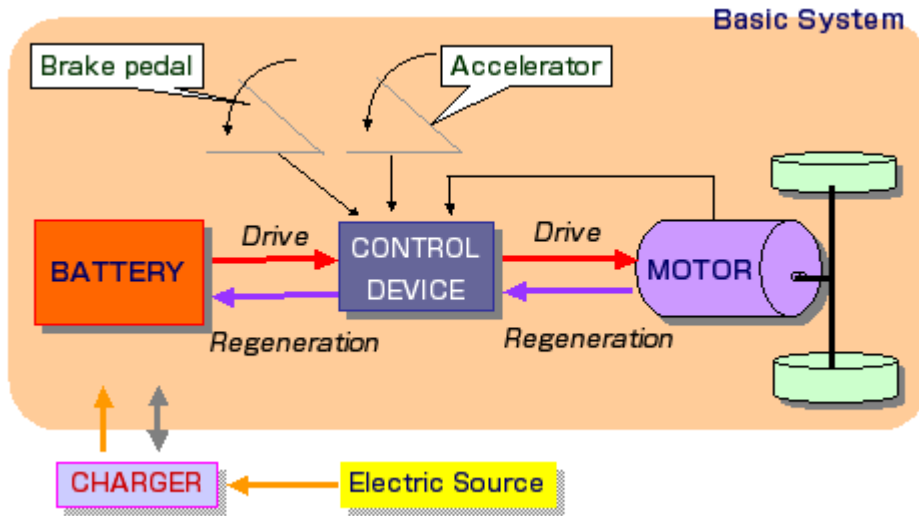
Şekil 2.1. Tümü elektrikli araç [2]

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

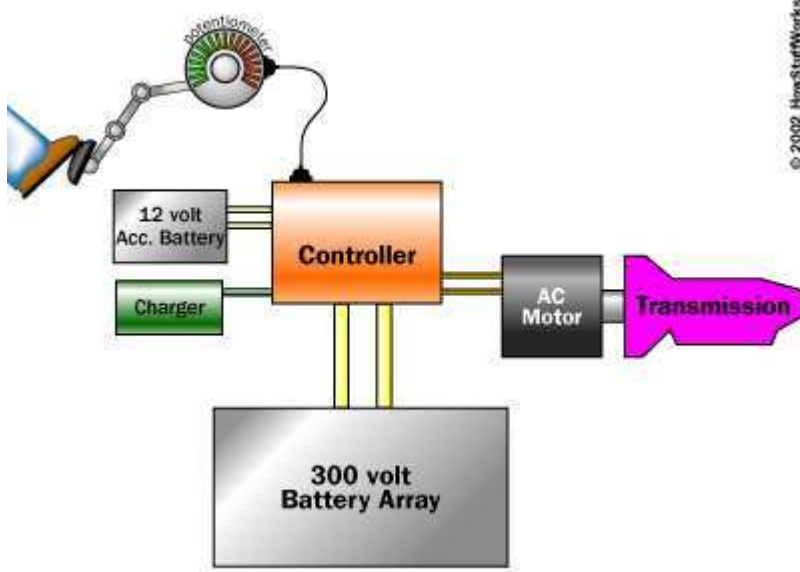
sahip batarya tipleri için önemlidir. Örneğin alüminyum-hava bataryalar 220 Wh/kg gibi yüksek enerji yoğunluğunun yanında, 30 W/kg gibi düşük güç yoğunluğuna sahiptirler. İyi bir ivmelenme veya tırmanma performansı için yüksek güç yoğunluğuna ihtiyaç duyulması durumunda yüksek güç yoğunluğuna sahip yardımcı güç kaynağına gereksinim duyulmaktadır [3]. Şekil 2.2’de TEA akış şeması görülmektedir [4].



Şekil 2.2. Tümü elektrikli araç temel enerji akış dizaynı

Yüksek bir ivmelenme için son yıllarda örnek TEA’larda yardımcı güç kaynağı olarak süperkapasitörler kullanılmaktadır. Mevcut süperkapasitörlerin enerji yoğunluğu yaklaşık 15 Wh/kg civarında olmasına rağmen güç yoğunluğu 1kW/kg’dır. Yürütülen çalışmalarda önümüzdeki yıllarda bu değerın 4 kW/kg değerine yükseltilmesi hedeflenmektedir [3].

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 2.3).



Şekil 2.3. Tümü elektrikli araç tahrik sistemi [5]

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 ise dönüştürülmektedir. Bunun tersi, geleneksel araçlarda yakıt tankında bulunan sıvı yakıtın % 18-25 kadarı tahrik tekerlerinde ise dönüştürülebilmektedir. Ancak bu durumda elektriğin santrallerde üretilmesi sırasında oluşan kayıplar dikkate alınmalıdır.

Tümü elektrikli araçlar sıfır emisyonlu araçlardır ve çok sessiz çalışırlar. Fakat bunun yanında bataryaların ağır ve pahalı olması, menzillerinin sınırlı oluşu ve şarj edilmelerinin çok uzun zaman alması bu araçların dezavantajlarıdır.

2.1.1. 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. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere EA teknolojileri arasında yer alan kritik unsurlar sırası ile

- Daha hafif, küçük, güvenilir ve düşük maliyetli elektrik motorları/jeneratörleri,

- 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 çalımsalar yürütmektedir. Bunun yanında birçok ülke ulusal araştırma programlarını yönlendirerek bu çalımsaları ivmelendirmektedir. Basta 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 çalımsalarında 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 uzmanlaşma 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 [3-5].

- Tümü-EA'lar kısa vadede şehir içi gibi kısa menziller için tercih edilecek ve düşük maliyetli, düşük teknolojili 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 birçok 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 örnek(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.

Bu beklentiler sivil araç uygulamalarının yanında elektrikli muharebe araç konusunda yapılan çalışmaları hızlandırmıştır. Elektrikli muharebe araçları 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.

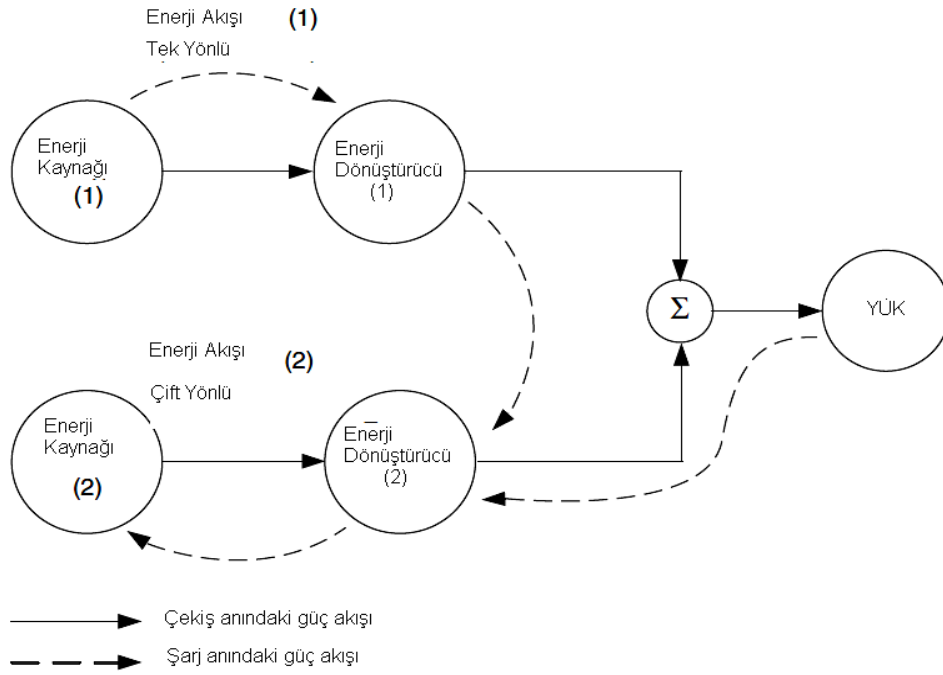
2.2. Hibrit Elektrikli Araçlar

Tümü elektrikli araçlarda karşılaşılan problemleri aşmak için elektrikli araç ile içten yanmalı motorlu araçların avantajlarını birleştiren karma bir yapı geliştirilmiştir. Hibrit araç olarak anılan bu araçlar, en az iki enerji kaynağına sahip ve bunlardan en az birinin elektrik enerjisi verdiği araçlar olarak tanımlanır. Bu genel tanımın ötesinde hibrit elektrikli araç denildiğinde daha geniş kabul gören tanım bir elektrik motoru ve bir içten yanmalı motorun kullanıldığı araçlardır. Burada amaç tümü elektrikli araca içten yanmalı motor ekleyerek aracın menzilin ve gücünü arttırmaktır.

Hibrit elektrik araçlarda güç akışı çok farklı yollardan gerçekleşebilir.

- 1. kaynak tek başına yükü besleyebilir

- 2. kaynak tek başına yükü besleyebilir
- 1. ve 2. kaynak aynı anda yükü besleyebilir
- 1. kaynak rejeneratif frenleme ile yükten beslenebilir
- 2. kaynak 1. kaynaktan beslenebilir
- 2. kaynak aynı anda 1. kaynaktan ve yükten beslenebilir
- 1. kaynak aynı anda yükü ve 2. kaynağı besleyebilir
- 1. kaynak enerjisi 2. kaynağa aktarır 2. kaynak da enerjiyi yüke aktarabilir
- 1. kaynak enerjiyi yüke iletir, yük de enerjiyi 2. kaynağa iletir



Şekil 2.4. Hibrit elektrikli araçta enerji akışı [15]

Çalışma koşullarına göre uygun yapı ve kontrolün seçilmesi aracın genel performansını ve verimini artırır. Karayolu araçlarında seyir için kullanılan enerji tüketiminin azaltılabilmesi için, araç kütlesinin düşürülmesi, yuvarlanma direnci ve aero-dinamik dirençlerinin azaltılması, güç aktarma organlarının ve çalışma bölgelerinin optimizasyonu, trafik akışındaki düzenlemeler gibi birçok yöntem mevcuttur. Hibrid elektrikli araçlarda, motor küçültme, aracın hareket etmediği durumlarda motor kapatma, güç organları yönetimi ve optimizasyonu, enerjinin geri kazanımı olanakları nedeniyle yüksek oranlarda yakıt tasarrufu yapılabilmekte ve

egzoz emisyonları düşürülebilmektedir. Hibridleştirilmenin yakıt tüketimi ve egzoz gazı emisyonlarını düşürmesi için uygulanan yöntemler aşağıda alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

2.2.1. Motor küçültme

İçten yanmalı motorlarda verimi etkileyen faktörlerin en başında, dışarıya atılan ısı, sürtünme ve pompalama kayıpları gelmektedir. Küçük motorlarda, silindir hacminin düşük olması nedeniyle, pompalama ve ısı kayıpları daha az olmaktadır. Hareketli parçaların küçük olması nedeniyle sürtünme için harcanan enerji miktarı da düşüktür. Verilen bir çevrim için büyük motorlar ile kıyaslandığında küçük motorlar en yüksek tork eğrisi referans alındığında daha fazla yükleneceğinden daha verimli bölgelerde çalışırlar.

2.2.2. Motor durdurma

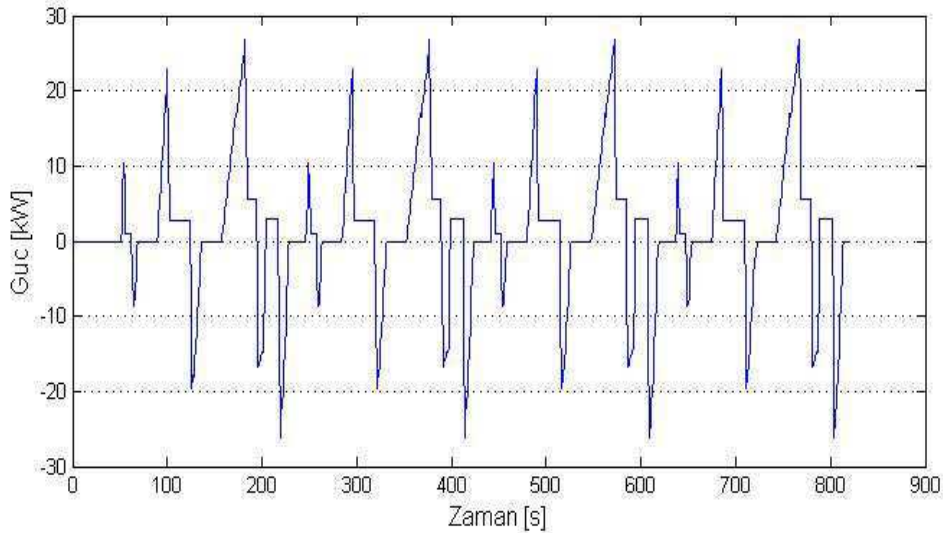
Şehir içi trafik şartlarında, araç duruyorken içten yanmalı motorlar rölanti durumunda çalışmaktadır. Avrupa şehir içi çevriminde motorun rölantide olduğu süre toplam çevrim zamanının % 35,4'ü oranında gerçekleşmektedir. Frenlemede geçen süre %13,8'dir. İçten yanmalı motor, bu durumlarda kapatılarak büyük oranlarda yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir. İçten yanmalı motorlarda, ilk çalıştırma anında motorun kararlı çalışma konumuna geçebilmesi için silindirlere daha yüksek miktarda yakıt püskürtülmektedir. İlk çalışma esnasında motor sıcak iken hızla 1500 rpm devire ulaştıktan sonra yavaşça rölanti devrine döner. Bu ilk çevrimlerde her bir silindire 600 mg yakıt gönderilmektedir. Motor rölanti devrine oturduğunda bu miktar 18 mg olur [6]. Hafif hibrid araçlarda motor ilk çalıştırılmadan önce, kayış kasnak yardımı ile İYM'a bağlanan düşük güçlü bir elektrik motoru yardımı ile İYM denge durumuna geçene kadar elektrik motoru ile tahrik edilmektedir [6].

Burada dikkat edilecek diğer hususlar ise katalitik konvertör ve motor sıcaklığıdır. İçten yanmalı motorlar rejim sıcaklığında daha az emisyon üretirken, katalitik konvertörler yüksek sıcaklıklarda daha verimli çalışmakta, atmosfere salınan karbon monoksit ve hidro-karbon gazlarının yakılarak sağlığa zararsız gazlara

dönüştürülmesinde büyük rol oynamaktadırlar. Bu nedenler ile motor kapatılırken motor ve katalitik konvertör sıcaklıkları göz önünde bulundurulmalıdır.

2.2.3. Rejeneratif frenleme

Avrupa şehir içi çevriminde, aracı hızlandırmak ve sabit hızla götürmek için gereken toplam pozitif enerji miktarı 3000 kg kütleli bir araç için 2.82 MJ iken, bu çevrimde fren ile atılan enerji miktarı 1.76 MJ değerindedir. Aynı zamanda toplam çevrim zamanının %13,8'i frenlemek için harcanmaktadır. Bu sürede, atılan enerji miktarı, çevrimdeki pozitif enerji miktarı ile kıyaslandığında oldukça büyük bir kayıp olarak göze çarpmaktadır. Hibrid elektrikli araçlar ile gelen en büyük avantaj atılan fren enerjisinin bir kısmının geri kazanılabilmesi olanağıdır. Genellikle fren ile atılan enerji miktarı araç üzerinde bulundurulmuş elektrik motorunun alabileceği kapasitenin üzerinde gerçekleşmektedir. Avrupa şehir içi çevriminde üç ton araç ağırlığı için ihtiyaç duyulan fren gücü 27 kW civarındadır (Şekil 2.5). Rejeneratif frenleme de dikkat edilmesi gereken en önemli husus ise regülasyonlar ile düzenlenen ön ve arka aks fren momentleri dağılımıdır.

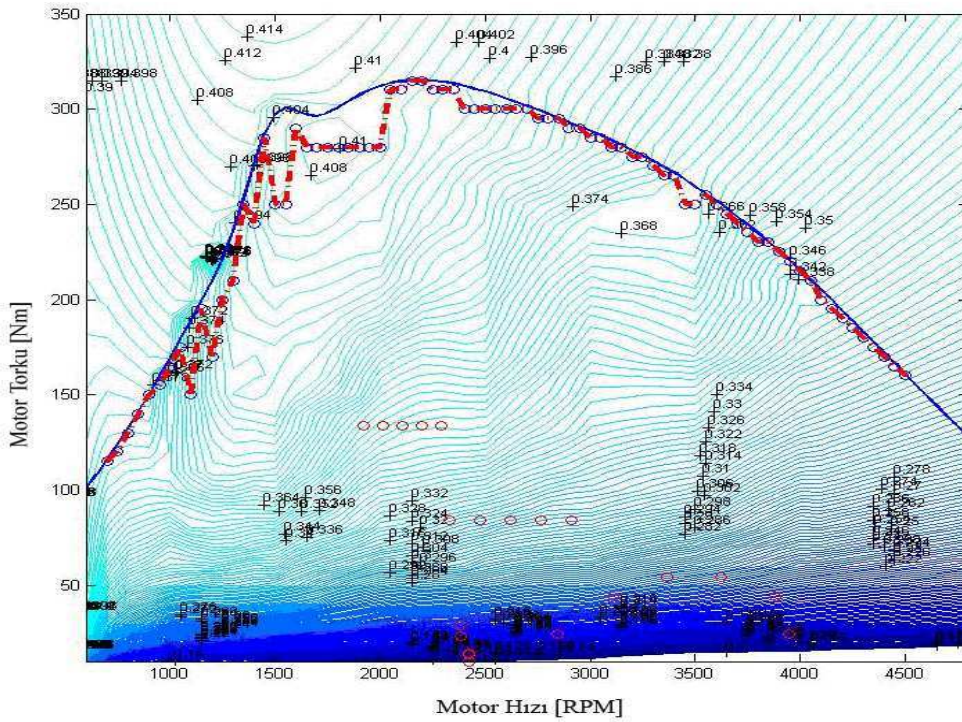


Şekil 2.5. ECE R15 çevrimi güç gereksinimleri

2.2.4. Güç yönetimi

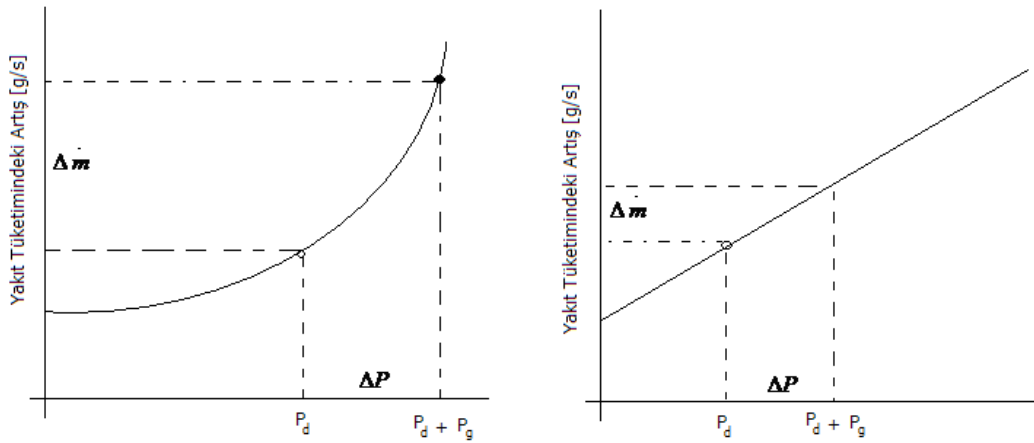
Güç ve güç aktarma organlarının en yüksek verim ve ucuz enerji bölgelerinde çalıştırılması hibrit elektrikli araçlarda önemli oranlarda yakıt tüketimi azaltma potansiyeli oluşturmaktadır. Konvansiyonel bir araca, elektrik motoru eklendiğinde, içten yanmalı motorların pahalı enerji tükettiği bölgelerde bütün sistemin verimi göz önüne alınarak elektrik motoru devreye alınabilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi içten yanmalı motorların en yüksek verimi %40 civarında iken, bu oran şehir içi seyirlerde ortalama %20'dir [7]. İyi tasarlanmış bir kontrolcü yardımı ile bu potansiyel açığa çıkarılabilmektedir.

Artan motor devri için içten yanmalı bir motorun en verimli çalıştığı noktalar kesikli çizgi ile Şekil 2.6'da verilmiştir. Birçok kontrol uygulamasında içten yanmalı motorun çalışma noktasını mümkün olduğu durumlarda en verimli olan çizgiye çekmek amacı hedeflenmektedir. Bu yaklaşım kısmi olarak doğru bir yaklaşım da olsa, doğru yaklaşım, hesaplamaların zaman boyutunun da dikkate alınması ve denklemlerin buna göre kurularak en iyileme (optimizasyon) yapılmasıdır.



Şekil 2.6. Motor devrine göre en verimli çalışma çizgisi

İçten yanmalı motorun, çevrim içerisinde, en iyi verimlerde çalışacağı noktaya çekilmesi, batarya şarj kısıtları da düşünüldüğünde en doğru yaklaşım olmayabilir. İçten yanmalı motorlarda, motor gücü ve boyutları arttığında pompalama ve sürtünme kayıpları da artış göstermektedir. Farklı motor devirleri için artan motor gücüne karşılık gelen yakıt tüketimi miktarları Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Şekilde P_d aracın seyahati için gerekli gücü, P_g ise bataryayı şarj etmek için ilave edilecek gücü temsil eder.



Şekil 2.7. Farklı iki motor devri için yakıt tüketimi miktarları [8]

Buna göre, motorun optimum güç eğrisi üzerine çekilmesi ile birim yakıt tüketimindeki artış oranı aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir [8].

$$\xi = \frac{\Delta \dot{m}}{\Delta P}$$

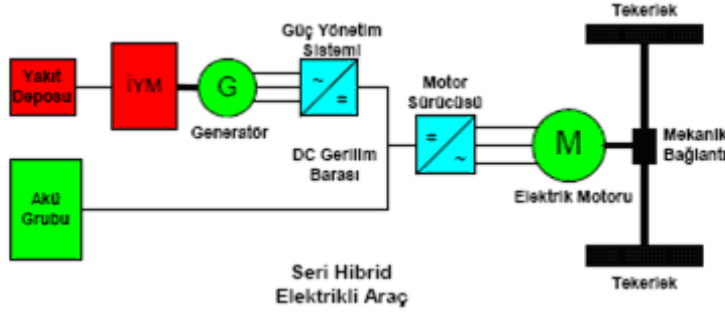
Burada, ξ artım değeri olarak adlandırılmaktadır. Bu değerin düşük olduğu bölgelerde, elektrik motorunun kısıtlar dahilinde jeneratör olarak çalıştırılması, yüksek olduğu bölgelerde ise yalnızca elektrik motorunun kullanılması, matematiksel açıdan daha doğru olacaktır.

Farklı motor devirlerinde ve farklı güç gereksinimlerinde, artım değeri büyüklüğü ξ değişebilmektedir. Zaman boyutu da dikkate alındığında, seçilen amaç fonksiyonunu, optimum kontrol yöntemleri ile elde edilebilir.

2.2.5. Seri tahrik sistemi (Seri Hibrit)

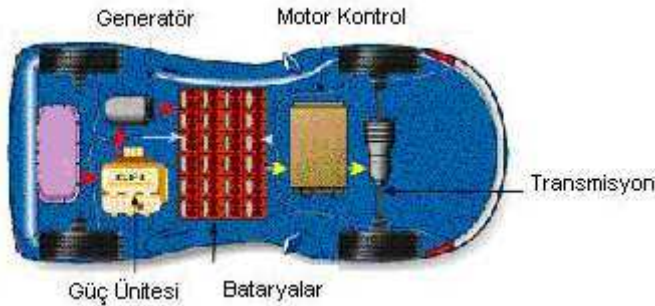
Bir seri HEA' da tekerleklerle iletilen tahrik gücü elektrik motorundan

sağlanmaktadır. Burada elektrik motoru, tahrik amacıyla elektriksel gücü mekanik güce dönüştürmektedir. Motor için gerekli elektriksel güç, elektrik enerjisini depolama aygıtlarından ya da hibrit güç ünitesinden sağlanmaktadır. Hibrit güç ünitesi İYM ve jeneratörden oluşmaktadır (Şekil 2.8).



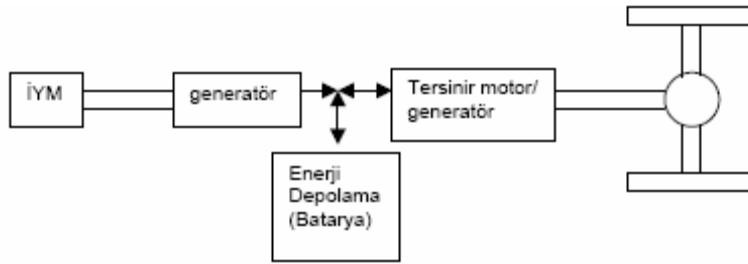
Şekil 2.8. Seri hibrit elektrikli araç tahrik sistemi blok şeması [3]

İYM + jeneratör 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-jeneratörü sürücü fren yapmak istediğinde rejeneratif mod için açar kapatır ve gücü bataryaları şarj edecek şekilde yönlendirir. Böylelikle jeneratörde üretilmiş olan elektrik enerjisi aynı zamanda bataryaları şarj etmek için de kullanılmış olur. Araç çalışırken bataryalar hem İYM-jeneratör grubu tarafından hem de rejeneratif frenleme ile şarj edilmektedir. Aynı zamanda şarj cihazları ile özellikle geceleri yaklaşık 5-8 saat içinde şarj edilir. Şekil 2.9'da bataryalı seri hibrit sistem görülmektedir.



Şekil 2.9. Seri hibrit sistem [3]

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



Şekil 2.10. Bataryalı seri hibrit sistem açık tek hat seması [3]

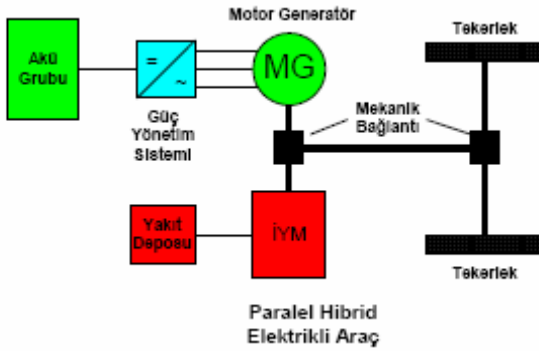
Seri hibrit sistem, yakıt pilli araca en yakın elektrikli araç konfigürasyonudur. Araç bu sayede sadece bataryalarını kullanarak hareket edebilmektedir. Ayrıca elektrik motorunun kendisi tekerlekleri tahrik edebilmektedir. Burada kavrama ya da çok kademeli güç aktarım organına gerek yoktur (Şekil 2.10). 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 jeneratördür. Jeneratör taşıt ağırlığını artırmakta ve sisteme ek maliyet getirmektedir. Ayrıca toplam sistem verimi enerji dönüşüm basamaklarının daha fazla olmasından dolayı paralel sisteme göre düşüktür.

2.2.6. Paralel tahrik sistemi (Paralel Hibrit)

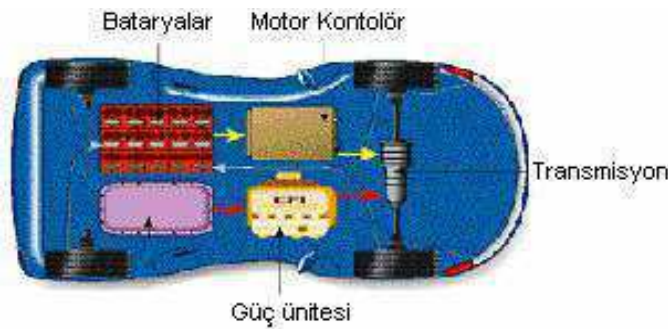
Paralel hibrit elektrikli araç, İYM ve elektrik motorunun aynı mil üzerinde

tekerleklere doğrudan mekanik bağlantı ile tahrik verdiği sistemdir (Şekil 2.11). 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 2.11. Paralel hibrit elektrikli araç tahrik sistemi [3]

Paralel tahrikli taşıtlarda geleneksel taşıtlara göre daha küçük İYM kullanılır. Toplam güç ihtiyacı ve çalışma verimine bağlı olarak denetleyici hangi kaynaktan ne kadar güç çekeceğini belirler. Denetleyici; yakıt ekonomisi, performans, zararlı gaz salımı ve menzil için geliştirilmiştir. Şekil 2.12'de paralel hibrit elektrikli araca ait akış seması görülmektedir.



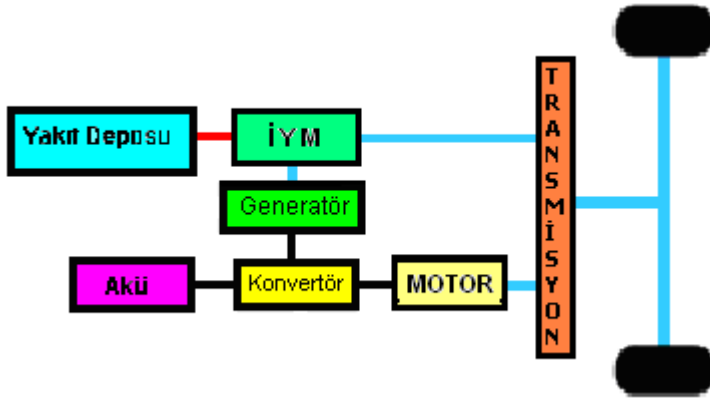
Şekil 2.12. Paralel hibrit sistemin yerleşim dizaynı [3]

Seri hibrit sistemde olduğu gibi paralel hibrit sistemde de rejeneratif frenleme ile bataryalar şarj edilebilmektedir. Paralel hibrit sistem, seri sisteme göre daha küçük kapasiteli bataryalar kullanıldığı için şarj çoğunlukla rejeneratif frenleme sırasında yapılır. Buna ek olarak sürüş esnasında da elektrik motoru jeneratör 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.

2.2.7. 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 jeneratör 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, jeneratör üzerinden aküyü ve elektrik motorunu beslemekte, ilave bir moment gerektiği zaman ise mil üzerinden elektrik motoruna destek olmaktadır. Bu anlamda, akünün elektriksel olarak üstlendiği fazlalık gücü karşılama görevine mekanik olarak ortak olmaktadır. Enerji geri kazanımlı frenleme yapıldığında elektrik makinesi motor konumundan jeneratör konumuna geçirilmekte ve sisteme depo edilen mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülüp aküde depo edilmektedir. Şekil 2.13'te seri-paralel hibrit elektrikli araçtaki tahrik sistemi blok sema halinde gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Seri-paralel hibrit elektrikli araç tahrik sistemi blok seması [9]

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.

2.2.8. Hibrit elektrikli araçların avantajları ve dezavantajları

2.2.8.1. 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, jeneratörler 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:

- Rejeneratif 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.

2.2.8.2. Hibrit elektrikli araçların dezavantajları

HEA'lar genel olarak seri ve paralel olmak üzere iki konfigürasyona ayrılırlar. Seri hibrit sistemde tekerleklere tahrik gücünü sağlayan bir elektrik motoru vardır. İYM jeneratöre 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 itme 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.

2.2.8.3. Seri hibrit sistemin dezavantajları

- Bu sistemde İYM, jeneratör 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.

2.2.8.4. 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.

2.3. Yakıt Pili Elektrikli Araçlar

2.3.1. Yakıt pili

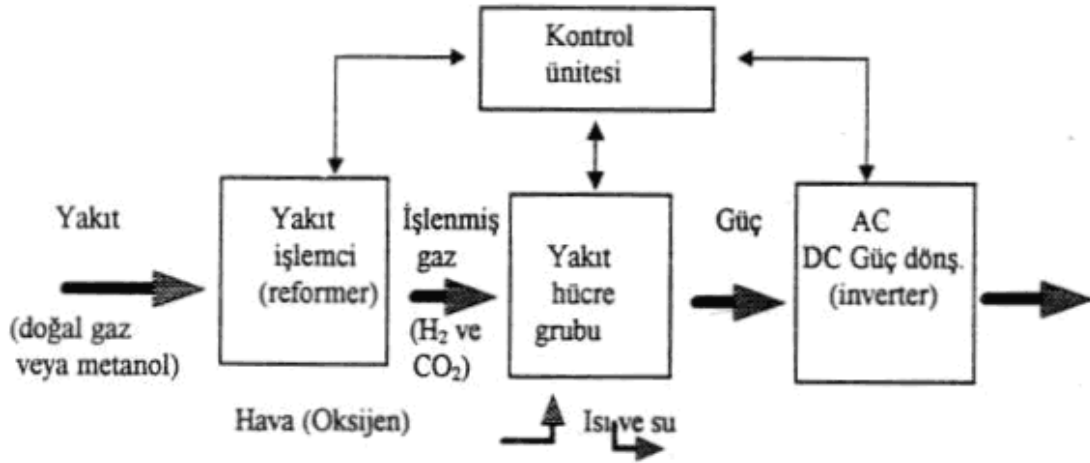
Yakıt pilleri yakıtın kimyasal enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Geleneksel teknolojilere göre daha yüksek verim ve önemli miktarda düşük emisyon üretirler. Ayrıca daha sessiz çalışırlar ve modüler bir yapıdadırlar. Son yıllarda çeşitli prototip uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Daha uzun dönemlerde yakıt pillerinin özellikle araç uygulamalarında daha da yaygın olarak kullanılabileceği 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 2.14-2.15). Yakıtta depolu bulunan enerji DC güce dönüştürülür. Bu içten yanmalı ve zararlı gaz salımsız 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 2.14. Yakıt pili içyapısı ve elektrik enerjisi üretim prensibi [10]



Şekil 2.15. Bir yakıt pili çalışma prensibinin sematik gösterimi [11]

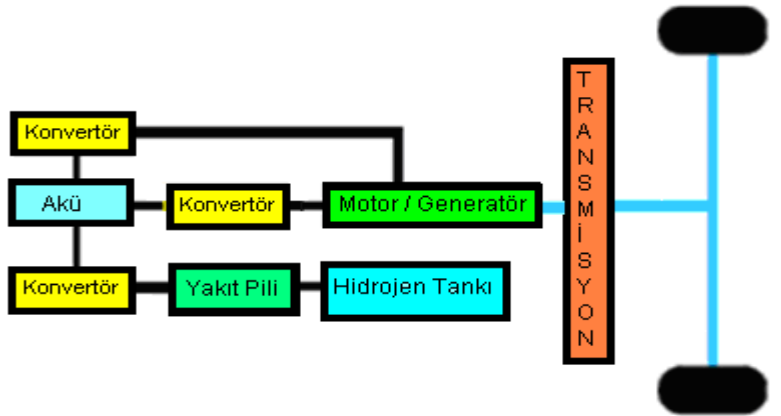
Bir yakıt pili bileşenleri ve karakteristikleri bataryaya benzese de bazı açılardan bataryadan farklıdır. Yakıt pili enerji dönüşüm cihazıdır ve bu enerji dönüştürme işlemi elektrotlara yakıt ve oksitleyici sağlandığı sürece devam edebilmektedir. Bir yakıt pilli HEA; yakıt depolama sistemi, yakıt pili-kontrol ünitesi, güç işlemci ünitesi-kontrolü ve tahrik sisteminden (elektrik motorları, vb) oluşmaktadır. Yakıt depolama sisteminde depolanan hidrojen doğrudan veya fosil kökenli yakıtların, yakıt isleme 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 arttırılır.

Yakıt pili ve elektrik motoru arasındaki güç elektroniği devresi, gerilim değerinin yükseltilmesi için DC motorlarda DC/DC çeviricisine, AC motoru için DC/AC eviricisine, kontrol için mikroişlemci/dijital sinyal işlemcisine, aşırı yüklenme şartları ve rejeneratif 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 taşınmasındadır. Bu sorunların çözümünün çok kısa bir süre içinde gerçekleşmeyeceği anlaşılmaktadır. Bu durum otomotiv firmalarının hibrit elektrikli araç teknolojisine daha çok yönelmelerine yol açmıştır. Şekil 2.16’da yakıt pilli hibrit elektrikli aracın tahrik sistemini gösteren bir şekil yer almaktadır.



Şekil 2.16. Yakıt pilli hibrit elektrikli araç tahrik sistemi [9]

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 2.1. Halen geliştirilmekte olan yakıt pilleri ve teknik değerleri [9]

| YAKIT PİLİ | PAFC | AFC | MCFC | SOFC | SPFC | DMFC |
|--|----------|---------|---------|----------|----------|-----------|
| TEK. ÖZELLİKLERİ | | | | | | |
| Çalışma sıcaklığı (oC) | 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 |
| Öngörülen ömür (kilo saat) | 40 | 10 | 40 | 40 | 40 | 10 |
| Öngörülen 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 2.1’de 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 alaşımlı 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.

2.3.2. Yakıt pili ve yakıt pilli araçların avantajları ve dezavantajları

2.3.2.1. 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.

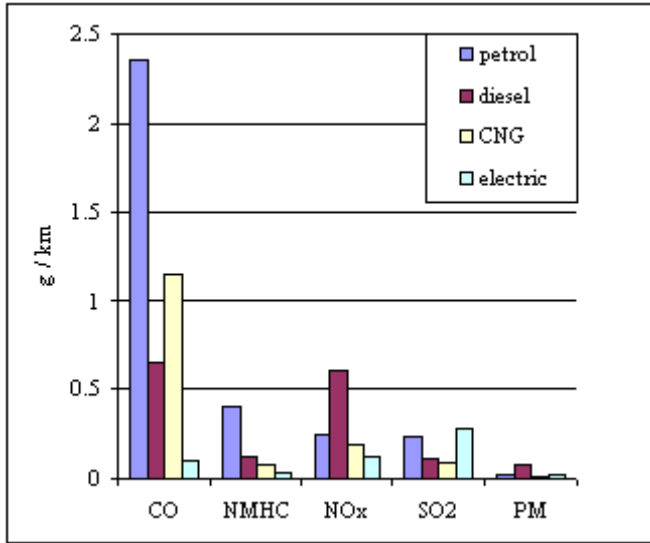
2.3.2.2. Yakıt pilli araçların dezavantajları

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 pili 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.

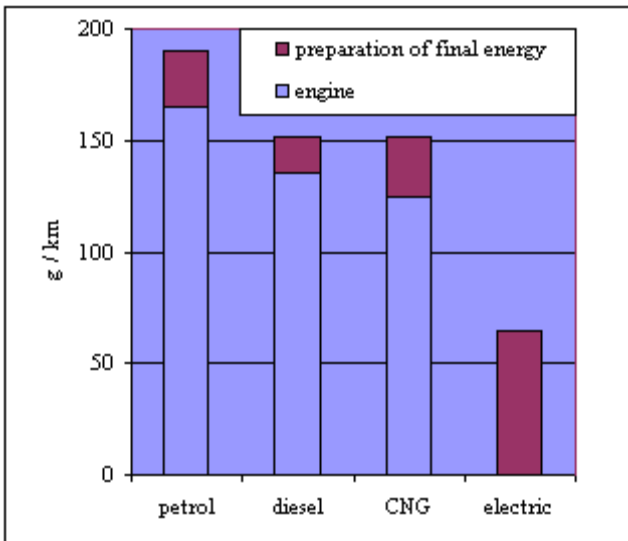
2.5. Güç Üretim Sistemi ve Zararlı Gaz Salımı

Büyük metropollerin en önemli sorunlarının basında gelen hava kirliliği üzerinde ulaşım sistemleri büyük rol oynamaktadır. İçten yanmalı motor kaynaklı zararlı gaz salımı her geçen gün sıkılaşan çevre standartların getirdiği önlemler ile azaltılmaya çalışılmaktadır. Konu hakkında önemli miktarlarda araştırma bütçeleri ayrılmaktadır. Amerikan Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından 1970 yılında yayınlanan Temiz Hava Akdi'nde hava kirliliğine neden olan 189 hava kirletici listelenmiştir. Kirletici gazlar arasında karbon monoksit, azot oksitler, sülfür oksitler, uçucu organik ve kursun temelli bileşikler yer almaktadır (Tablo 2.2 ve 2.3).

Tablo 2.2. 2002 yılında Avrupa'daki araçların zararlı gaz salım oranları (petrol, dizel, LPG, elektrik)
[13]



Tablo 2.3. 2002 yılında Avrupa'daki şehirlerde enerji üretiminin ve motorların CO2 yayma oranları
[13]



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 kullanımını ve yaygınlaşması adına önemli bir gösterge olarak kabul edilebilir.

İçten yanmalı motorlardan yayılan zararlı gaz salımları kullanılan yakıtta 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 çalınma sertleri ve yakıt cinsine göre değişiklik göstermektedir.

3. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN ALT SİSTEMLER

3.1. Hibrit Elektrikli Araçlarda Enerji Kaynakları

3.1.1. Batarya

Bataryalar, kullanılacağı alana göre tek bir hücre olarak ya da istenilen DC gerilim seviyesine göre birkaç hücrenin kaskat olarak seri bağlanması ile oluşturulmuş, elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolayan ve elektrik enerjisi ihtiyacında da, ters enerji dönüşümü ile kimyasal enerjiden elektrik enerjisini sağlayan önemli komponentlerdir. Batarya teknolojisi henüz diğer enerji kaynakları gibi yüksek enerji yoğunluğuna erişememiştir ve bu konuda çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. Zaten, batarya teknolojisinde devrim olarak nitelendirilecek çok yüksek enerji yoğunluklu ve kısa sürede şarj edilebilen bataryaların üretilmesi durumunda, tümü elektrikli araçların önü daha da açılacaktır ve daha cazip hale gelecektir. Hibrit elektrikli araçlarda batarya seçiminde, aracın hibritleşme derecesi ile birlikte kullanılan mimarinin ne olduğu da önemlidir. Kullanılacak olan bataryanın tipi, boyutu ve enerji yoğunluğu, kullanılan bataryanın tek başına ana enerji kaynağı gibi çalışmasına ya da ana bir enerji kaynağına destek görevi göreceğine göre değişiklik göstermektedir. Kullanılan bataryanın birincil enerji kaynağı ve enerji deposu olarak öne çıktığı tasarımlarda, üzerinde kullanılacağı aracın maksimum güç ve enerji ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde boyutlandırılması gerekmektedir. Hibrit elektrikli araçlar için batarya seçiminde dikkate alınacak bazı batarya parametreleri aşağıdaki gibi açıklanabilir.

3.1.1.1. Batarya kapasitesi

Batarya üzerinde depolanabilecek olan enerjinin bir ölçüsüdür. Ancak bataryaların kapasitesinden bahsederken tek bir rakamsal ifade söylenememektedir. Batarya kapasitesinden bahsedilirken, bataryanın yaşı, deşarj oranı, sıcaklık ve batarya tipi

dikkate alınmalıdır. Batarya kapasitesi ile ilgili olarak temel olarak Amper-Saat(Ah) terimi kullanılmaktadır. Ah olarak verilen batarya kapasitesi bilgisine göre, bataryanın belirlenen akım değeri için ne kadar süre ile o akımı sağlayabileceğini gösterir. Batarya kapasitesinin enerji olarak bir başka ifadesi de kWh şeklindedir. Bataryanın nominal uç gerilimi ile Ah kapasitesinin çarpılması ile elde edilmektedir ve bataryanın tamamen şarj olması için gerekli olan enerjinin bir ifadesidir.

3.1.1.2. Batarya uç gerilimi

Bataryayı oluşturan kaskat bağlanmış hücrelerin toplamda oluşturduğu gerilim seviyesidir. Bataryanın nominal uç gerilimi, araçta kullanılacak elektrik motorlarını sürecektir elektrik motoru sürücülerini ile uyumlu olması gerekliliğinden dolayı önemlidir. Genellikle 250V ile 400V gerilim seviyelerinde bataryalar kullanılmaktadır. Uç gerilimi genellikle şarj halindeki batarya için verilmektedir. Bataryanın deşarj durumunda uç geriliminin, batarya şarj durumu ile birlikte düşeceği aşikârdır.

3.1.1.3. Batarya şarj-deşarj çevrim sayısı

Bataryaların kimyasal yapısı sebebi ile tamamıyla deşarj edilmeleri, bataryaların ömrünü kısaltmaktadır. Batarya üreticileri tarafından, bataryanın toplamda kaç şarj-deşarj çevrimine cevap verebileceği bilgisi verilmektedir. SOH(State-Of-Health) olarak ifade edilen batarya sağlığı, ilerleyen şarj-deşarj çevrimleri sonucunda düşmektedir. Örneğin %80 DOD(Depth-Of-Discharge) batarya deşarj derinliği ile kullanılan bir batarya için 300 şarj-deşarj çevrimi ön görülürken, %50 DOD batarya deşarj derinliği ile kullanılan bir bataryada 600 şarj-deşarj çevrimi öngörülebilmektedir.

3.1.1.4. Enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu

Enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu bilgileri, bataryanın birim ağırlığı için elektrik enerjisi olarak sağladığı güç ve enerjinin ölçüsüdür. Batarya türleri ve teknolojileri arasındaki en kritik fark enerji ve güç yoğunluklarıdır. Batarya boyutlandırması sırasında araç ağırlığına etkisi sebebi ile batarya türü seçiminde önemli bir kıstastır.

Tablo 3.1. Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan batarya türleri ve karşılaştırma

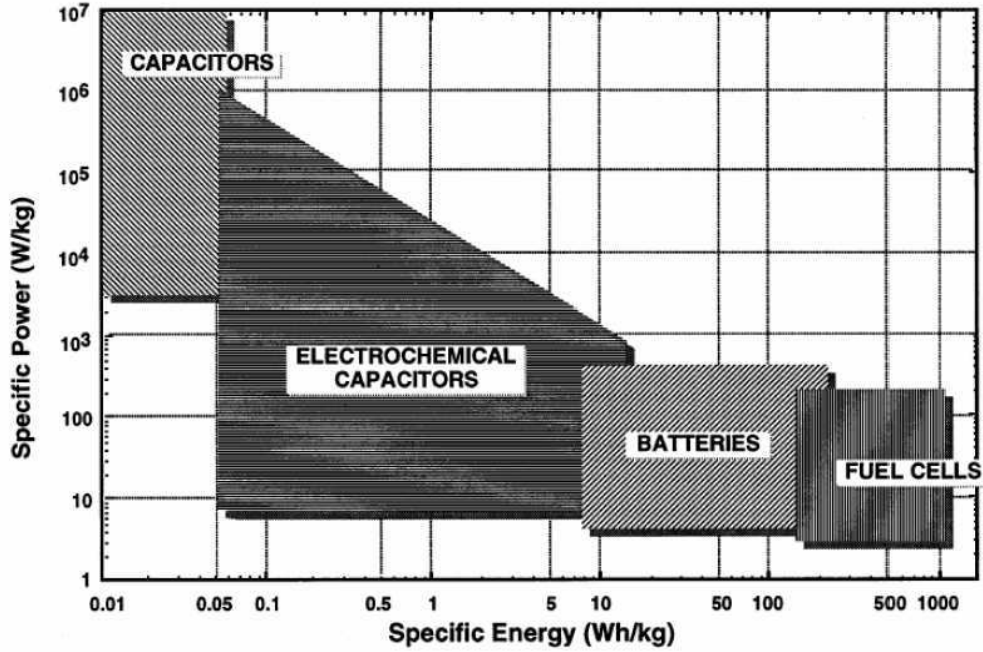
| Batarya Tipi | Enerji Yoğunluğu [Wh/kg] | Güç Yoğunluğu [W/kg] | Çevrim Ömrü | Teknolojik Durum | Şimdiki Maliyeti [\$/kWh] | Gelecek Maliyeti [\$/kWh] | Üreticiler | Kullanıldığı Araçlar | Diğer Bilgiler |
|----------------------|--------------------------|----------------------|-------------|------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--|---|
| Kurşun Asit | 25 - 30 | 75 - 130 | 200 - 400 | Üretimde | 100 - 125 | 75 | Trojan, Hawker, Exide, Interstate | CARTabus, Solectria E10 | |
| Gelişmiş Kurşun Asit | 35 - 42 | 240 - 412 | 500 - 800 | Üretimde | | | Delphi, Horizon, Electrosource | Audi Duo, GM EV1(VLRA), Solectria Force | Potansiyel Gelişme: 55Wh/kg, 450 W/kg, 2000 çevrim ömrü |
| Nikel Metal Hidrür | 50 - 80 | 150 - 250 | 600 - 1500 | Prototip | 525 - 540 | 115 - 300 | Panasonic, Ovonic, SAFT | Toyota RAV4-EV, Toyota prius, Chrysler Epic Minivan, Honda EV, Chevy S10 | Potansiyel Gelişme: 120 Wh/kg, 2200 çevrim ömrü |
| Nikel Kadmiyum | 35 - 57 | 50 - 200 | 1000 - 2000 | Üretimde | 300 - 600 | 110 | SAFT | WWU Viking 23 | Potansiyel 2200 çevrim ömrü |
| Lityum İyon | 100 - 150 | 300 | 400 - 1200 | Prototip | | | SONY, SAFT | Nissan Altera EV | Potansiyel 1000 Wh/kg |
| Lityum Polimer | 100 - 155 | 100 - 315 | 400 - 600 | Prototip | | 100 | | | |

Tablo 3.1’de hibrit elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların performans kriterlerine göre karşılaştırılması görülmektedir. Günümüzde, hibrit elektrikli araçların tasarımı ve üretiminde ağırlıklı olarak NiMH ve Li-Ion bataryalar yüksek enerji yoğunluklarından dolayı tercih edilmektedirler. Maliyet olarak henüz istenilen sayıda üretimleri gerçekleştirilemediğinden dolayı dezavantajları olsa da, yakın zamanda bu batarya türlerine olan taleplerin artması ve tümü elektrikli araçların seri üretime geçmesi ile birlikte maliyetlerinin kabul edilebilir seviyelere düşeceği öngörülmektedir. Halen, Lityum batarya türleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Çalışmaların odak noktasında ise kısa sürede şarj edilebilme potansiyeli ve yüksek enerji yoğunluğu kıstasları yer almaktadır.

3.1.2. Süperkapasitörler ve ultrakapasitörler

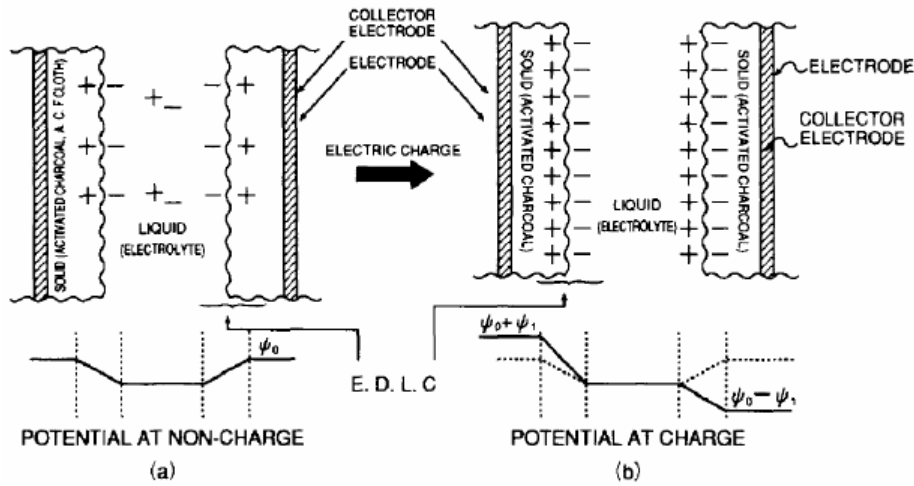
Süperkapasitörler (supercapacitor) ticari adını Japon üretici firma olan Nippon Electric Company (NEC) firmasından almıştır. Ultrakapasitörler ise Amerikan şirketi Pinnacle Research Institute (PRI) tarafından üretilmektedirler. Teknik terim olarak her ikisi de elektrokimyasal çift tabakalı kapasitör (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 3.1'de enerji depolayan elemanların belirli enerji ve belirli güç durumlarındaki durumları gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Enerji depo eden (kapasitörler, süper ve ultrakapasitörler, bataryalar, yakıt pilleri) elemanların özel durumlardaki ihtiyaçlarına göre birbirleri ile karşılaştırılması [14]

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 (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. EDLC sistemlerinin elektrik yükü ile nasıl yüklendiklerini gösteren sema [14]

Kapasitörler enerjiyi pozitif ve negatif elektostatik 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 10^6W/m^3 ve 10^4Wh/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 elektostatik yükler iyonlar şeklinde elektrolitte depolanmaktadır. Devam eden araştırmalar 4000W/kg ve 15Wh/kg civarında kapasiteye sahip kapasitörlerin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Süperkapasitörlerin primer enerji kaynağı olarak HEA'larda kullanılması için enerji yoğunluklarının

artırılması gereklidir. Tablo 3.2’de kursun asit batarya, volan ve süperkapasitörün mukayesesi gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Kursun-asit batarya, volan ve süperkapasitörlerin birbirlerine göre teknik özelliklerinin karşılaştırılması [3]

| Enerji Kaynakları | Kursun-asit | Volan | Süperkapasitör |
|----------------------------------|--------------------|--------------|-----------------------|
| Teknik Özellikler | | | |
| Özgül enerji (Wh/kg) | 50 | 5-15 | 3-5 |
| (kJ/kg) | 180 | 18-55 | 11-18 |
| 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.

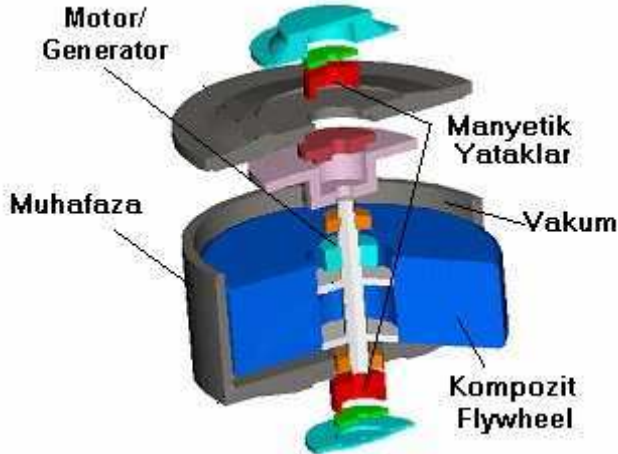
3.1.3. Volanlar

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 3.3). 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 3.3. HEA kullanılan enerji depolama elemanlarından volanın yapısı [3]

Volanlar az bakım gerektirir ve fiyat yönünden bataryalardan daha avantajlıdır. Diğer teknolojilerden fazla olarak birçok avantaj sağlar. Bir sıra kursun 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 3.3'te volan enerji depolama sisteminin hibrit elektrikli araçlarda yoğun olarak kullanılan kursun-asit bataryaya göre karşılaştırılması yapılmıştır.

Tablo 3.3. Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan volan enerji depolama sisteminin kursun-asit bataryaya göre karşılaştırılması [3]

| Özellikler | Kursun-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 hızına bağlıdır. Bunun yanında yüksek dönme hızı özel yataklar ve yüksek mukavemetli malzemeler gerektirdiğinden maliyetleri artırmaktadır.

Volanlarda depolanan enerji;
$$U = \frac{1}{2} Jw^2$$

Burada J atalet momenti, w ise açısal hızdır.

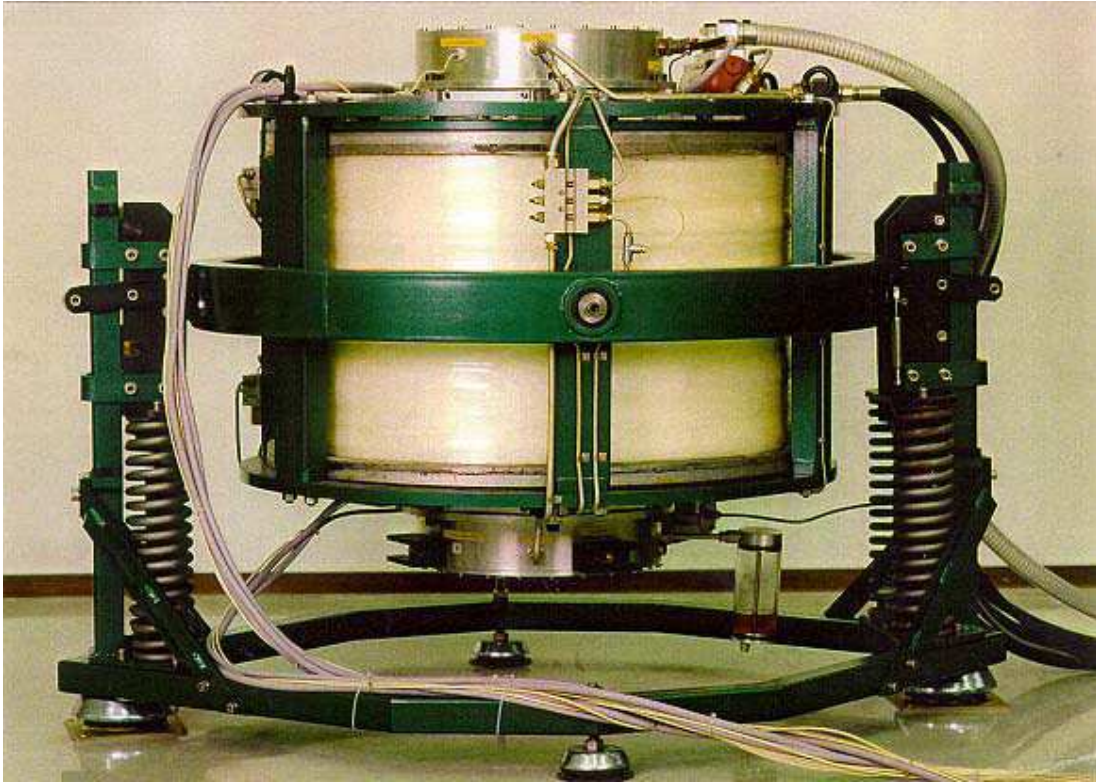
Depolanan enerji atalet momenti ile doğru, açısal hızın ise karesiyle doğru orantılı olarak artar.

Birim kütle başına depolana enerji;
$$\frac{U}{m} = k \frac{\sigma}{\rho}$$

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 çıkarmaz, 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 3.4). Özellikle Magnet-Motor firmasının ürettiği volanlar 1988'den beri Avrupa'nın çeşitli başkentlerinde dizel elektrikli trolleybüs vb. araçlarda güvenle kullanılmaktadır.

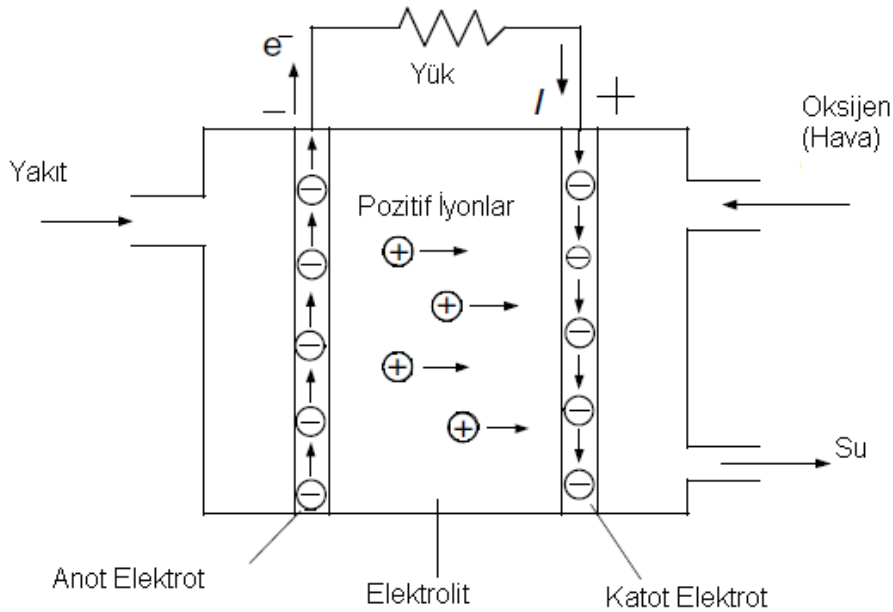


Şekil 3.4. CCM firmasının Emafer adını verdiği volan sistemi [3]

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.

3.1.4. Yakıt pilleri

Yakıt pilleri, bataryalar gibi enerji depolayan elemanlar değil enerji üreten elemanlardır. Yakıt pilli araçlar, enerji kaynağı olarak sadece batarya kullanan tümü elektrikli araçlar gibi menzil sorunu ve uzun şarj süresi sorunu yaşamazlar.



Şekil 3.5. Yakıt pili yapısı

Yakıt pillerinde reaksiyona giren elementler hidrojen ve oksijendir. Yakıt pilinin çalışma mantığı, suyun elektrolizinin tersi gibi düşünülebilir. Hidrojen anot elektrota, oksijen ise katot elektrota gönderilir. Elektron geçişine izin vermeyen elektrolit yalnızca hidrojen iyonunun geçişine ve katot elektrota ulaşmasına izin verir. Elektron ise harici bir devreden katoda iletilir. Katotta, buraya gönderilen O₂ elektrolit

üzerinde gelen hidrojen iyon ve dış devreden gelen elektron reaksiyona girerek çevrim tamamlanır. Açığa ise emisyon olarak saf su çıkar. Dış devre üzerindeki elektron hareketi ise elektrik akımını oluşturur. Bu akım doğru (DC) bir akımdır. Reaksiyon sonucu ayrıca ısı enerjisi de elde edilir.

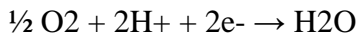
Yakıt pillerinin birden fazla çeşidi olmasına karşın elektrikli araçlar için en uygun olanı “Proton Elektrolit Membranlı Yakıt Pili”dir. PEM yakıt pillerinin, yüksek güç yoğunluğu, düşük çalışma sıcaklığı(90⁰ -120⁰) ve nispeten düşük maliyeti temel avantajlar arasındadır. PEM yakıt pilleri üzerine yürütülen araştırmalar sonucunda, yakıt olarak sıkıştırılmış hidrojenin kullanıldığında yardımcı ekipmanları dahil 500 Wh/kg özgül enerji seviyesine ulaşılmıştır. Söz konusu değer hiçbir batarya tipi için teknik açıdan mümkün değildir. Ancak 50-180 W/kg seviyelerinde olan özgül güç değeri, pik yüklerin karşılanmasında yetersizdir. Bu durum PEM yakıt pillerinin elektrikli araçlarda tek başına bir güç kaynağı olarak kullanılmasını engellemektedir. Kısa ön ısınma süresi ve düşük korozyon riski, PEM yakıt pillerinin elektrikli araçlarda kullanımını destekleyen önemli avantajlardandır [3].

PEM yakıt pillerinde ortaya çıkan kimyasal reaksiyonlar şu şekildedir:

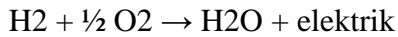
Anotta:



Katotta:

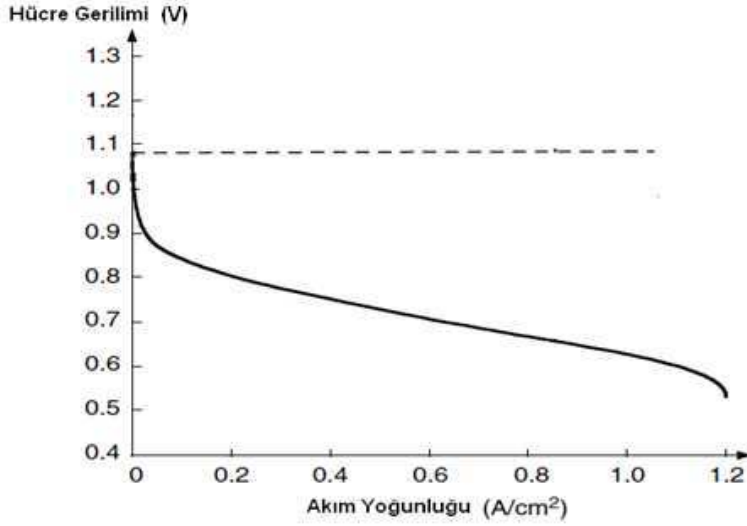


Bütün Reaksiyon:



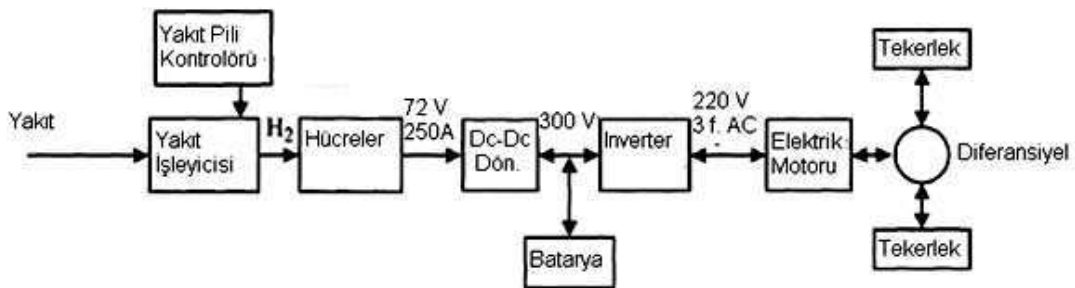
Yakıt pilinde anot, katot ve elektrolitten oluşan her bir birime “Membran Elektrot Grubu” (MEA)denir. Her bir MEA’ den sağlanan elektriksel gerilim değeri 1,2 volt seviyelerinde iken bu değer gerçek değer olarak 1 voltun altına düşer. Yüksek gerilim elde etmek için ise her bir MEA seri olarak bağlanır ve istenilen gerilim düzeyine ulaşılır. Bu sisteme Yakıt Pili Ünitesi adı verilir. Daha yüksek akım elde etmek içinse temelde yüksek akımlara ulaşmak için reaksiyona giren molekül sayısını arttırmak gereklidir. Bu ise anot, katot ve elektrolit yüzeylerinin arttırılması ile sağlanır.

Yakıt pili gerilimi, çekilen akım miktarına bağlı olarak değişmektedir. Akım ve gerilim arasındaki ilişkiyi gösteren bir grafik Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Yakıt pili akım/gerilim karakteristiği [15]

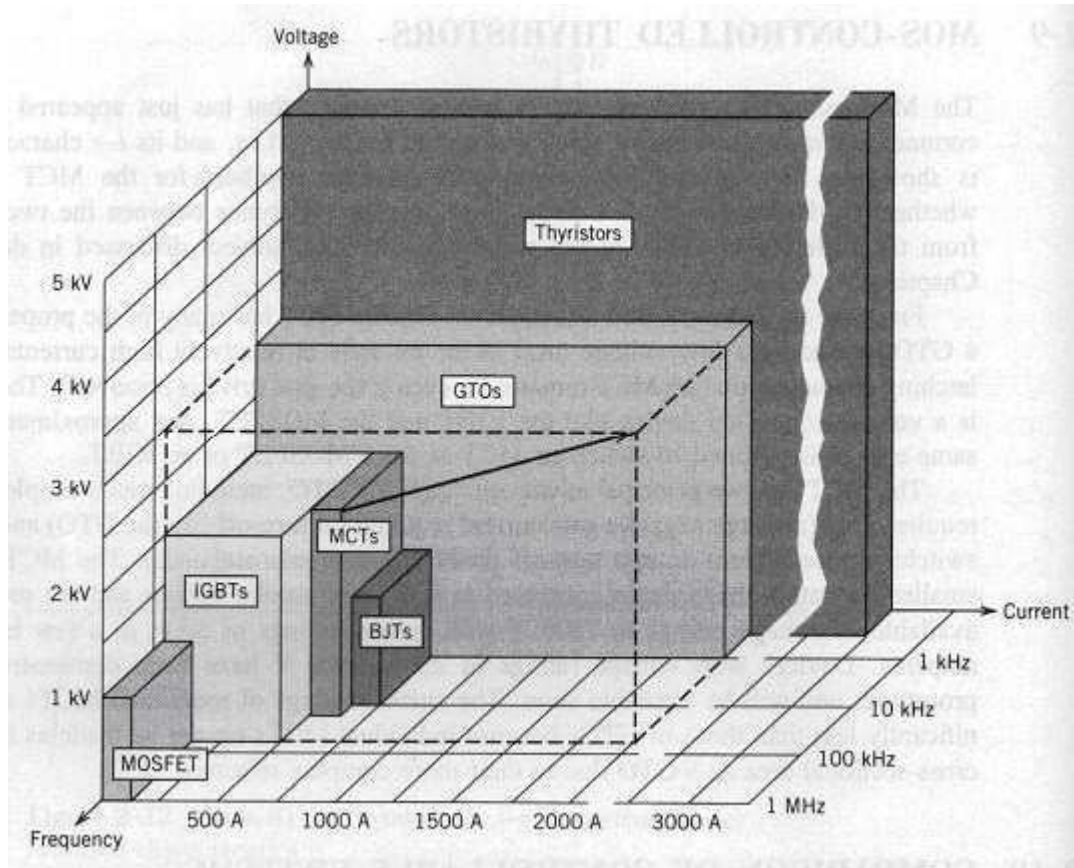
Şekil 3.7'de yakıt pilli bir elektrikli aracın yapısı görülmektedir. Yakıt pili çıkışı invertere bağlanmadan önce bir DC-DC dönüştürücü ile yükseltilmiştir. Akım ve gerilim değerleri keyfi olarak seçilmiştir. Ayrıca aşırı yük ve transient durumları için batarya kullanılmıştır. Batarya rejeneratif frenleme ile ya da yakıt pilinden sağlanan enerji ile şarj olur. Yakıt pili, düşük gerilim yüksek akımlı çıkış karakteristiğinden dolayı yükteki değişimlere aşırı duyarlıdır. Yakıt pili kontrolörü akım ve gerilim bilgilerini kullanarak hücelere girecek hidrojen miktarını ayarlar [16].



Şekil 3.7. Yakıt pilli elektrikli araç yapısı[16]

3.2. 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 3.8).



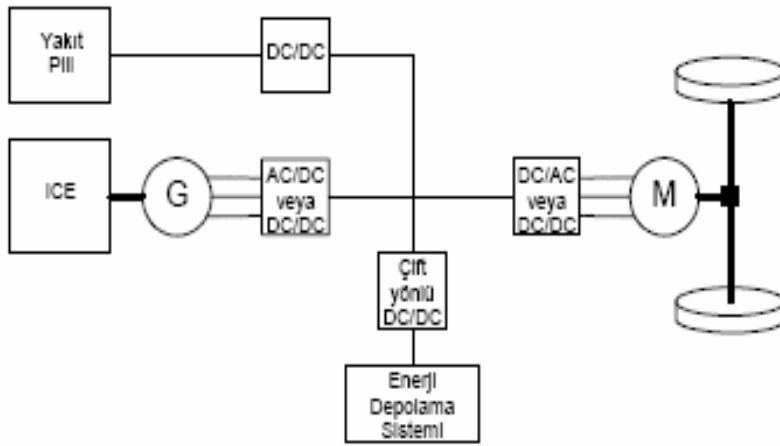
Şekil 3.8. Güç elektroniğinde kontrol amaçlı kullanılan yarı iletken güç elemanlarının akım, gerilim ve anahtarlama frekanslarına göre karşılaştırılması [11]

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 3.9'da 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),
- Kıyıcılar (AC/AC)'dır.



Şekil 3.9. Hibrit elektrikli güç sistemi [3]

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

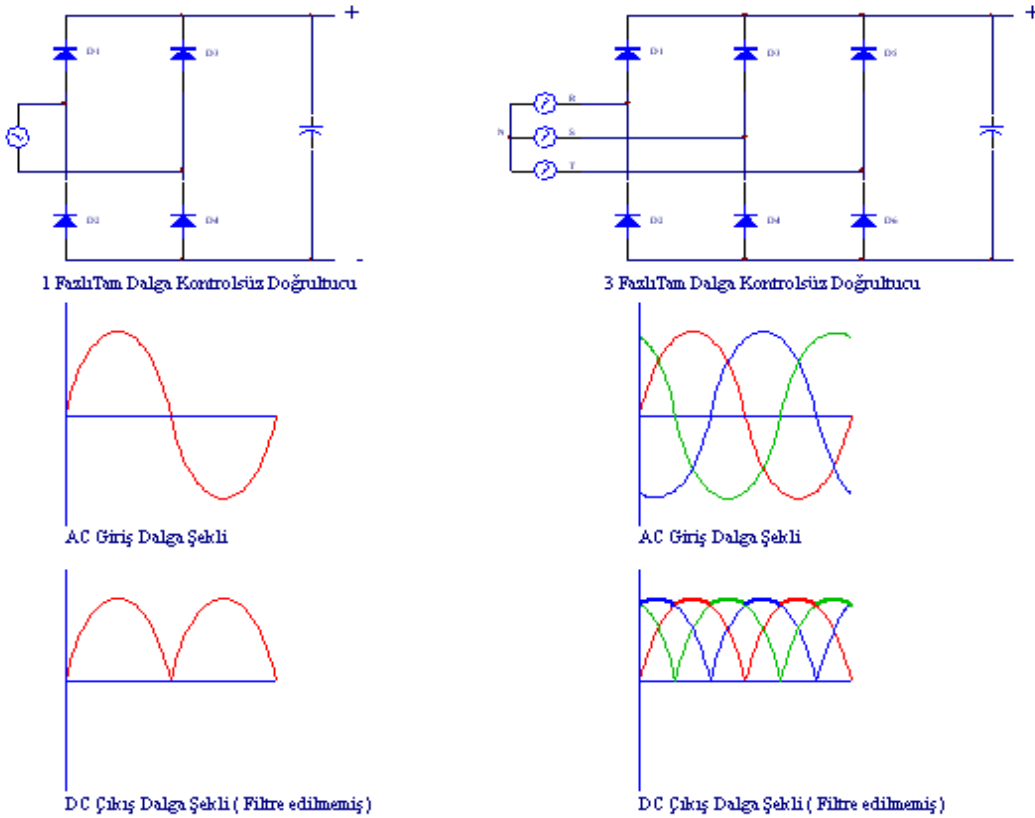
3.2.1. AC/DC dönüştürücüler (Doğrultucular)

Alternatif gerilimin doğru gerilime dönüştürülmesinde doğrultucular kullanılmaktadır. 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.

HEA' larda doğrultucular ve DC/DC dönüştürücüler, AC jeneratör 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.

3.2.1.1. Kontrolsüz doğrultucular

Kontrolsüz doğrultucularda, yarı iletken anahtar olarak diyotlar kullanılmaktadır. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan doğrultucu türleri köprü doğrultuculardır. Şekil 3.10'da 1 ve 3 fazlı köprü doğrultucu devre seması görülmektedir.



Şekil 3.10. Bir/Üç fazlı köprü tipi kontrolsüz doğrultucu [17]

Bir fazlı doğrultucu öreğinden yola çıkarsak AC gerilimin pozitif olduğu sürede D1-D4 diyotları, negatif olduğu sürede ise D2-D3 diyotları ilettime geçmekte ve çıkıştaki kondansatörü doldurmaktadır. Çıkış gerilimindeki dalga şekli, kullanılan kondansatörün değerinin arttırılması ile değiştirilebilir.

Şekil 3.10'da görülen doğrultucu devresinin çıkış gerilimi, giriş geriliminin tepe değerine eşittir.

$$V_{ac} = \sqrt{2} V_{rms} \cdot \sin(\alpha) = V_m \cdot \sin(\alpha) \quad (3.1)$$

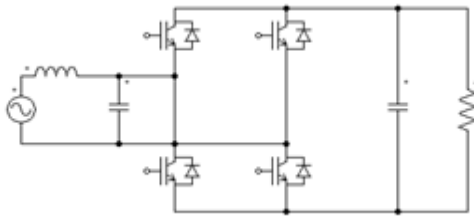
$$V_{dc} = V_m \quad (3.2)$$

Üç fazlı kontrolsüz doğrultucu devre seması Şekil 3.10'da görülmektedir. Çıkışta elde edilen gerilim değeri şu formülle hesaplanır;

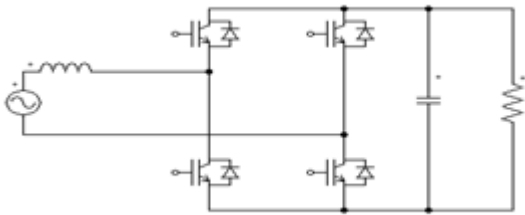
$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \quad (3.3)$$

3.2.1.2. 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. Aşağıda bir fazlı kontrollü doğrultucuların şematik resmi görülmektedir.



Şekil 3.11. Bir fazlı kontrollü Buck tipi doğrultucu [17]



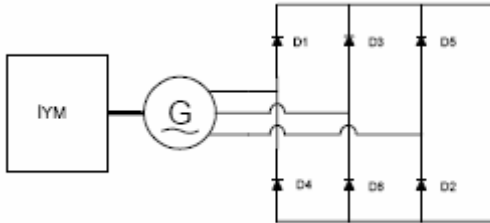
Şekil 3.12. Bir fazlı kontrollü Boost tipi doğrultucu [17]

Kontrollü doğrultucularda, anahtarların tetikleme açılarının kontrolü ile çıkış gerilimi sabit bir değerde tutulur. Bunun için çeşitli darbe genişlik modülasyonu (PWM) teknikleri kullanılmaktadır. Üç fazlı kontrollü doğrultucu için yukarıda verilen üç fazlı kontrolsüz doğrultucunun geliştirilmiş versiyonudur.

3.2.1.3. Doğrultucuların elektrikli araçlarda kullanımı

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

HEA' larda elektrik enerjisi genellikle AC çıkışlı jeneratörler ile sağlanır. Üretilen elektrik enerjisi DC baraya, doğrultucu devreleri ile bağlanır. Şekil 3.13'te İYM, jeneratör, ve DC bara bağlantısı görülmektedir.



Şekil 3.13. İYM + jeneratörün DC bara bağlantısı [17]

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.

3.2.2. DC/DC dönüştürücüler

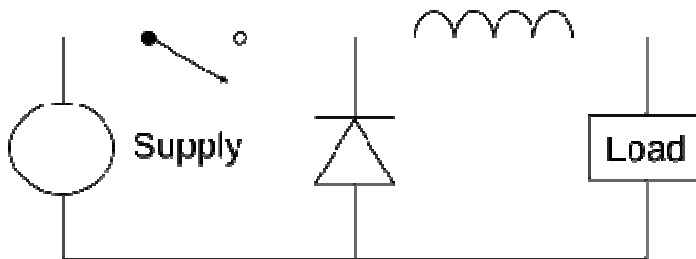
DC-DC çevirici olarak da tanımlanan çeviriciler çoğunlukla regüle edilmemiş DC gerilim kaynağının, kontrollü bir biçimde sabit DC gerilime dönüştürülmesi için kullanılırlar. Regüle edilmemiş DC gerilim, genellikle bir kontrolsüz doğrultucu ile sağlanır. Aküler ve yakıt pilleri de regüle edilmemiş DC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

3.2.2.1. Azaltan (Buck) çevirici

İsminden de anlaşılacağı üzere alçaltıcı çevirici DC giriş geriliminden daha düşük ortalama DC gerilim üretir. Temel alçaltıcı devre şeması Şekil 3.14'te görülmektedir.

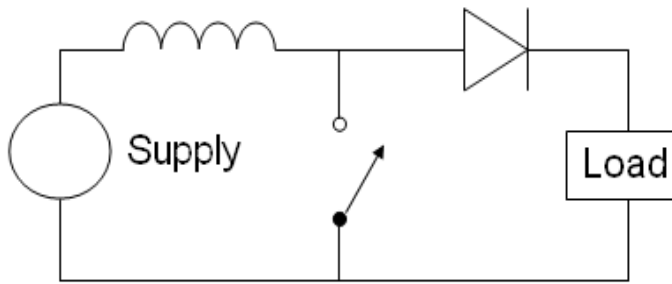


Şekil 3.14. Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan azaltan DC-DC çevirici devre şeması

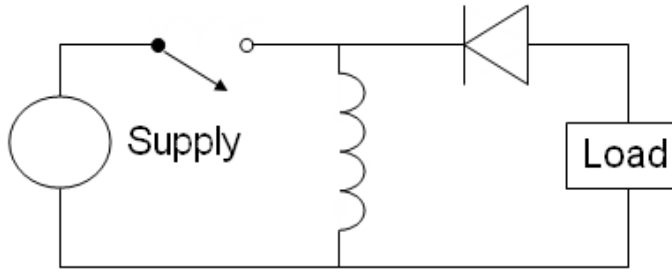
Belirli bir periyot içerisinde, yarı iletken anahtarın iletme ve kesime geçmesi ile ortalaması giriş geriliminden daha düşük bir DC gerilim elde edilir. Devrenin çıkışında bir L-C filtre bulunmaktadır. Endüktans yük akımındaki dalgalanmayı, kondansatör ise çevirici çıkış gerilimindeki dalgalanmayı azaltmak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

3.2.2.2. 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 3.15'te yükseltici DC-DC çeviricinin şematik resmi görülmektedir. Ayrıca Şekil 3.16'da buck-boost çeviricinin resmi gösterilmektedir.



Şekil 3.15. Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan yükselten DC-DC çevirici devre prensip şeması



Şekil 3.16. Azaltan-yükselten DC-DC çevirici devre şeması

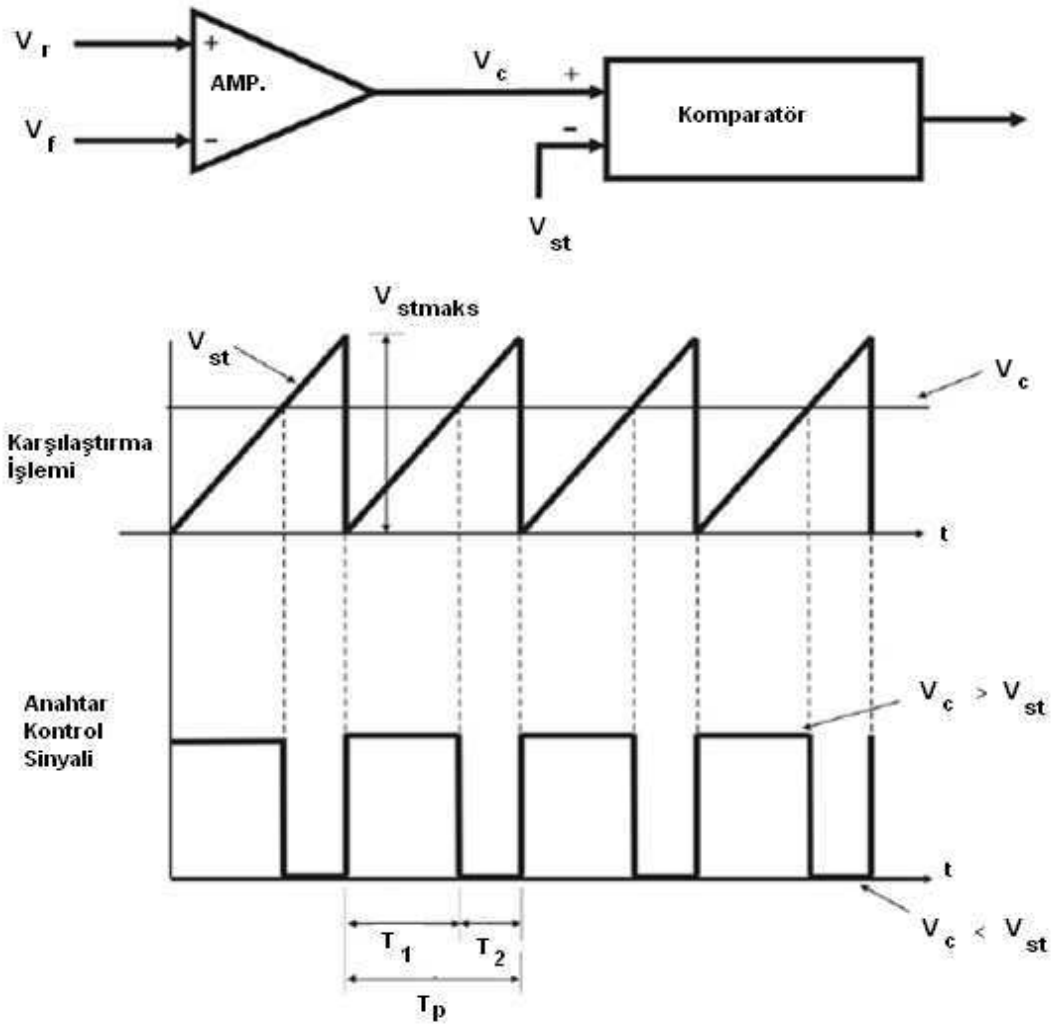
3.2.2.3. DC/DC Çeviricilerin kontrolü

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.

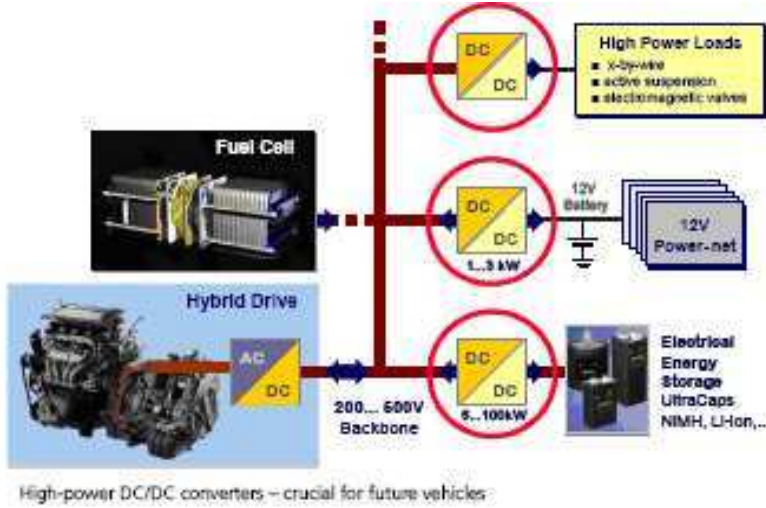
PWM işaretinin üretilmesi için çıkış geriliminden geri besleme (V_f) alınır ve istenilen gerilim seviyesinde bir referans işaretle (V_r) karşılaştırılır (Şekil 3.17). Aralarındaki fark yani hata işareti bir güçlendiriciden geçirildikten sonra, frekansı anahtarlama frekansına eşit olan testere dişli dalga ile kıyaslanır. Kontrol işaretinin (V_{st}), testere dişli dalgadan daha yüksek olduğu sürece anahtar kontrol işareti üretilir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. PWM yöntemiyle kontrol işaretinin üretilmesi [19]

3.2.2.4. DC/DC Çeviricilerin 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 3.18'de farklı seviyedeki DC gerilimlerinin paralel bağlanmasının şematik resmi görülmektedir.



Şekil 3.18. HEA farklı seviyedeki DC gerilimlerin birbirlerine paralel bağlanması [12]

3.2.3. İnverterler

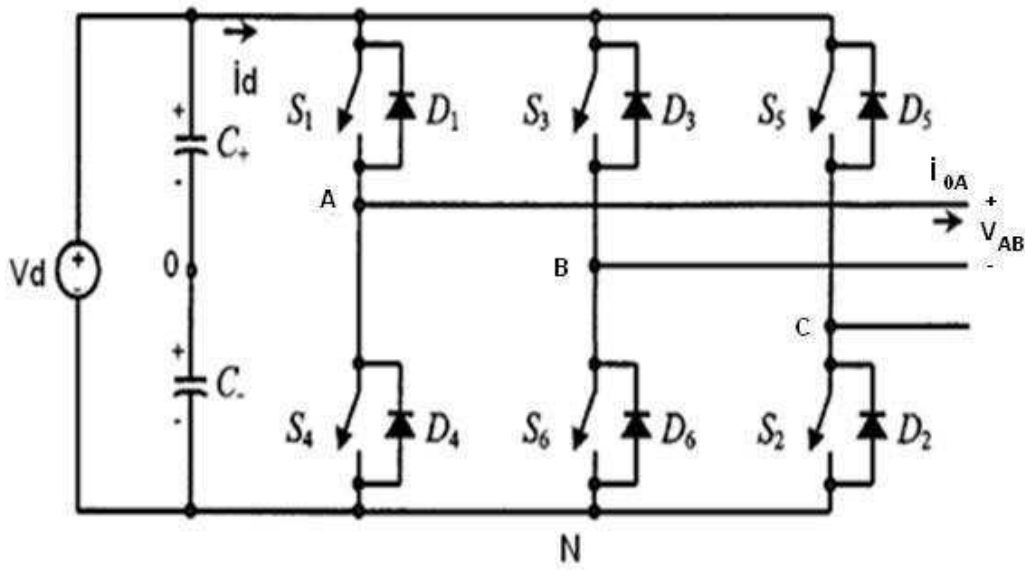
Elektrikli araçlardaki temel enerji kaynağı DC çıkış veren bataryalardır. Bu DC çıkışın istenen değerde AC çıkışa dönüştürülmesi için inverterler kullanılır. İnverter, başta araçtaki elektrik motorunun sürülmesinde kullanılır ve aracın en önemli bileşenlerinden biridir. DC hattaki büyüklüğün türüne göre inverterler temel olarak akım kaynaklı(CSI) ve gerilim kaynaklı(VSI) olmak üzere ikiye ayrılırlar. İnverterler yapıları gereği doğal olarak iki yönlü çalışabilirler.

Araçtaki esas görevi, beslediği motorun ihtiyaçlarına göre istenen genlik ve frekansta, akım ve gerilim vermek olan inverterin aşağıdaki temel ihtiyaçları karşılayabilmesi gerekmektedir.

- Arzu edilen hıza göre frekansı ayarlayabilmelidir
- Sabit moment bölgesinde hava aralığı akısını korumak için gerilimi ayarlayabilmelidir.
- Herhangi bir frekansta sürekli olarak nominal akımı sağlayabilmelidir.

3.2.3.1. Gerilim kaynaklı inverterler

Elektrikli araçta gerilim kaynaklı inverterin girişi bataryadan sağlanır. Şekil 3.19'da üç fazlı gerilim kaynaklı inverterin devre şeması görülmektedir.



Şekil 3.19. Üç fazlı gerilim beslemeli inverter [19]

İstenen çıkış dalga şeklini elde etmek için farklı teknikler uygulanabilir.

3.2.3.2. Kare dalga inverter

Kare dalga inverterlerde çıkış geriliminin dalga şeklinin bozulmaması için iletim genellikle 180° dir. Bu sistemde inverterde gerilimin genliği kontrol edilemez. İnverter çıkışındaki gerilimin kontrolü için inverter girişindeki DC gerilim kullanılır. İnverter çıkışındaki AC gerilimin efektif değeri aşağıdaki şekilde ifade edilir. Çıkış gerilimi dalga şekli, yükten bağımsız olduğu için harmonikler içerir.

$$V_{LL} = \sum_{n=1,5,7,11,13,\dots}^{\infty} \frac{4V_d}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \cdot \sin\left(n\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\right) \quad (3.4)$$

$$V_{LL1} = \frac{4V_d}{\sqrt{2}\pi} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = 0.78V_d \quad (3.5)$$

Harmoniklerin de dahil olduğu şekilde elde edilecek sonuç aşağıda verilmiştir.

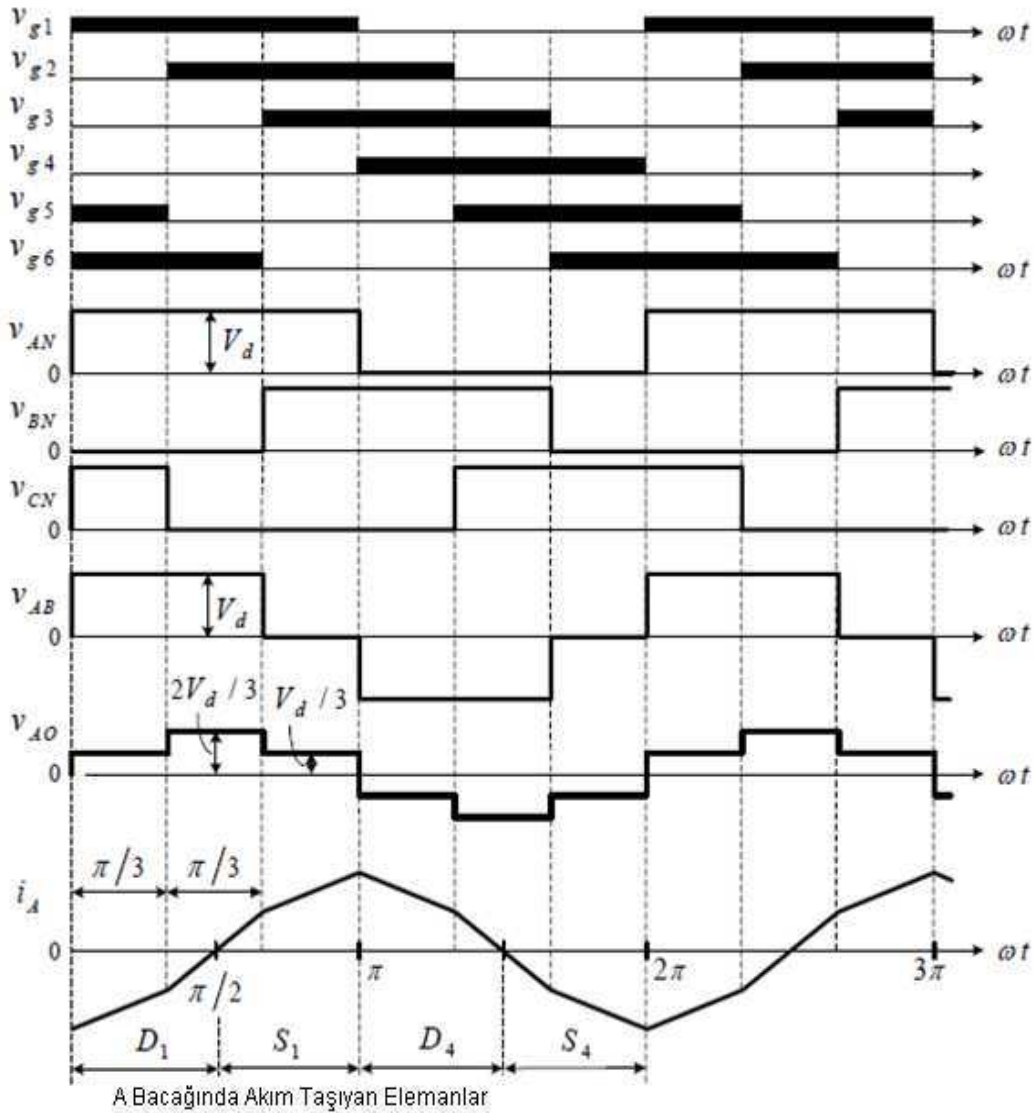
$$V_{LL} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{AB}^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

$$V_{LL} = \left[\frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{\frac{2\pi}{3}} (V_d)^2 d(\omega t) + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} (-V_d)^2 d(\omega t) \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

$$V_{LL} = \sqrt{\frac{2}{3}}V_d = 0.816V_d \quad (3.8)$$

Burada V_d , DC hat gerilimini ifade etmektedir.

Şekil 3.20'de üç faz gerilim beslemeli kare dalga inverterin anahtarlama durumları ile akım ve gerilim değişimleri görülmektedir.



Şekil 3.20. Üç Faz gerilim beslemeli kare dalga inverterin anahtarlama durumları, akım ve gerilim değişimleri [20]

3.2.3.3. PWM inverterler

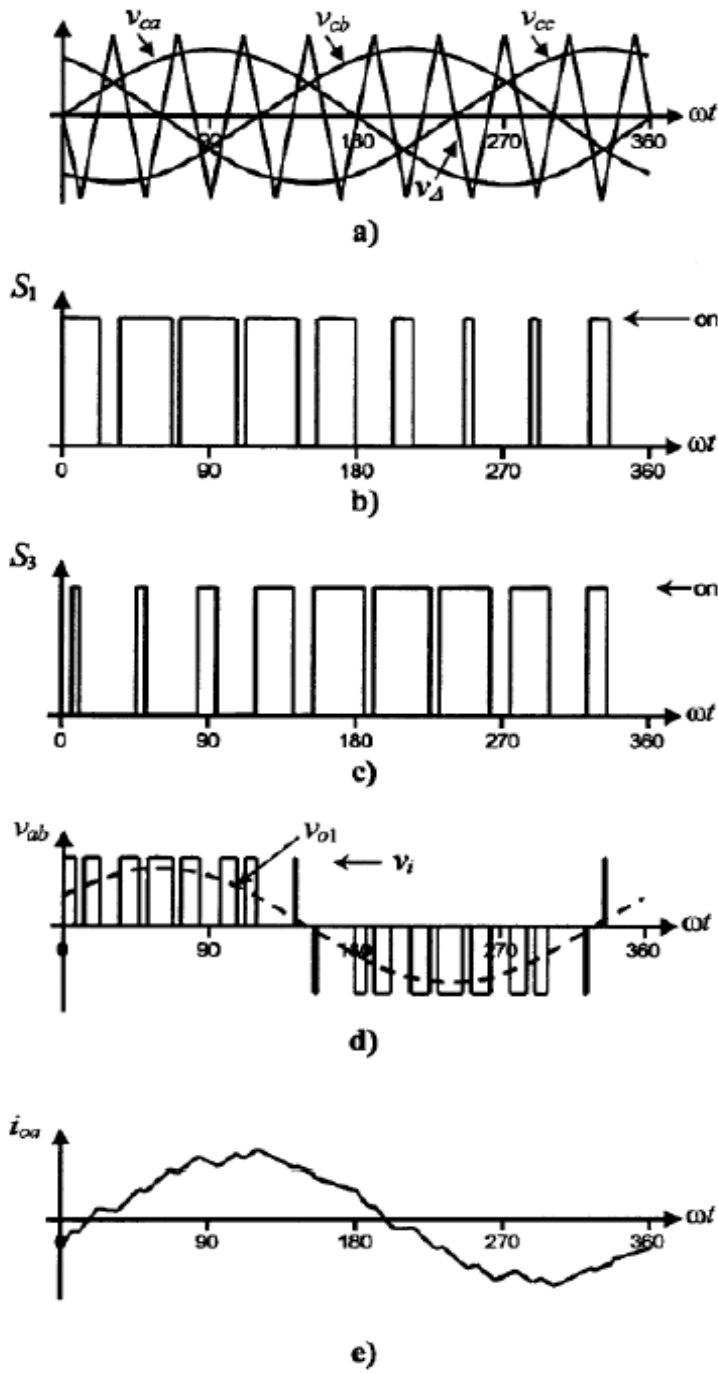
Yüksek performanslı AC motor sürücüleri darbe genişlik modülasyonlu (PWM) gerilim beslemeli inverterler (VSI) ile çalışmaktadır. Bu yöntem kullanılarak inverter ile gerilimin kontrolü mümkündür. İnverterin çıkış gerilimi gerilim darbelerinin sayı ve/veya genişlikleri değiştirilerek kontrol edilir.

Genel olarak, PWM inverterlerden beslenen AC motorların kare dalga inverterden beslenenlere göre üstünlükleri aşağıda belirtilmiştir.

- Stator akımında daha az dalgalanma ve bunun neticesinde momentte daha az darbe olması
- Kayıpların daha düşük olması
- Hızlı akım kontrolü ile yüksek dinamik performans sağlanması
- Filtre elemanlarının boyutlarının azalması
- İlave bir gerilim kaynağı kontrol ünitesi gerektirmemesi [21].

3.2.3.4. Sinusoidal PWM inverter

Bu yöntemde modülasyon sinyali olarak ayarlanabilir genlik ve frekanslı sinüsoidal dalga kullanılarak PWM çıkışlar üretilir. Sinusoidal modülasyon sinyali kullanılmasının amacı çıkış geriliminin mümkün olduğunca sinusoidal yakın olmasının istenmesidir. Değişken genlikli (V_a , V_b , V_c) üç faz referans gerilimleri (V_a , V_b , V_c), Şekil 3.21-a'da görüldüğü sabit genlikli (V_m) taşıyıcı üçgen dalga (V_{tr}) ile karşılaştırılır. Karşılaştırıcıdan çıkan 3 kontrol sinyali inverterin 3 bacağı içindir. Sinusoidal referans gerilimi (V_a , V_b , V_c) bir t anında taşıyıcı üçgen dalgadan daha büyükse S_1 , S_3 , S_5 anahtarları ilettime, S_4 , S_6 , S_2 anahtarları kesime girer. Motorun ilgili faz sargısı pozitif gerilim altındadır. Diğer yandan sinusoidal referans gerilimi taşıyıcı üçgen dalgadan daha küçükse S_1 , S_3 , S_5 anahtarları kesime, S_4 , S_6 , S_2 anahtarları ilettime girer. Motorun ilgili faz sargısı negatif gerilim altındadır. SPWM yönteminde inverter çıkışındaki gerilim dalgaları birbirinin aynı olmalı ve aralarında 120° faz farkı bulunmalıdır. Üç faz gerilimleri Şekil 3.21'de görülmektedir.



Şekil 3.21. SPWM ideal dalga şekilleri a) taşıyıcı ve modülasyon sinyalleri b) 1. anahtarın durumu c) 3. anahtarın durumu d) AC çıkış gerilimi e) AC çıkış akımı [19]

Motora uygulanan gerilimin temel bileşen frekansı, sinusoidal referans gerilim frekansı ile aynıdır. Bu yüzden, motor gerilimi frekansı, referans gerilim frekansı ile değiştirilebilir. Referans dalga genliğinin taşıyıcı üçgen dalga genliğine oranı, m , modülasyon indeksi olarak adlandırılır.

$$m = A / A_m \quad (3.9)$$

Burada A , referans dalga genliğini ve A_m , taşıyıcı dalga genliğini göstermektedir. Lineer bölgede ($m < 1$), çıkış gerilimi temel bileşeni modülasyon indeksi ile lineer olarak değişir. Şekil 3.21’de de görüldüğü gibi gerilimin tepe değeri

$$V_{AN} = m \left(\frac{V_d}{2} \right) \quad (3.10)$$

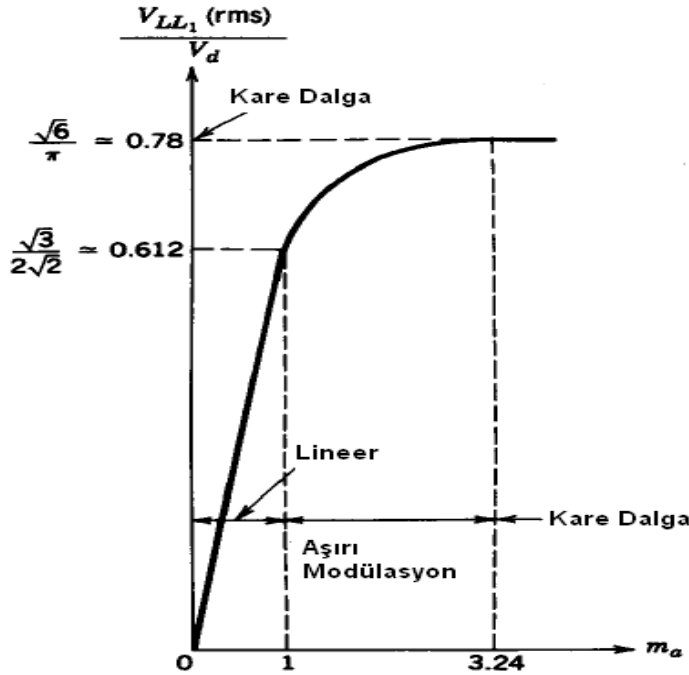
şeklinde ifade edilir.

Faz dalgasının temel bileşeni (rms) aşağıdaki şekilde ifade edilir,

$$V_{LL1} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_{AN} \quad (3.11)$$

$$V_{LL1} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m V_d \quad (3.12)$$

$$V_{LL1} = 0.612 V_d \quad (3.13)$$

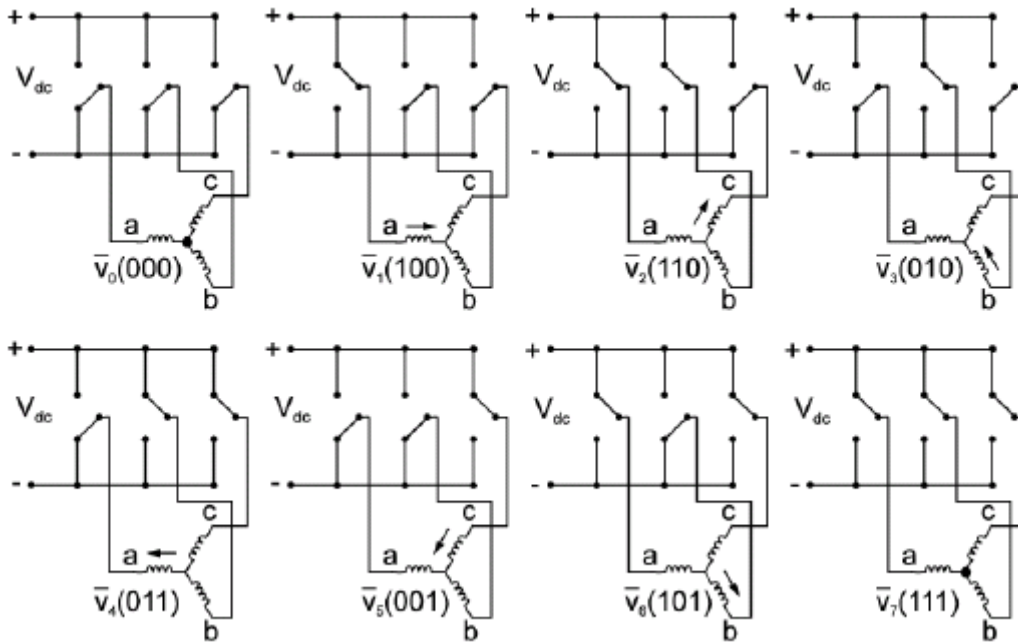


Şekil 3.22. Üç fazlı inverterde gerilim sınırları [22]

Gerilimin temel bileşeni m ile lineer olarak artar. $m > 1$ olduğunda gerilimlerdeki darbe sayısı azalır ve modülasyon sinusoidal olmaktan uzaklaşır.

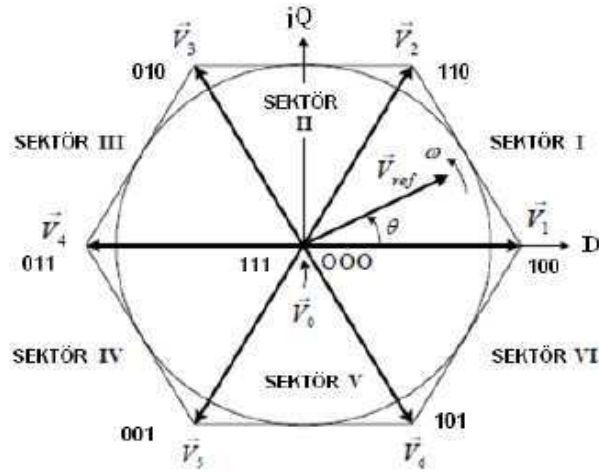
3.2.3.5. Uzay vektör PWM inverter

Uzay vektör PWM, sinusoidal PWM tekniğinde maksimum çıkış geriliminin düşük ve anahtarlama sayısının çok yüksek olması sebebiyle geliştirilen alternatif metotlardan birisidir. Üç fazlı inverterin kollarında bulunan üst ve alt anahtar aynı anda iletimde olamayacağından her kolda iki ayrı anahtar durumu olabilir. Sonuçta inverterde toplam 8 farklı anahtar durumu meydana gelir. Her bir durum neticede bir uzay vektörü oluşturur. Uzay vektör PWM yönteminde anahtarlama neticesinde ortaya çıkan uzay vektörleri uygun sıra ile motora uygulanır.



Şekil 3.23. Anahtar konumlarına karşılık gelen gerilim vektörleri [23]

Şekil 3.24'te de görüldüğü gibi V1-V6 vektörleri aktif vektörler, V0 ve V7 sıfır gerilim vektörleridir.



Şekil 3.24. Uzay vektörlerin gösterimi [20]

V_{ref} genlikli ve ω hızında dönen referans gerilim vektörünün bileşenleri aşağıdaki şekilde ifade edilir. Altıgen içinde istenen gerilim vektörü sekiz vektörün farklı kombinasyonları ile elde edilir.

İnverter faz gerilimleri aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$V_{SA} = S_a \cdot V_{dc} \quad (3.14)$$

$$V_{SB} = S_b \cdot V_{dc} \quad (3.15)$$

$$V_{SC} = S_c \cdot V_{dc} \quad (3.16)$$

Burada S_a, b, c anahtar konumunu ifade eder, 1 ya da 0 değerini alır.

Gerilim vektörünün (V_k) iki faza dönüştürülmüş ifadesi de aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} V_{Ds} \\ V_{Qs} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \frac{2\pi}{3} & \cos \frac{4\pi}{3} \\ \sin 0 & \sin \frac{2\pi}{3} & \sin \frac{4\pi}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{SA} \\ V_{SB} \\ V_{SC} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$V_k = V_{Ds} + jV_{Qs} \quad (3.18)$$

Tablo 3.4. İnverterde anahtarlama konumuna bağlı olarak VDs ve VQs çıkış gerilimleri [23]

| k | S _a | S _b | S _c | V _{Ds} | V _{Qs} |
|---|----------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | V _{dc} .2/3 | 0 |
| 2 | 1 | 1 | 0 | V _{dc} /3 | V _{dc} /√3 |
| 3 | 0 | 1 | 0 | -V _{dc} /3 | V _{dc} /√3 |
| 4 | 0 | 1 | 1 | -V _{dc} .2/3 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | -V _{dc} /3 | -V _{dc} /√3 |
| 6 | 1 | 0 | 1 | V _{dc} /3 | -V _{dc} /√3 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |

Tablo 3.4'deki sonuçlardan yola çıkarak inverterin d-q modeli aşağıdaki gibi elde edilir.

$$V_k = \frac{2}{3} V_d e^{j(k-1)\left(\frac{\pi}{3}\right)} \quad (3.19)$$

Referans gerilim vektörü Vref, Vi ve Vi+1 arasındayken sadece bu iki aktif vektör ve sıfır gerilim vektörleri kullanılmalıdır. Bu şekilde anahtarlama sayısı en aza indirilmiş olur. Bir Ts periyodunda üretilen vektörün Vref' in ortalamasına eşit olması için aşağıdaki eşitlik sağlanmalıdır.

$$V_{ref} T_s = V_k T_k + V_{k+1} T_{k+1} + V_0 T_0 \quad (3.20)$$

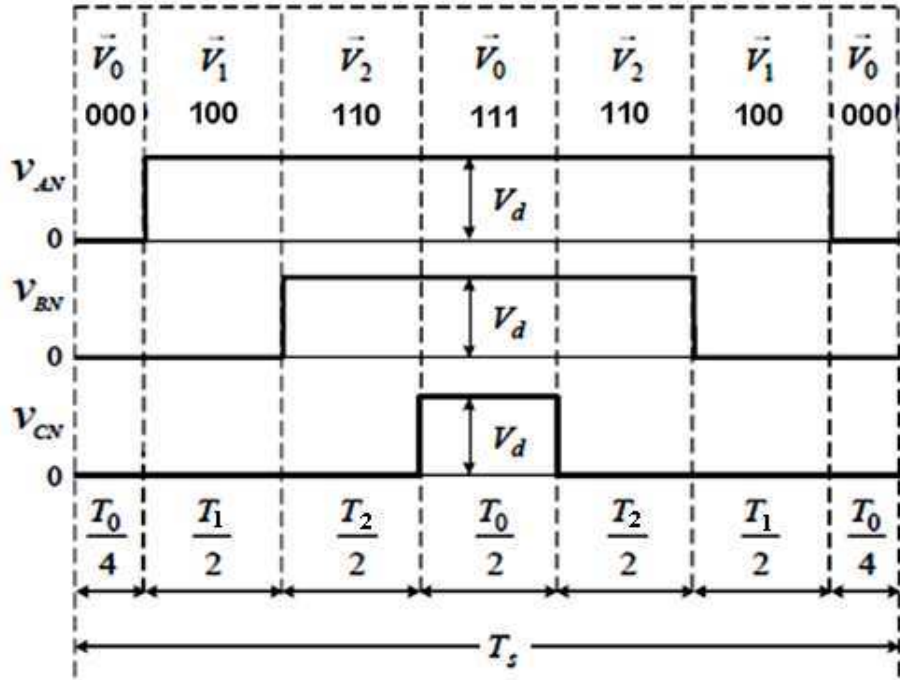
Aktif vektörlerin genliği (2/3)Vd olduğuna göre, T1 ve T2 süreleri aşağıdaki şekilde bulunur.

$$T_2 = \frac{V_{Qsref} T_s}{\frac{2}{3} V_{dc} \sin 60} = \frac{\sqrt{3} V_{Qsref} T_s}{V_{dc}} \quad (3.21)$$

$$T_1 = \frac{3 V_{Dsref} T_s}{2 V_{dc}} - \frac{T_s}{2} \quad (3.22)$$

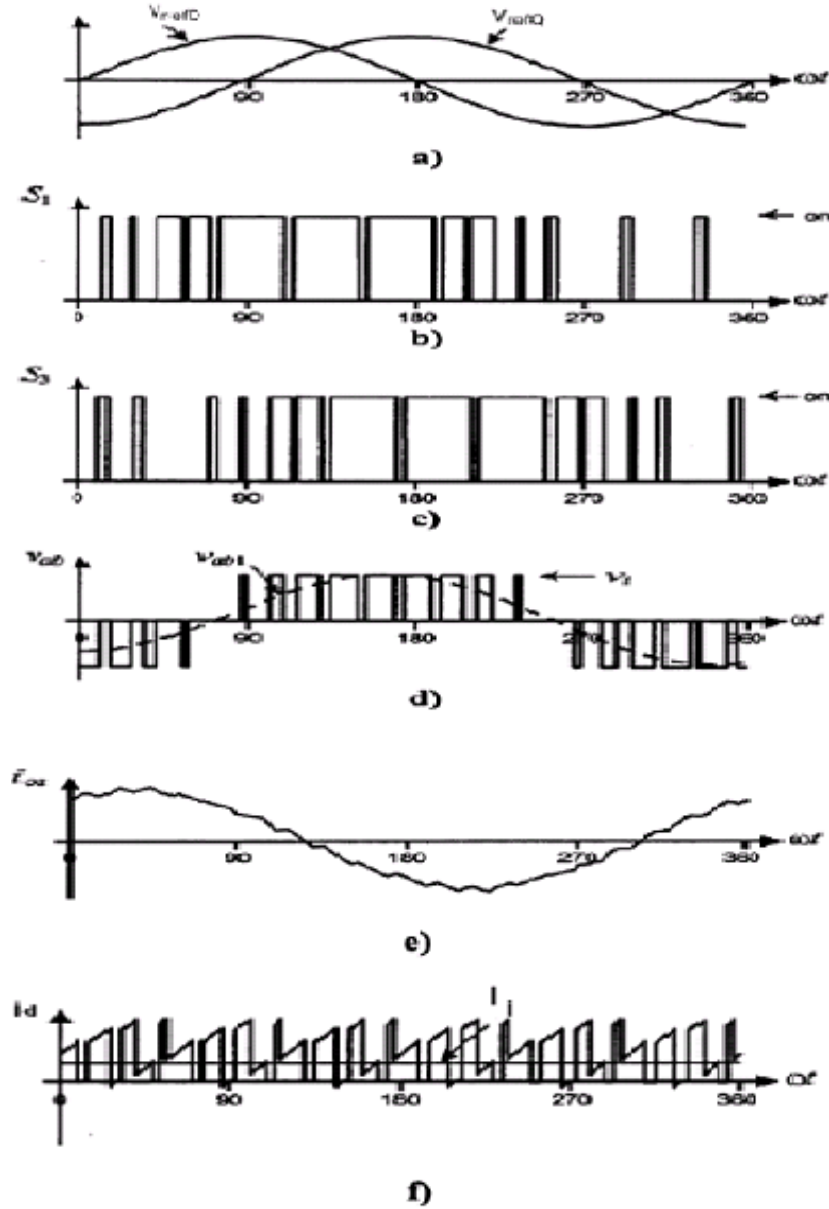
$$T_0 = T_s - T_1 - T_2 \quad (3.23)$$

Şekil 3.25'te referans gerilim vektörünün 1. Bölgede olması durumunda üretilen gerilim vektörleri gösterilmiştir.



Şekil 3.25. Referans gerilim vektörünün 1. Bölgede olması durumunda üretilen gerilim vektörleri

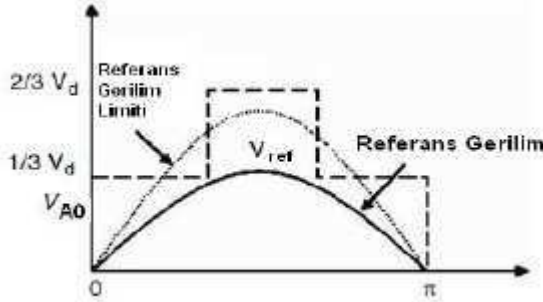
Şekil 3.26'da uzay vektör modülasyonu için ideal dalga şekilleri görülmektedir. Şekil 3.26-f'de görülen değişim DC giriş akımı ve anahtarlama frekansına bağlı harmonikleri içermektedir.



Şekil 3.26. Uzak vektör modülasyonu için ideal dalga şekilleri a) modülasyon sinyalleri b-c) anahtarlama durumları d) AC çıkış gerilimi e) AC çıkış akımı f) DC akım [19]

Uzak vektör PWM ile SPWM karşılaştırıldığında başlıca farklar, daha düşük faz akımları, güç dönüştürücüsü ve motorda azaltılmış güç dağılımı ve ısı üretimi olarak belirtilebilir. İlave olarak uzak vektör PWM tekniği faz akımlarında düşük güç dağılım ve düşük gürültü için daha az harmonikler üretir.

Şekil 3.24'te görülen altıgene içten teğet olan çember referans gerilim vektörü limitini gösterir. Şekil 3.27'de de bu durum gerilim değişimi üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Referans faz gerilim dalgası [24]

Karşılaştırmanın daha kolay yapılabilmesi için modülasyon indeksi burada referans gerilim tepe değerinin kare dalga gerilimi tepe değerine oranı olarak tanımlanmıştır.

$$m' = \frac{\hat{V}_{ref}}{\hat{V}_{1KD}} \quad (3.24)$$

Şekil 3.24'teki çember içerisinde referans gerilim vektörünün alabileceği en büyük değer (5.22) eşitliğinde verilmiştir.

$$\hat{V}_{ref} = \frac{2}{3} V_d \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = 0.577 V_d \quad (3.25)$$

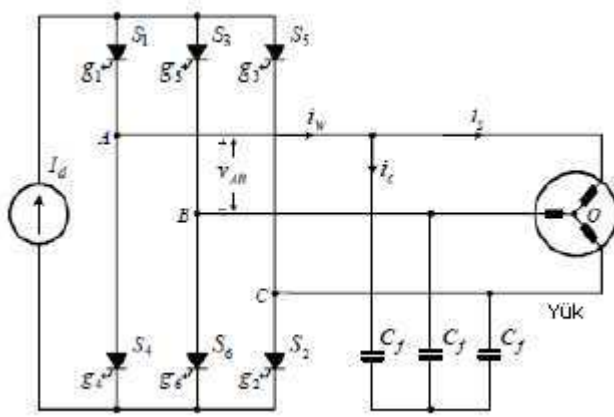
Buradan da aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$m' = \frac{\hat{V}_{ref}}{\hat{V}_{1KD}} = \frac{0.577 V_d}{\left(\frac{2}{\pi}\right) V_d} = 0.907 \quad (3.26)$$

Burada elde edilen sonuçlar neticesinde faz-faz ve efektif değerlere göre bir değerlendirme yapıldığında uzay vektör modülasyonu modülasyon oranı sınırı kare dalga ve sinusoidal PWM' in arasında, 0.907 değerinde olduğu görülmektedir [24]. Uzay vektör PWM kullanıldığında, aynı DC bara gerilimi ile sinusoidal PWM'e göre motor sargılarına daha fazla gerilim verir. Bu da DC bara geriliminden daha verimli faydalandığını gösterir. Aynı zamanda motor, aynı güç değerini elde etmek için daha yüksek gerilim ve daha düşük akım değerli olabilir.

3.2.3.6. Akım kaynaklı inverterler

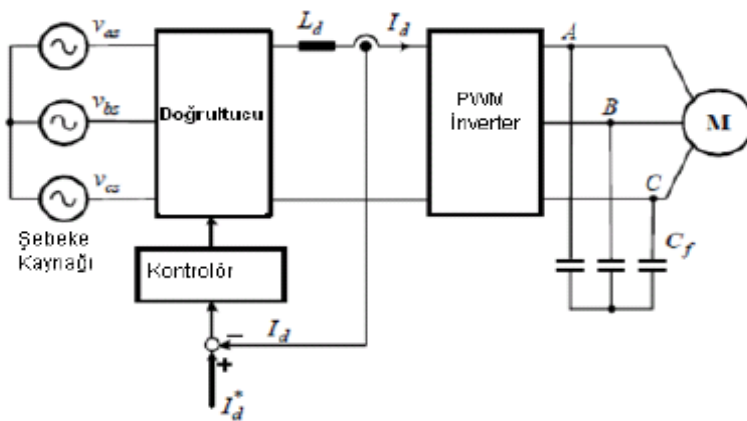
Akım kaynaklı inverterde DC giriş akımından AC çıkış akımı elde edilir. Sinusoidal çıkış için genlik, frekans ve faz; kontrol edilebilir olmalıdır. AC hat akımlarının yüksek di/dt özelliği göstermesinden dolayı motorlar gibi endüktif yüklerin beslenmesinde AC terminallere kapasitif filtre bağlanmalıdır. Şekil 3.28’de üç faz akım kaynaklı inverter topolojisi görülmektedir.



Şekil 3.28. Üç faz akım kaynaklı inverter topolojisi [19]

Bu yapıda AC taraf temel olarak kapasitifdir bu nedenle kısa devre edilemez. Diğer yandan DC akım kaynağı da açık devre olamaz. Yani üst ve alt anahtarlardan birer tanesi daima kapalı olmalıdır.

DC akım kaynağının düzgün bir akım sağlayabilmesi için büyük bir endüktans ve akımı sabit bir değerde tutabilmek için de akım geri beslemesi kullanılır.



Şekil 3.29. DC akım kaynağından beslenen inverter [20]

Akım beslemeli bir inverter, gerilim beslemeli bir inverter ile kıyaslandığında aşağıdaki sonuçlar elde edilir.

- Akım kaynaklı inverter yükle daha fazla etkileşimlidir. Bu nedenle inverter ile motor arasında sıkı bir uyum sağlanmalıdır. Örneğin akım kaynaklı inverter düşük kaçak endüktans görmeyi isterken, gerilim beslemeli inverterde durum tam tersidir. Bu parametre doğrudan inverter komütasyon sürecini etkiler. Makinadaki büyük kaçak endüktans gerilim kaynaklı inverterde harmonikleri filtreler fakat akım kaynaklı inverterde akım transfer aralığını uzatır bu da PWM frekansını ve tabii ki çalışma frekansını sınırlar.
- Akım kaynaklı inverterler PWM gerilim kaynaklı inverterlerle kıyaslandığında dinamik cevabı daha yavaştır. Akım kaynaklı bir inverter açık çevrim ile çalıştırılmaz. Oysa gerilim beslemeli inverterde açık çevrim V/f kontrolü çok yaygındır.
- Akım kaynaklı inverterin sağlıklı çalışabilmesi için daima bir minimum yük bağlı olmalıdır. Gerilim kaynaklı inverter ise yüksüz durumda da çalışabilir.
- Maliyet, verimlilik, geçici hal cevabı açısından bakıldığında gerilim beslemeli inverterler belirgin bir şekilde öne çıkmaktadırlar [25].

Taşıt uygulamalarında da genellikle tercih edilen tip, gerilim kaynaklı PWM inverterlerdir.

3.3. 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 hibrit 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, Anahtarlamalı relüktans motorlardır [26].

4. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA (HEA) KULLANILAN GÜÇ ELEKTRONİĞİ SİSTEMLERİNİN GENELLEŞTİRİLMİŞ DURUM UZAY ORTALAMA YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

4.1. 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 [26].

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 asılmıştır [27].

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 [28-29]. 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 modellenenbilir. Bu metotlar 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 [30].

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 [31].

GSSA periyodik olmayan sinyaller için Fourier transformundan çıkartılmıştır. Genelleştirilmiş durum uzay ortalama metodu, herhangi bir $x(t)$ dalga sekline $(t-T, T]$ sonlu zaman aralığında Fourier dönüşümünün sonlu katsayıları kullanılarak keyfi doğrulukla yaklaşılabilir prensibine dayanmaktadır. Böylelikle daha çok katsayı dikkate alınarak kestirimin duyarlılığı artırılmıştır. Bir $x(t)$ dalga seklinin, $(t-T, T]$ zaman aralığında Fourier dönüşümü aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [32-33].

$$x(t) = \sum_{k=-n}^n \langle x \rangle_k (t) e^{jk\omega t} \quad (4.1)$$

$$\text{Burada; } \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (4.2)$$

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

$$\langle x \rangle_k (t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) e^{-jk\omega\tau} d\tau \quad (4.3)$$

Denklem (4.3)'te $\langle x \rangle_k$ gösterimi ortalama (averajlama) çalışmasını göstermek için kullanılmaktadır.

$$x(t) = \langle x \rangle_{-n} (t) \times e^{-jn\omega t} + \dots + \langle x \rangle_{-1} (t) \times e^{-j\omega t} + \langle x \rangle_0 (t) + \langle x \rangle_1 (t) \times e^{j\omega t} + \dots + \langle x \rangle_n (t) \times e^{jn\omega t} \quad (4.4)$$

Denklem (4.1)'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 metot birinci harmonik yaklaşım olarak adlandırılır. Eğer durum değişkeninin hem DA bileşeni hem de salınımı varsa, k=-1, 0, 1 terimleri kullanılır [33-37]. Bununla beraber hesaba katılan terimlerin çokluğu, doğruluğu daha fazla artırır. Eğer n = 0 ise;

$$x(t) \cong \langle x \rangle_0 (t) \quad (4.5)$$

$$\langle x \rangle_0 (t) = \frac{1}{T} \int_0^T x(\tau) \times d\tau \quad (4.6)$$

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

$$x(t) \cong \langle x \rangle_{-1} (t) \cdot e^{-j\omega t} + \langle x \rangle_0 (t) + \langle x \rangle_1 (t) \cdot e^{j\omega t} \quad (4.7)$$

$$\langle x \rangle_0 (t) = \frac{1}{T} \int_0^T x(\tau) \times d\tau \quad (4.8)$$

$$\langle x \rangle_{-1} (t) = \frac{1}{T} \int_0^T x(\tau) \cdot e^{j\omega\tau} d\tau \quad (4.9)$$

$$\langle x \rangle_1(t) = \frac{1}{T} \int_0^T x(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4.10)$$

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

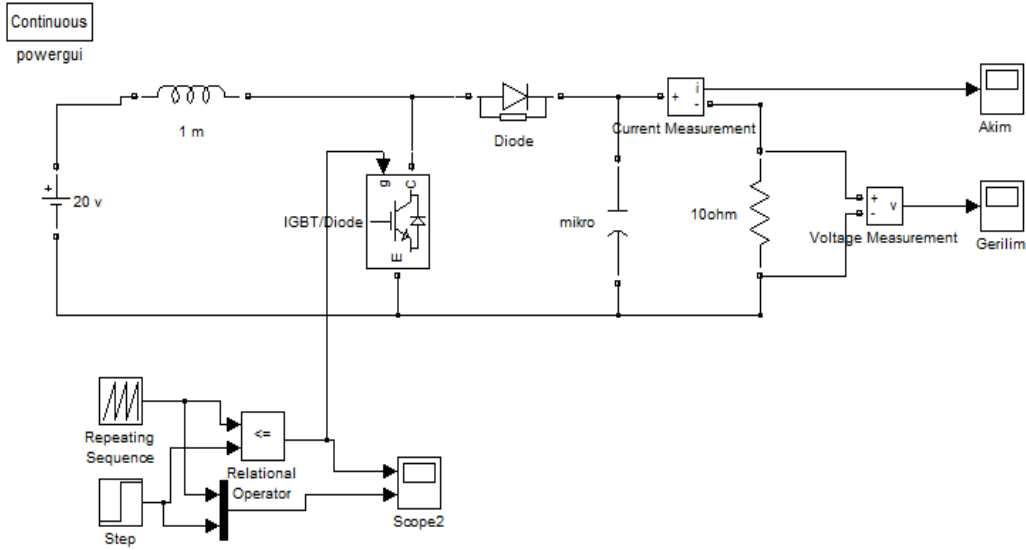
Her bir dönüştürücünün modellenmesinde T'nin seçimi çok önemlidir ve dikkatlice hesaba katılmalıdır. Örneğin kıyıcılarda (DA/DA dönüştürücü) anahtarlama periyodu iken eviricilerde (DA/AA inverter) çıkış geriliminin temel dalgasının periyodudur [31].GSSA tekniğini uygulamak için gerekli olan Fourier transform özelliklerinden olan ve denklem (4.3)'teki Fourier katsayısının zamana karşı türevi ve değişkenlerin çarpımlarının dönüşümü aşağıda gösterilmektedir [38-39].

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle x \rangle_k(t) = -j\omega k \langle x \rangle_k(t) + \left\langle \frac{d}{dt} x \right\rangle(t) \quad (4.11)$$

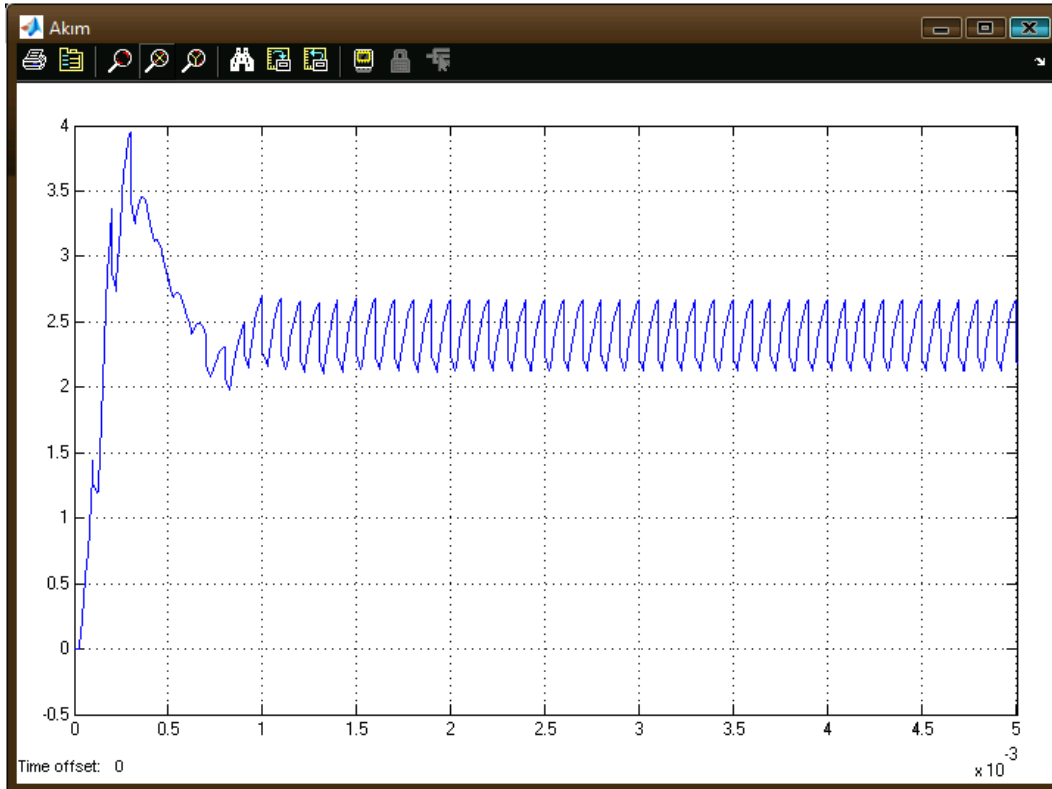
$$\langle x \cdot y \rangle = \sum_{i=-n}^n \langle x \rangle_i \cdot \langle y \rangle_{k-i} \quad (4.12)$$

4.2. Yükselten (Boost) DC/DC Dönüştürücünün GSSA Yöntemi ile Matematiksel Olarak Modellenmesi

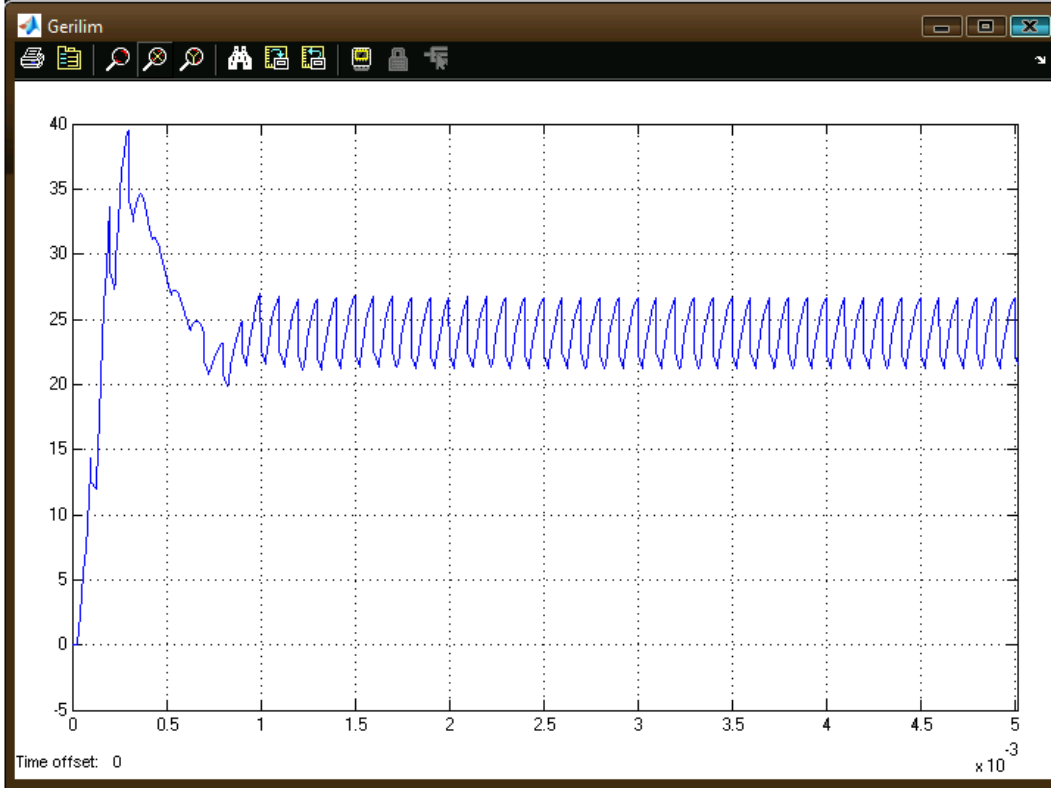
HEA kullanılan yükseltici çevirici ortalaması giriş geriliminden daha yüksek olan çıkış gerilimi elde etmek için kullanılır. HEA' larda kullanılan yükselten dönüştürücünün MATLAB simülasyon programından alınan değerler Şekil 4.2 ve 4.3'te gösterilmiştir. Bundan sonra yapılan çalışmalarda, Şekil 4.5'te gösterilen ve Matlab Simulinkteki devre ile aynı değerlere sahip yükselten dönüştürücü GSSA yöntemi ile matematiksel olarak modellenmiştir. Ayrıca GSSA tekniğinden çıkartılan sonuçlar Matlab Simulink sonuçları ile karşılaştırılıp önerilen yöntemin doğruluğu ispatlanmıştır.



Şekil 4.1. PWM yükselten DC/DC dönüştürücü ($V_{in} = 20\text{ V}$, $R_o = 10\Omega$, $L = 1\text{ mH}$, $C = 50\text{ }\mu\text{F}$, $T_s = 0.1\text{ ms}$)



Şekil 4.2. Matlab Simulink programından elde edilen yükselten DC/DC dönüştürücünün akım(I_y) zaman ergisi



Şekil 4.3. Matlab Simulink programından elde edilen yükseltilen DC/DC dönüştürücünün gerilim(V_o) zaman eğrisi

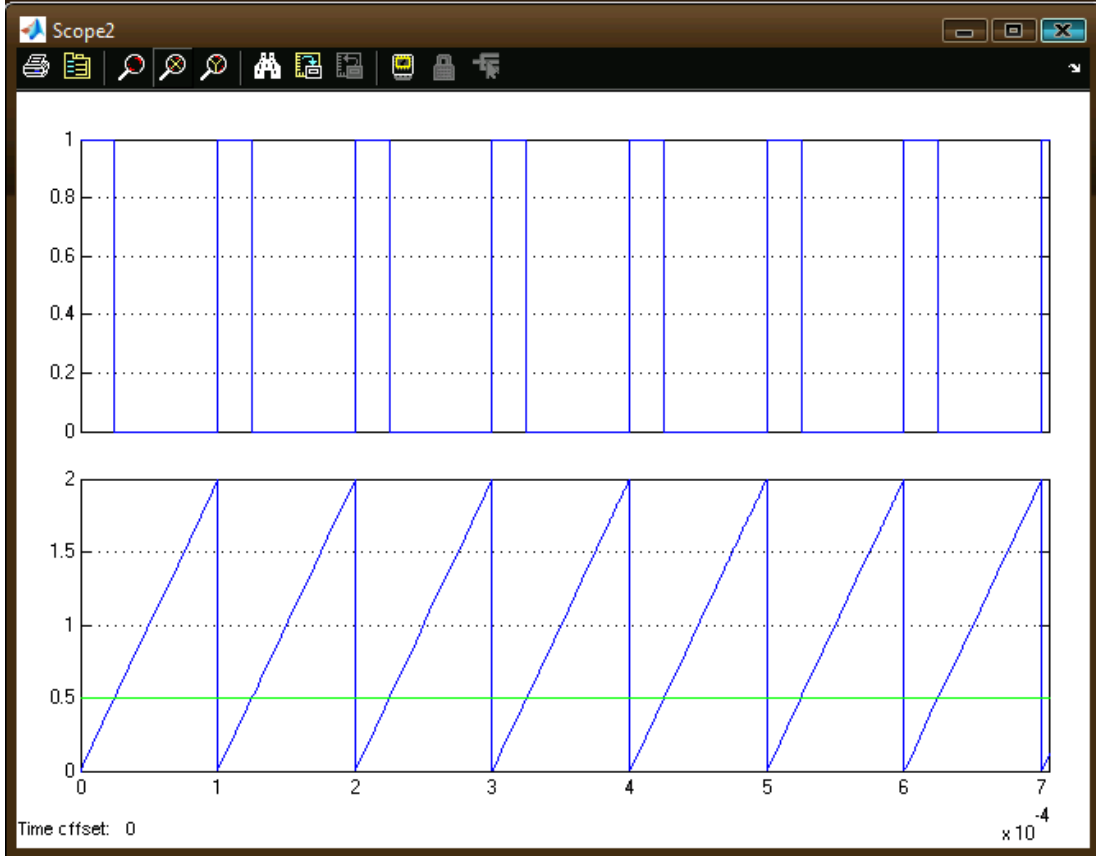
Genelleştirilmiş durum uzay ortalama yöntemini uygulamak için önce anahtarlama fonksiyonu $u(t)$ belirlenir.

Anahtarlama fonksiyonu denklem takımları (4.13, 4.14 ve 4.15) arasında ifade edilmiştir.

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT \\ 0, & dT < t < T \end{cases} \quad (4.13)$$

$$V_{in} = (1 - u(t)) \cdot v_o \quad (4.14)$$

$$i_D = (1 - u(t)) \cdot i_L \quad (4.15)$$



Şekil 4.4. Yükselten dönüştürücüde anahtarlama fonksiyonu $u(t)$

$$d = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

d : Görev devri

$$T_s = t_{on} + t_{off}$$

Sürekli iletim modunda çalışan yükselten DC/DC dönüştürücü devresinde; birleşik durum değişkenlerine (4.13-4.15)'teki anahtarlama denklem takımları uygulandığında;

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} [(v_{in} - (1-u(t)).v_o)] \quad (4.16)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C} [(1-u(t)).i_L - i_R] \quad (4.17)$$

$$i_{in} = i_L \quad (4.18)$$

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;

$$i_L(t) = \langle i_L \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle i_L \rangle_0 + \langle i_L \rangle_1 e^{j\omega t} \quad (4.19)$$

$$v_o(t) = \langle v_o \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle v_o \rangle_0 + \langle v_o \rangle_1 e^{j\omega t} \quad (4.20)$$

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

$$\langle i_L \rangle_1 = x_1 + jx_2 \quad (4.21)$$

$$\langle v_o \rangle_1 = x_3 + jx_4 \quad (4.22)$$

$$\langle i_L \rangle_0 = x_5 \quad (4.23)$$

$$\langle v_o \rangle_0 = x_6 \quad (4.24)$$

$$\langle i_L \rangle_{-1} = \langle i_L \rangle_1^* \quad (4.25)$$

$$\langle v_o \rangle_{-1} = \langle v_o \rangle_1^* \quad (4.26)$$

altı adet gerçekte 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 (4.19) ve (4.20)'de yerlerine yazılırsa;

$$i_L(t) = x_5 + 2x_1 \cos \omega t - 2x_2 \sin \omega t \quad (4.27)$$

$$v_o(t) = x_6 + 2x_3 \cos \omega t - 2x_4 \sin \omega t \quad (4.28)$$

sırasıyla akım ve gerilim ifadeleri elde edilir. Anahtarlama fonksiyonu $u(t)$ 'nin Fourier katsayı (4.3) analizi yapıldığında;

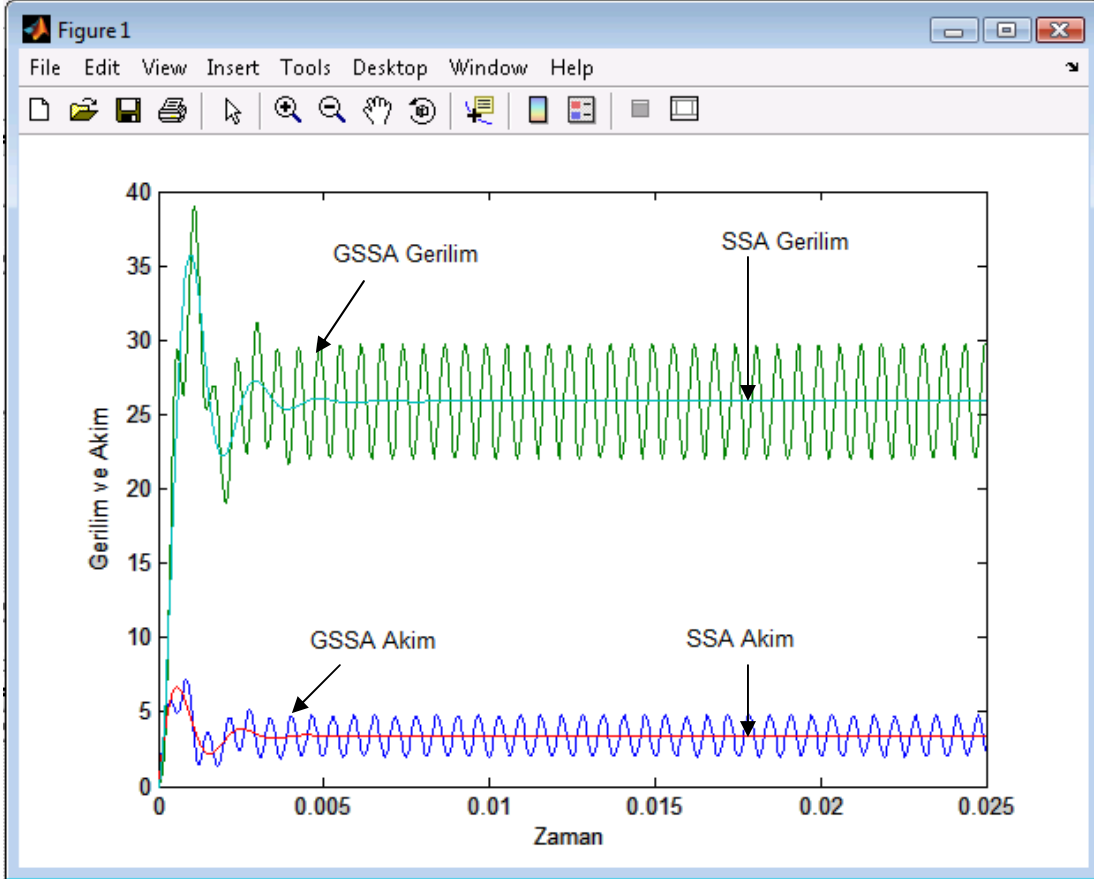
$$\langle u(t) \rangle_0 = d \quad (4.29)$$

$$\langle u(t) \rangle_1 = \frac{\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \quad (4.30)$$

sonuçları elde edilir. Daha sonra devrenin (4.16-4.18)'deki durum değişkenlerine; Fourier dönüşüm katsayıları durum değişkenlerinin, zamana karşı türevleri ve çarpımlarının dönüşümleri olan (4.11-4.12) 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 (4.31)'nolu matris kullanılmaktadır. Bu matris MATLAB gibi bir yazılım programında Ek A'da yazılan bir yazılım ile kolaylıkla çözülebilir.

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ x_1 \\ \cdot \\ x_2 \\ \cdot \\ x_3 \\ \cdot \\ x_4 \\ \cdot \\ x_5 \\ \cdot \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega & \frac{1-d}{L} & 0 & 0 & \frac{\sin 2\pi l}{2\pi L} \\ -\omega & 0 & 0 & \frac{1-d}{L} & 0 & \frac{-\sin^2 \pi l}{\pi L} \\ \frac{1-d}{C} & 0 & \frac{1}{RC} & \omega & \frac{-\sin 2\pi l}{2\pi C} & 0 \\ 0 & \frac{1-d}{C} & -\omega & \frac{1}{RC} & \frac{\sin^2 \pi l}{\pi C} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sin 2\pi l}{2\pi L} & \frac{-\sin^2 \pi l}{\pi L} & 0 & \frac{1-d}{L} \\ \frac{-\sin 2\pi l}{2\pi C} & \frac{2\sin^2 \pi l}{\pi C} & 0 & 0 & \frac{1-d}{C} & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{v_{in}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Denklem 4.31'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 (4.27) ve (4.28)'de yerlerine konularak devrenin akım-gerilim değerleri bulunur.



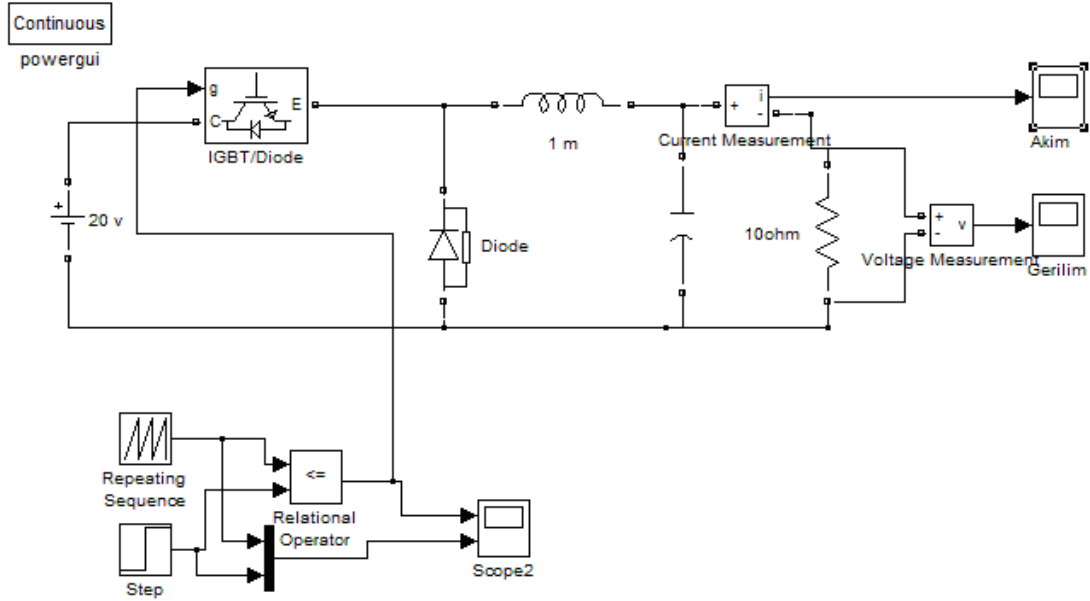
Şekil 4.5. GSSA yöntemi ile elde edilen 4.31 nolu matris denklemin Matlab'ta yazılan Ek A'daki çözümünden alınan devrenin akım gerilim sonuçları

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 MATLAB SİMULINK ortamında yapılan gerçek zaman benzetişim sonuçları ile karşılaştırarak analiz edilmiştir.

DC/DC dönüştürücüleri matematiksel olarak modellemede kullanılan durum uzay ortalama (SSA) modelinin yetersiz kaldığı sekilerden anlaşılmaktadır. Fakat Şekil 4.5'te görülen GSSA modelin Şekil 4.2 ve 4.3'teki SİMULINK modeliyle örtüşüğü görülmektedir.

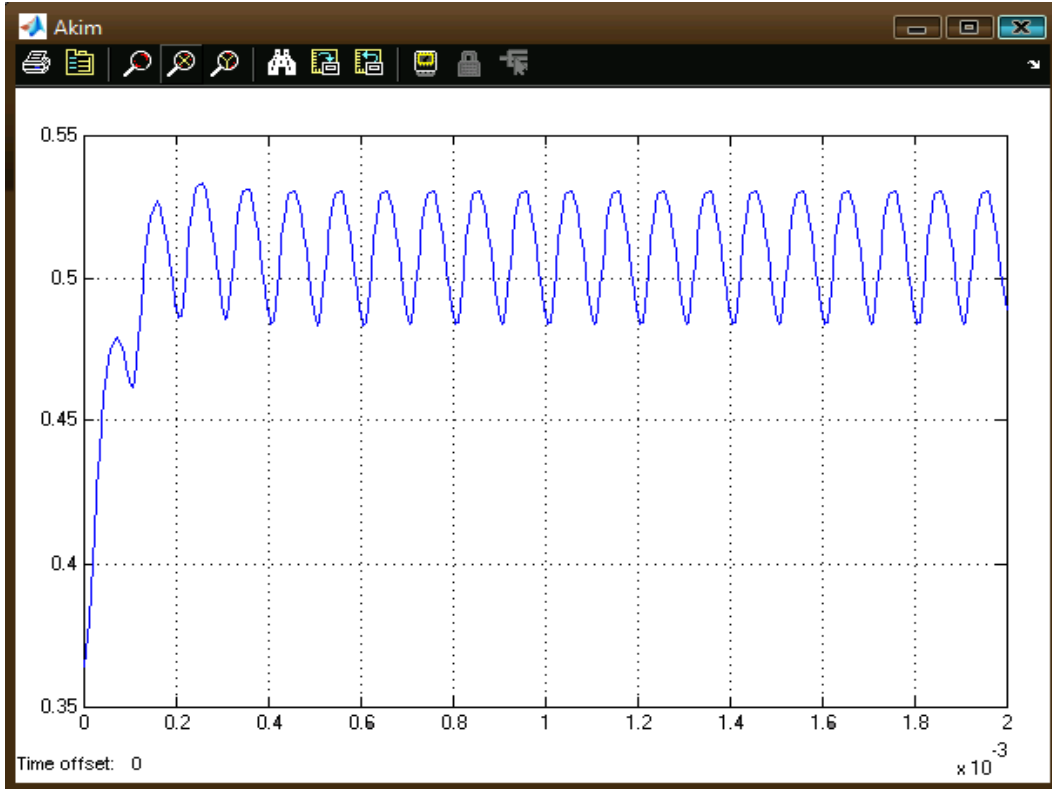
4.3. Azaltan (Buck) Dönüştürücünün GSSA Yöntemiyle Modellenmesi

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

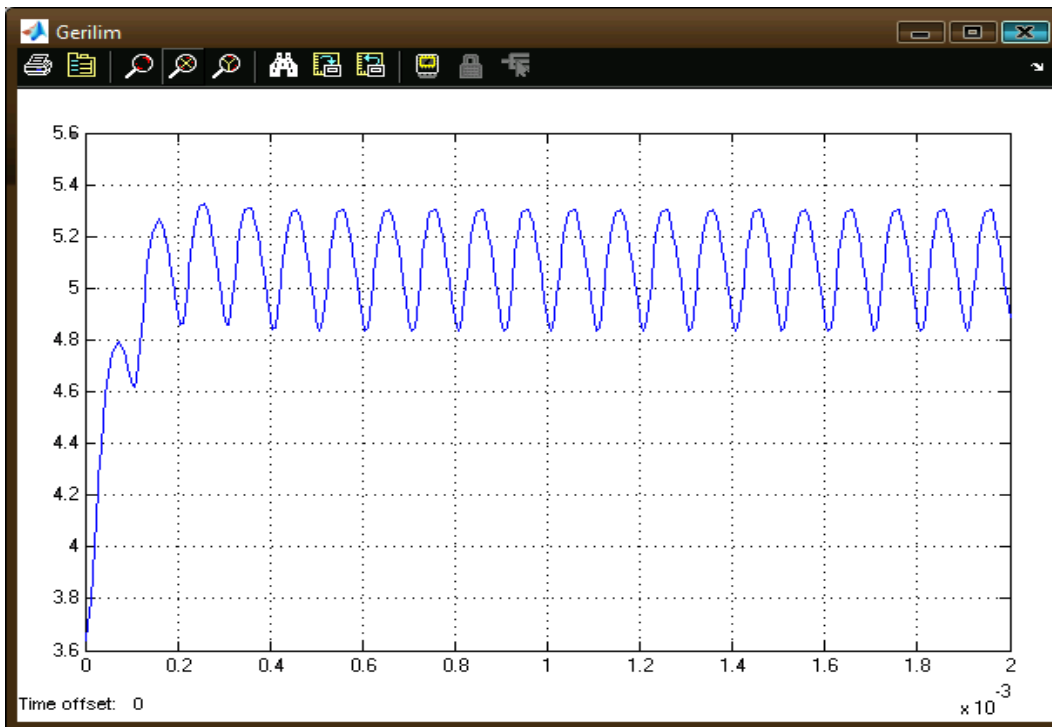


Şekil 4.6. Matlab Simulink programından alınan DC/DC PWM buck dönüştürücü ($V_{in} = 20\text{ V}$, $R_o = 10\ \Omega$, $L = 1\text{ mH}$, $C = 10\ \mu\text{F}$, $T_s = 0.1\text{ ms}$)

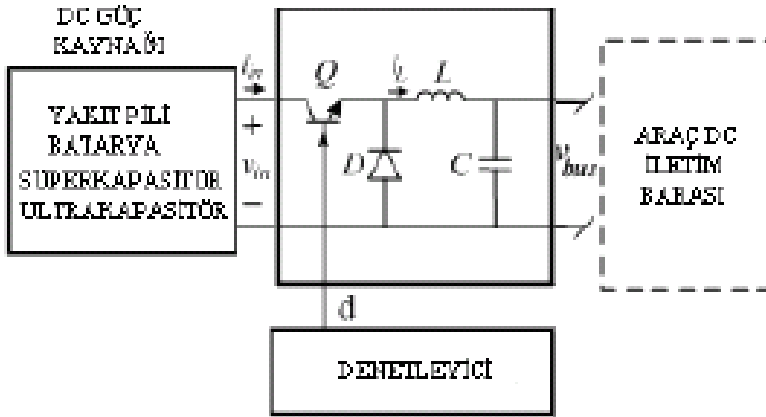
İsminden de anlaşılacağı üzere alçaltıcı çevirici DC giriş geriliminden daha düşük ortalama DC gerilim üretir. Şekil 4.6'da HEA' larda kullanılan buck dönüştürücü devre bağlantı şema örneği görülmektedir. Örnek sistemde; HEA' larda kullanılan DC/DC konvertör, yardımcı enerji kaynakları ile araç iletim barasına bağlanarak istenen gücü karşılamaktadır. DC/DC dönüştürücü, İYM ile veya tek basına gücü kontrol ünitesine iletmektedir (Şekil 4.6).



Şekil 4.7. Matlab Simulink programından elde edilen alçaltan DC/DC dönüştürücünün akım-zaman eğrisi



Şekil 4.8. Matlab Simulink programından elde edilen alçaltan DC/DC dönüştürücünün gerilim-zaman eğrisi



Şekil 4.9. HEA’ta kullanılan ve GSSA yöntemi ile modellenen alçaltan DC/DC boost dönüştürücü

Şekil 4.9’da kullanılan dönüştürücünün; sürekli iletim modunda (CCM), T anahtarlama periyodu ve d görev devri ile çalışan bir PWM DC/DC buck dönüştürücü olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda genelleştirilmiş durum uzay ortalama metodunun uygulanması için, anahtarlama fonksiyonu $u(t)$ ve 1. harmonik yaklaşım uygulanmış anahtarlama denklemleri;

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT \\ 0, & dT < t < T \end{cases} \quad (4.32)$$

$$v_{in} = v_{in} \cdot u(t) \quad (4.33)$$

$$\langle u(t) \rangle_0 = d \quad (4.34)$$

$$\langle u(t) \rangle_1 = \frac{j}{2\pi} (e^{-j2\pi d} - 1) \quad (4.35)$$

eşitlikleri elde edilir. Devrenin durum uzay denklemleri ise;

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} [v_{in} - v_o] \quad (4.36)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C} [i_L - i_{out}] \quad (4.37)$$

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 (4.38) – (4.40).

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} [v_{in}u(t) - v_o] \quad (4.38)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C} \left[i_L - \frac{v_o}{R} \right] \quad (4.39)$$

$$i_{in} = i_L u(t) \quad (4.40)$$

Bununla birlikte, genelleştirilmiş durum uzay ortalama modelinin (4.38)-(4.40) denklem takımında; güncel durum uzay değişkenleri, devre durum değişkenlerinin ($i_L(t)$ ve $v_o(t)$) Fourier katsayılarıdır. $i_L(t)$ ve $v_o(t)$ değişkenlerini bulabilmek için birinci harmonik yaklaşımı kullanılarak, Fourier katsayılarına altı gerçekte durum değişkeni ($x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$) atanır (4.41)-(4.46).

$$\langle i_L \rangle_1 = x_1 + jx_2 \quad (4.41)$$

$$\langle v_o \rangle_1 = x_3 + jx_4 \quad (4.42)$$

$$\langle i_L \rangle_0 = x_5 \quad (4.43)$$

$$\langle v_o \rangle_0 = x_6 \quad (4.44)$$

i_L ve v_o gerçekte olduğu için;

$$\langle i_L \rangle_{-1} = \langle i_L \rangle_1^* \quad (4.45)$$

$$\langle v_o \rangle_{-1} = \langle v_o \rangle_1^* \quad (4.46)$$

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

$$i_L(t) = x_5 + 2x_1 \cos \omega t - 2x_2 \sin \omega t \quad (4.47)$$

$$v_o(t) = x_6 + 2x_3 \cos \omega t - 2x_4 \sin \omega t \quad (4.48)$$

elde edilir. (4.38)-(4.40) denklem takımında Fourier katsayılarının zamana göre türevinin alınması, komütasyon fonksiyonu $u(t)$ 'nin ve bilinmeyen durum değişkenleri Fourier katsayılarında yerine koyulmasıyla;

$$\dot{x}_5 = \frac{1}{L}[d.v_{in} - x_6] \quad (4.49)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{C}\left[x_5 - \frac{x_6}{R}\right] \quad (4.50)$$

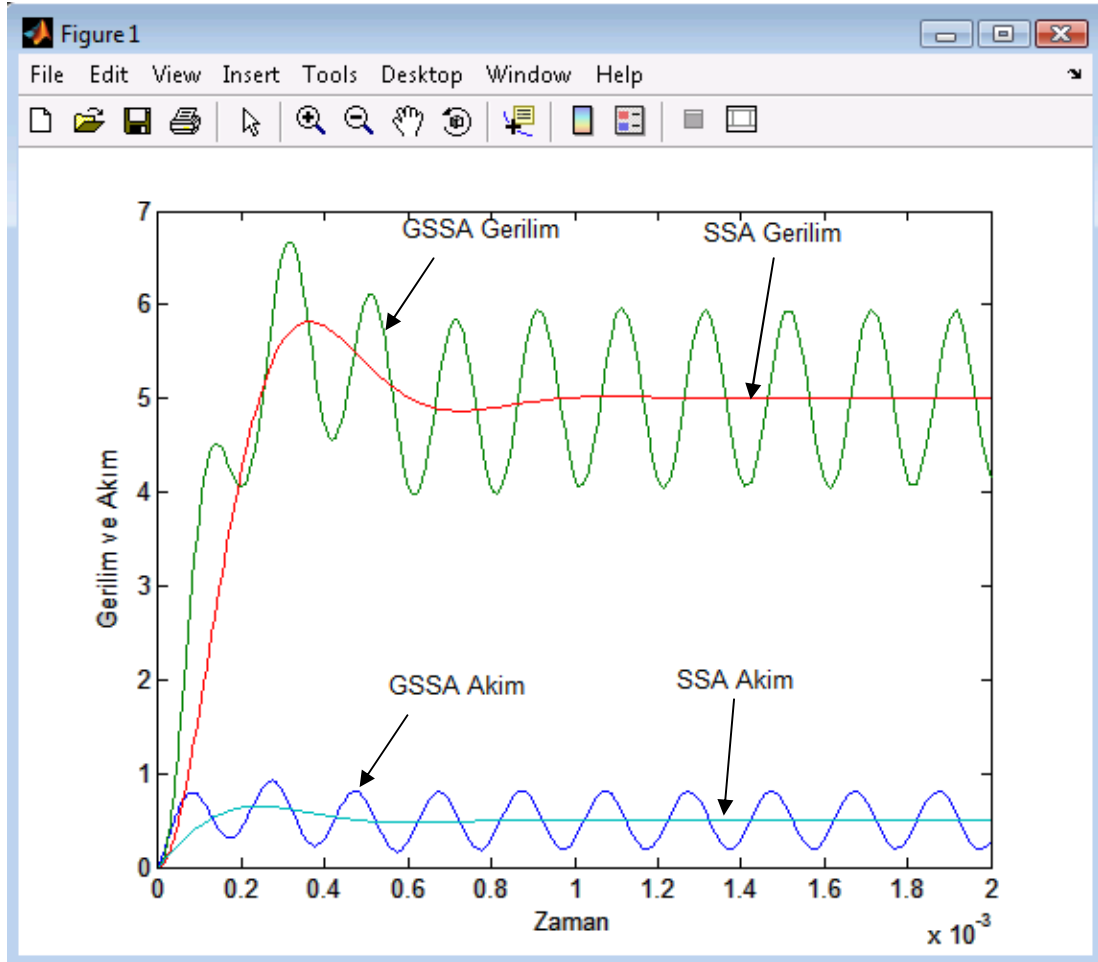
$$\dot{x}_1 + j\dot{x}_2 = -j\omega(x_1 + jx_2) + \frac{1}{L}\left[\frac{v_{in}}{2\pi}(\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)) - (x_3 + jx_4)\right] \quad (4.51)$$

$$\dot{x}_3 + j\dot{x}_4 = -j\omega(x_3 + jx_4) + \frac{1}{C}\left[(x_1 + jx_2) - \frac{(x_3 + jx_4)}{R}\right] \quad (4.52)$$

sonuçları bulunur. Bu sonuçlardan, bilinmeyen durum değişkenlerini bulmak için (4.53)'teki matris formundan faydalanılmıştır. Bu matris buck dönüştürücünün genelleştirilmiş durum uzay ortalama modelini göstermektedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega & -\frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & 0 & 0 & -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & -\frac{1}{RC} & \omega & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & -\omega & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_{in}}{2\pi L} \sin 2\pi d \\ -\frac{v_{in}}{2\pi L} (1 - \cos 2\pi d) \\ 0 \\ 0 \\ d \frac{v_{in}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

Çıkartılan (4.53) matris denklemi Matlab'ta yazılan Ek B' deki program yardımıyla çözümlenmiştir. GSSA çözümünden elde edilen $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ durum değişkenleri denklem 4.47 ve 4.48'de yerlerine konulduğunda $i_L(t)$ ve $v_o(t)$ bulunmuş ve zamana bağlı değişimleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

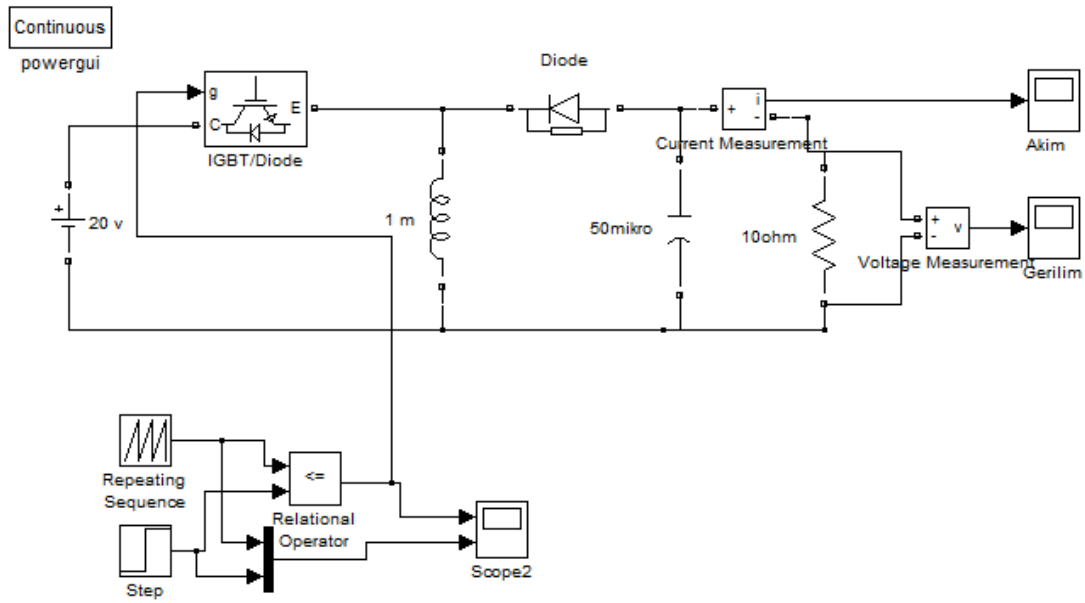


Şekil 4.10. GSSA yöntemi ile elde edilen (4.53)'teki matris denkleminin Matlab programı ile Ek B' deki çözümünden elde edilen $i_L(t)$ ve $v_o(t)$ sonuçları

Şekil 4.10'da görülen GSSA modelin Şekil 4.7 ve 4.8'deki SİMULINK modeliyle örtüştüğü görülmektedir.

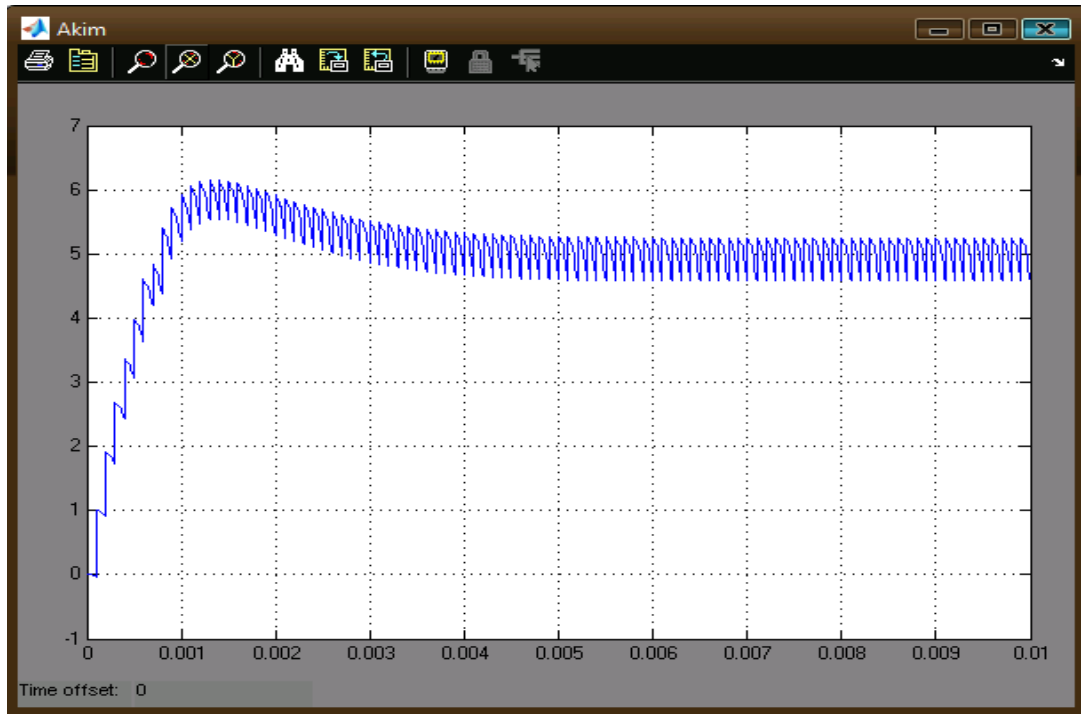
4.4. Azaltan-Yükselten (Buck-Boost) DC/DC Dönüştürücünün GSSA İle Matematiksel Olarak Modellenmesi

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

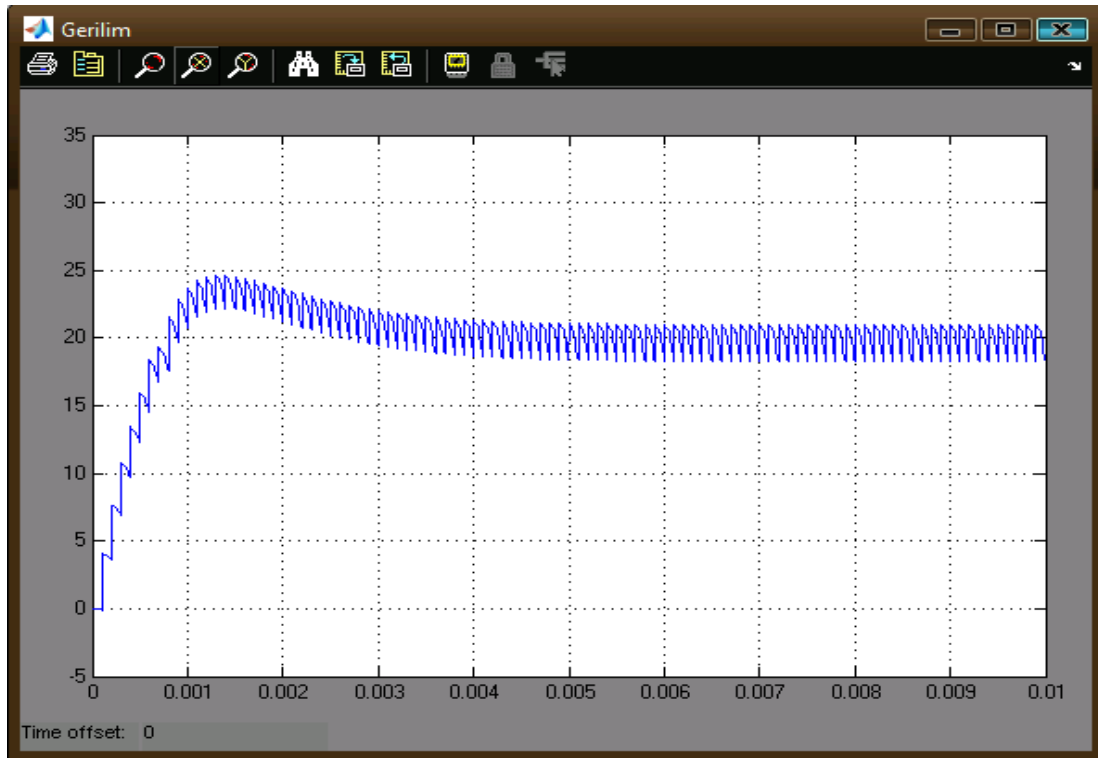


Şekil 4.11. Matlab Simulink programından alınan DC/DC buck-boost dönüştürücü devre şeması
($V_{in} = 20\text{ V}$, $R_o = 10\Omega$, $L = 1\text{ mH}$, $C = 50\text{ }\mu\text{F}$, $T_s = 0.1\text{ ms}$, $d = 0.5$)

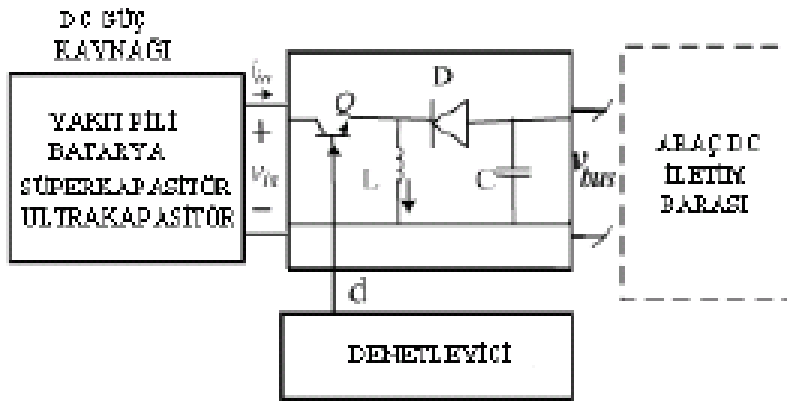
İsminden de anlaşılacağı üzere alçaltıcı-yükseltici çevirici DC giriş geriliminden daha düşük ve yüksek ortalama DC gerilim üretir. Şekil 4.11’de temel DC/DC PWM alçaltıcı-yükseltici MATLAB SİMULİNK devre şeması alınan sonuçlar görülmektedir (Şekil 4.12-4.13).



Şekil 4.12. Matlab Simulink programından elde edilen alçaltan-yükselten DC/DC dönüştürücünün akım-zaman eğrisi



Şekil 4.13. Matlab Simulink programından elde edilen alçaltan-yükselten DC/DC dönüştürücünün gerilim-zaman eğrisi



Şekil 4.14. HEA'ta kullanılan ve GSSA yöntemi ile modellenen DC/DC buck-boost dönüştürücü

Şekil 4.14'te kullanılan dönüştürücünün; CCM' ta, T anahtarlama periyodu ve d görev devri ile çalışan bir PWM DC/DC buck-boost dönüştürücü olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda genelleştirilmiş durum uzay ortalama metodunun

uygulanması için, anahtarlama fonksiyonu $u(t)$ ve birinci harmonik yaklaşım uygulanmış anahtarlama denklemleri;

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT \\ 0, & dT < t < T \end{cases} \quad (4.54)$$

$$u(t) = \frac{1}{T} \int_0^T u(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} \cdot d\tau \quad (4.55)$$

$$\langle u(t) \rangle_0 = d \quad (4.56)$$

$$\langle u(t) \rangle_1 = \frac{j}{2\pi} (e^{-j2\pi d} - 1) \quad (4.57)$$

çıkartılır. Devrenin durum uzay denklemleri;

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} [v_{in}u(t) - (1-u(t)) \cdot v_o] \quad (4.58)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C} \left[(1-u(t)) \cdot i_L - \frac{v_o}{R} \right] \quad (4.59)$$

ile ifade edilir. $i_L(t)$ ve $v_o(t)$ 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 (4.60)-(4.65).

$$\langle i_L \rangle_1 = x_1 + jx_2 \quad (4.60)$$

$$\langle v_o \rangle_1 = x_3 + jx_4 \quad (4.61)$$

$$\langle i_L \rangle_0 = x_5 \quad (4.62)$$

$$\langle v_o \rangle_0 = x_6 \quad (4.63)$$

i_L ve v_o gerçektir için;

$$\langle i_L \rangle_{-1} = \langle i_L \rangle_1^* \quad (4.64)$$

$$\langle v_o \rangle_{-1} = \langle v_o \rangle_1^* \quad (4.65)$$

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

$$\frac{d}{dt} \langle i_L \rangle_1 = -j\omega \langle i_L \rangle_1 + \frac{1}{L} [\langle v_{in}.u(t) \rangle_1 - \langle v_o \rangle_1 + \langle v_o.u(t) \rangle_1] \quad (4.66)$$

$$\frac{d}{dt} \langle v_o \rangle_1 = -j\omega \langle v_o \rangle_1 + \frac{1}{C} \left[\langle i_L \rangle_1 - \langle \frac{v_o}{R} \rangle_1 - \langle i_L.u(t) \rangle_1 \right] \quad (4.67)$$

ve ortalama değer,

$$\frac{d}{dt} \langle i_L \rangle_0 = \frac{1}{L} [\langle v_{in}.u(t) \rangle_0 - \langle v_o \rangle_0 + \langle v_o.u(t) \rangle_0] \quad (4.68)$$

$$\frac{d}{dt} \langle v_o \rangle_0 = \frac{1}{C} \left[\langle i_L \rangle_0 - \langle \frac{v_o}{R} \rangle_0 - \langle i_L.u(t) \rangle_0 \right] \quad (4.69)$$

uygulandığında (4.66–4.69) denklemleri elde edilir. Burada bulunması gereken değerler $\langle v_{in}.u(t) \rangle_1$, $\langle v_o.u(t) \rangle_1$, $\langle i_L.u(t) \rangle_1$, $\langle v_{in}.u(t) \rangle_0$, $\langle v_o.u(t) \rangle_0$ ve $\langle i_L.u(t) \rangle_0$ değerleridir. Bunlara da GSSA yöntem hesaplamalarından olan çarpımlarının dönüşümü (4.12) uygulandığında;

$$\langle v_{in}.u(t) \rangle_1 = v_{in} \cdot \left(\frac{\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \right) \quad (4.70)$$

$$\langle v_o.u(t) \rangle_1 = x_6 \cdot \left(\frac{\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \right) + (x_3 + jx_4) \cdot d \quad (4.71)$$

$$\langle i_L.u(t) \rangle_1 = x_5 \cdot \left(\frac{\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \right) + (x_1 + jx_2) \cdot d \quad (4.72)$$

$$\langle v_{in}.u(t) \rangle_0 = v_{in} \cdot d \quad (4.73)$$

$$\begin{aligned} \langle v_o.u(t) \rangle_0 = (x_3 - jx_4) \cdot \left(\frac{\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \right) + x_6 \cdot d + \\ (x_3 + jx_4) \cdot \left(\frac{\sin 2\pi d - j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \right) \end{aligned} \quad (4.74)$$

$$\langle i_L.u(t) \rangle_0 = (x_1 - jx_2) \cdot \left(\frac{\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \right) + x_3 \cdot d +$$

$$(x_1 + jx_2) \left(\frac{\sin 2\pi d - j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \right) \quad (4.75)$$

sonuçları elde edilir. Bu bulunan sonuçlar birinci harmonik ve ortalama değer denklemlerinde (4.66–4.69) yerlerine konulduğunda;

$$\dot{x}_1 = \omega x_1 + \frac{v_{in} \cdot \sin 2\pi d}{2\pi L} - \frac{1}{L} x_3 + \frac{\sin 2\pi d}{2\pi L} + \frac{d}{L} x_3 \quad (4.76)$$

$$\dot{x}_2 = -\omega x_1 + \frac{v_{in} \cdot (\cos 2\pi d - 1)}{2\pi L} - \frac{1}{L} x_4 + \frac{(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi L} x_6 + \frac{d}{L} x_4 \quad (4.77)$$

$$\dot{x}_3 = \omega x_4 + \frac{1}{C} x_1 - \frac{\sin 2\pi d}{2\pi C} - \frac{d}{C} x_1 - \frac{1}{RC} x_3 \quad (4.78)$$

$$\dot{x}_4 = -\omega x_3 + \frac{1}{C} x_2 - \frac{\cos 2\pi d - 1}{2\pi C} x_5 - \frac{d}{C} x_2 - \frac{1}{RC} x_4 \quad (4.79)$$

$$\dot{x}_5 = \frac{d}{L} v_{in} - \frac{1}{L} x_6 + \frac{\sin 2\pi d}{\pi L} x_3 + \frac{(\cos 2\pi d - 1)}{\pi L} x_4 + \frac{d}{L} x_6 \quad (4.80)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{C} x_5 - \frac{1}{RC} x_6 - \frac{\sin 2\pi d}{\pi C} x_1 - \frac{(\cos 2\pi d - 1)}{\pi C} x_2 - \frac{d}{C} x_5 \quad (4.81)$$

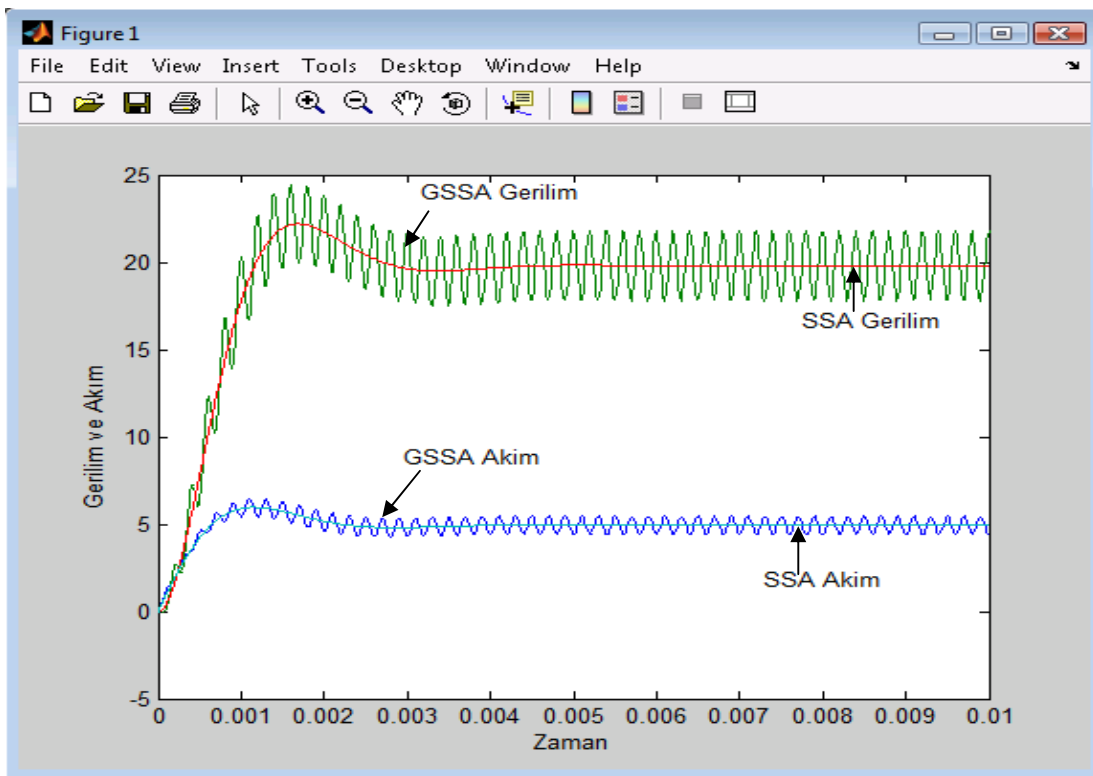
bilinmeyen durum değişkenleri değerleri bulunur.

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

$$\begin{bmatrix} \frac{v_{in} \sin 2\pi d}{2\pi L} \\ \frac{v_{in} (\cos 2\pi d - 1)}{2\pi L} \\ 0 \\ 0 \\ d \frac{v_{in}}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$(4.82)$$

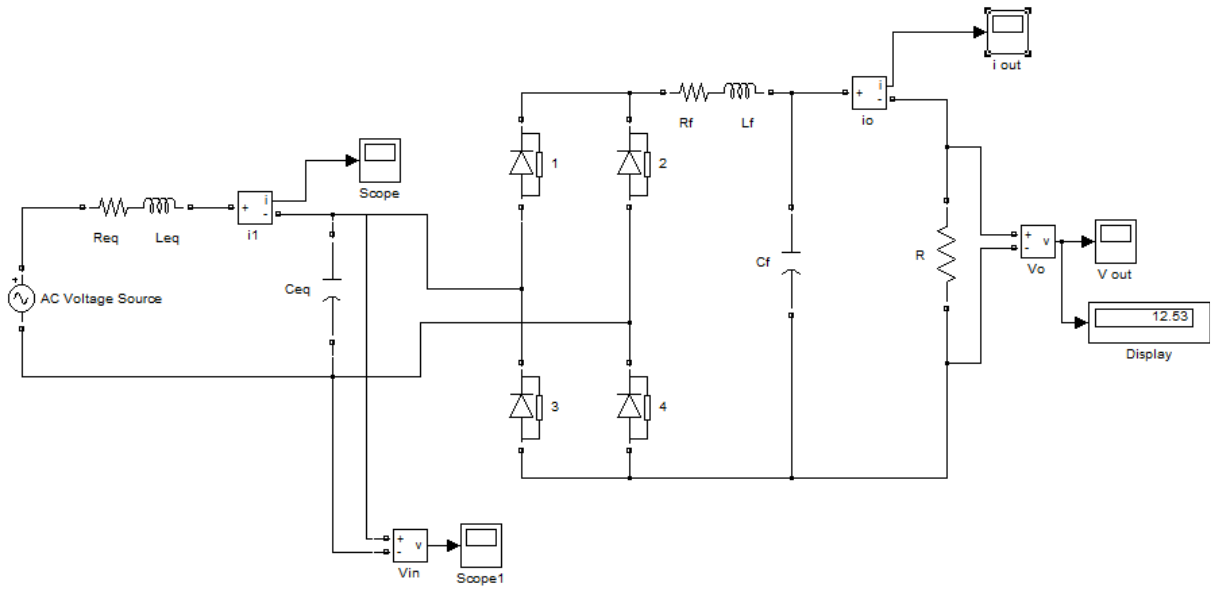
Bilinmeyen durum değişkenlerini bulmak için (4.82)'deki matris formu oluşturulmuştur. Bu matris buck-boost dönüştürücünün GSSA modelini göstermektedir. Oluşturulan matris denklemi (4.82) Matlab'ta yazılan Ek C' deki program yardımıyla durum değişkenleri hesaplanmıştır. GSSA çözümünden elde edilen x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve x_6 durum değişkenleri denklem 4.47 ve 4.48 da yerlerine konulduğunda akım $i_L(t)$ ve gerilim $v_o(t)$ değerleri hesaplanarak zamana bağlı değişimleri Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15. GSSA yöntemi ile elde edilen (4.82)'teki matris denkleminin Matlab programı (Ek C) ile çözümünden elde edilen akım $i_L(t)$ ve gerilim $v_o(t)$ sonuçları

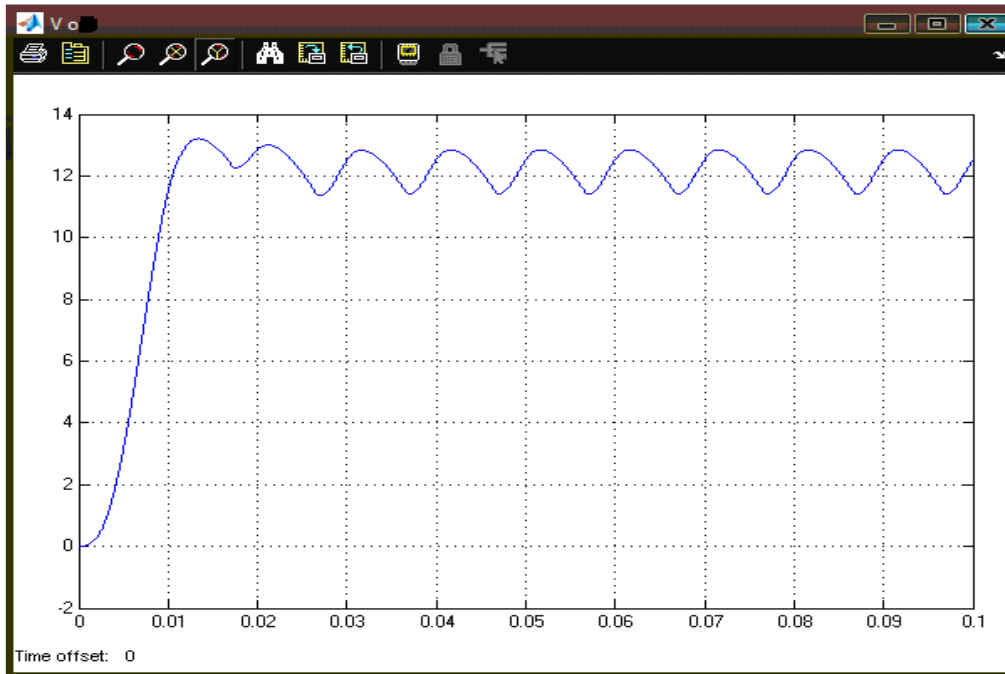
4.5. AC/DC Doğrultucunun GSSA Yöntemiyle Modellenmesi

Bu bölümde GSSA metodunun bir AC/DC doğrultucuya uygulanmasına ve simülasyonlarına yer verilmiştir.

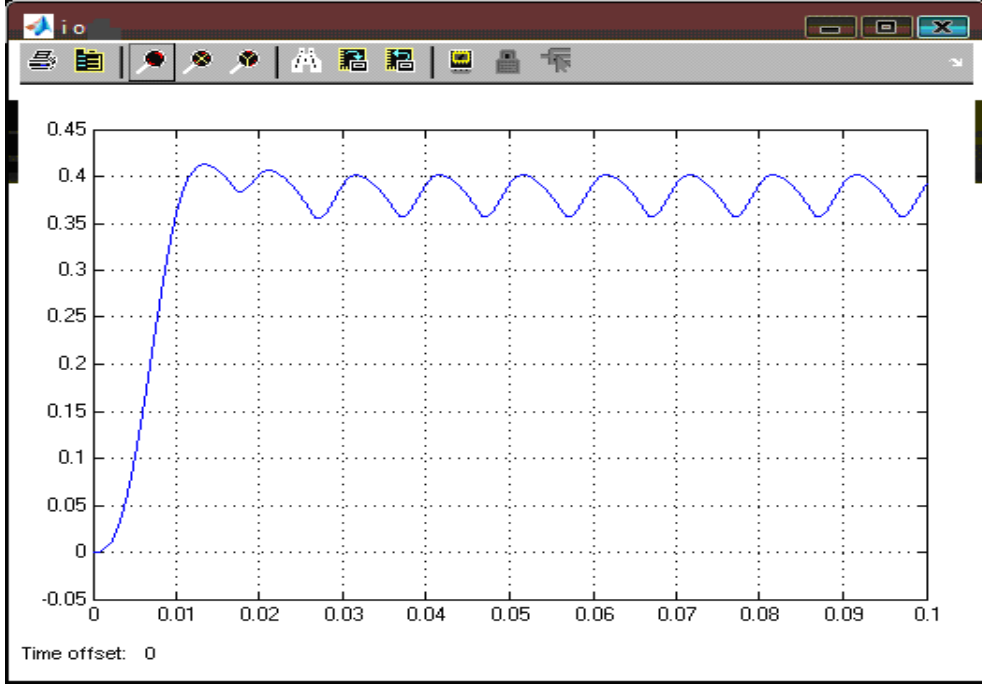


Şekil 4.16. AC / DC doğrultucunun MATLAB SİMULİNK ortamında oluşturulan modeli ($R_{eq}=0.1$ ohm, $L_{eq}=1$ mH, $C_{eq}=10 \mu$ F, $R_f=10$ ohm, $L_f=1$ mH, $C_f=100 \mu$ F, $R=35$ ohm)

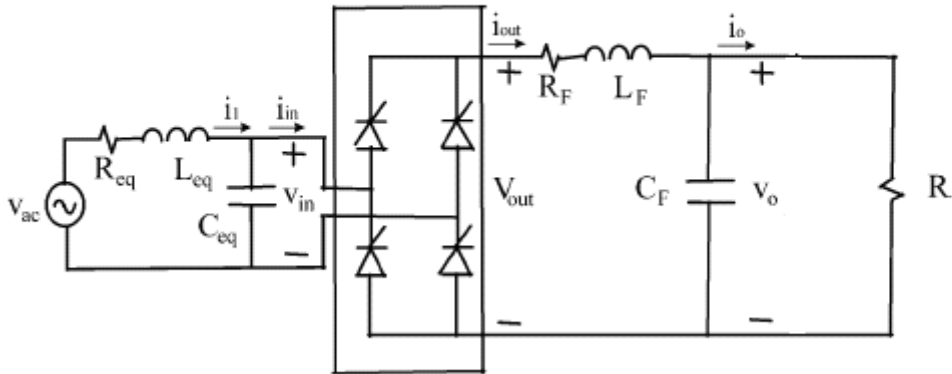
Şekil 4.16'da görülen devre girişte $V_{rms}=115$ V verilen bir alternatif gerilimin çıkışta ortalama 12 V DC gerilim elde etmek amacıyla kullanılır ve 1 fazlı tam dalga kontrolsüz bir doğrultucudur. Aşağıda devrenin MATLAB SİMULİNK'ten alınan çıkış eğrileri görülmektedir (Şekil 4.17-4.18).



Şekil 4.17. AC/DC Doğrultucu Simulink'te elde edilen çıkış gerilim-zaman eğrisi



Şekil 4.18. Şekil 4.17. AC/DC Doğrultucu Simulink'te elde edilen çıkış akım-zaman eğrisi



Şekil 4.19. AC/DC doğrultucu devre şeması

Şekil 4.19'da görülen devrenin anahtarlama fonksiyonu $u(t)$;

$$i_{in} = u(t) \cdot i_{out} \quad (4.83)$$

$$v_{out} = u(t) \cdot v_{in} \quad (4.84)$$

elde edilir. Devrenin Kirchoff Yasalarına istinaden denklemleri çıkarılırsa ;

$$v_{ac} = R_{eq} \cdot i_1 + L_{eq} \cdot \frac{di_1}{dt} + v_{in} \quad (4.84)$$

$$C_{eq} \cdot \frac{dv_{in}}{dt} + i_{in} = i_1 \quad (4.85)$$

$$v_{out} = R_F \cdot i_{out} + L_F \cdot \frac{di_{out}}{dt} + v_o \quad (4.86)$$

$$C_F \cdot \frac{dv_o}{dt} + \frac{v_o}{R} = i_{out} \quad (4.87)$$

elde edilmektedir.

$i_1(t)$, $i_{out}(t)$, $v_{in}(t)$ ve $v_o(t)$ değişkenlerini bulabilmek için birinci harmonik yaklaşımı kullanılarak, Fourier katsayılarına 12 gerçek durum değişkeni ($x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$) atanır (4.88-4.95).

$$\langle i_1 \rangle_0 = x_1 \quad (4.88)$$

$$\langle v_{in} \rangle_0 = x_2 \quad (4.89)$$

$$\langle i_{out} \rangle_0 = x_3 \quad (4.90)$$

$$\langle v_o \rangle_0 = x_4 \quad (4.91)$$

$$\langle i_1 \rangle_1 = x_5 + jx_6 \quad (4.92)$$

$$\langle v_{in} \rangle_1 = x_7 + jx_8 \quad (4.93)$$

$$\langle i_{out} \rangle_1 = x_9 + jx_{10} \quad (4.94)$$

$$\langle v_o \rangle_1 = x_{11} + jx_{12} \quad (4.95)$$

Oluşturulan bu katsayılar (4.96-4.99) yerine konulur.

$$i_1(t) = \langle i_1 \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle i_1 \rangle_0 + \langle i_1 \rangle_1 e^{j\omega t} \quad (4.96)$$

$$v_{in}(t) = \langle v_{in} \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle v_{in} \rangle_0 + \langle v_{in} \rangle_1 e^{j\omega t} \quad (4.97)$$

$$i_{out}(t) = \langle i_{out} \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle i_{out} \rangle_0 + \langle i_{out} \rangle_1 e^{j\omega t} \quad (4.98)$$

$$v_o(t) = \langle v_o \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle v_o \rangle_0 + \langle v_o \rangle_1 e^{j\omega t} \quad (4.99)$$

Daha sonra gerekli matematiksel düzeltmeler yapılarak giriş ve çıkıştaki akım ve gerilim ifadeleri elde edilir (4.100-4.103).

$$i_1(t) = x_1 + 2x_5 \cos \omega t - 2x_6 \sin \omega t \quad (4.100)$$

$$v_{in}(t) = x_2 + 2x_7 \cos \omega t - 2x_8 \sin \omega t \quad (4.101)$$

$$i_{out}(t) = x_3 + 2x_9 \cos \omega t - 2x_{10} \sin \omega t$$

$$(4.102)$$

$$v_o(t) = x_4 + 2x_{11} \cos \omega t - 2x_{12} \sin \omega t \quad (4.103)$$

Daha sonra devrenin (4.84-4.87)'deki durum değişkenlerine; Fourier dönüşüm katsayıları durum değişkenlerinin, zamana karşı türevleri ve çarpımlarının dönüşümleri olan (4.11-4.12) denklemleri uygulanmıştır. Aynı zamanda anahtarlama fonksiyonu $u(t)$ 'nin ve V_{ac} 'nin Fourier katsayı analizinden elde edilen katsayılarının da (4.104-4.107) yerlerine konulmasıyla AC/DC dönüştürücünün GSSA modeli çıkartılmıştır.

$$V_{ac} = v_m \cdot \sin(\omega t)$$

$$\langle v_{ac} \rangle_0 = 0 \quad (4.104)$$

$$\langle v_{ac} \rangle_1 = -j \frac{v_m}{2} \quad (4.105)$$

$$\langle \frac{1}{v_0} \rangle_0 = \frac{1}{x_4} \quad (4.106)$$

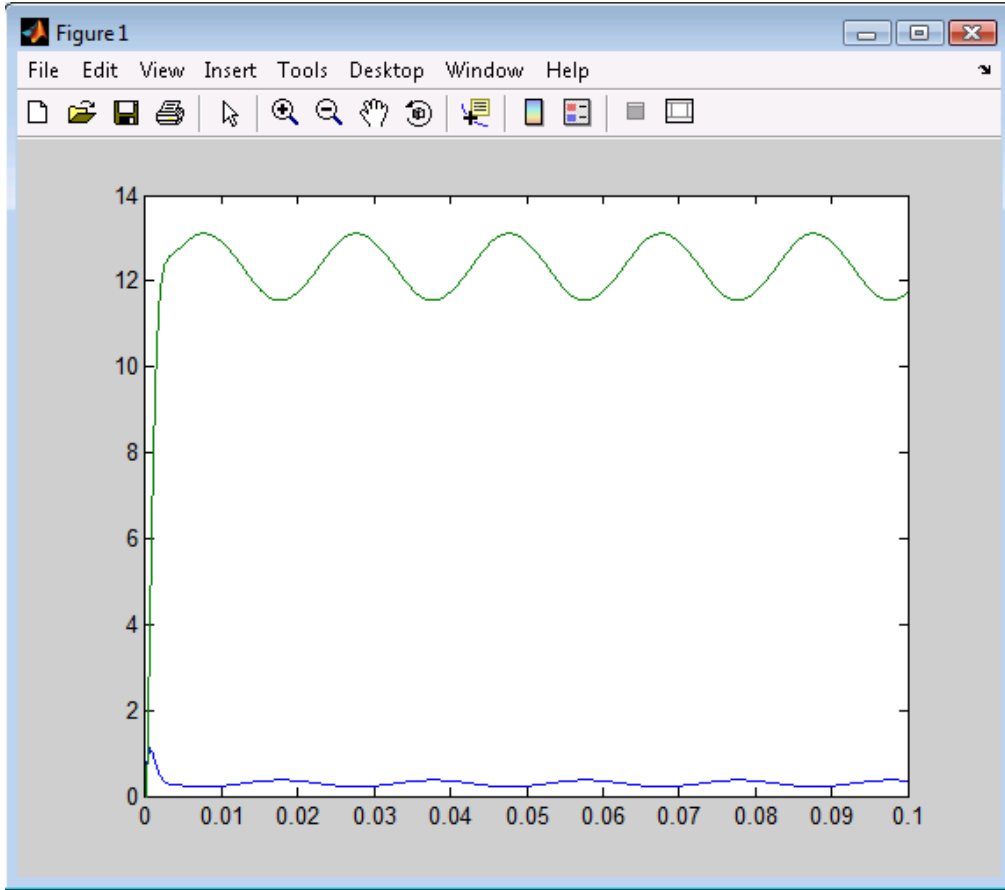
$$\langle \frac{1}{v_0} \rangle_1 = \frac{-x_{11} - jx_{12}}{x_4^2} \quad (4.107)$$

Çıkartılan GSSA modelinde bilinmeyen değişkenleri bulmak için (4.108)'nolu matris kullanılmaktadır. Bu matris MATLAB gibi bir yazılım programında Ek D'de yazılan bir yazılım ile kolaylıkla çözülebilir.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \\ X_9 \\ X_{10} \\ I_{11} \\ X_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_F}{L_F} & -\frac{1}{L_F} & 0 & 0 & 0 & \frac{4}{L_F} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_F} & -\frac{1}{R.C_F} + \frac{1}{C_F.v_s^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_F}{L_F} & \omega & -\frac{1}{L_F} & 0 \\ 0 & -\frac{2}{\pi L_F} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega & -\frac{R_F}{L_F} & 0 & -\frac{1}{L_F} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-2x_{11}}{C_F.v_s^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_F} & 0 & -\frac{1}{R.C_F} + \frac{1}{C_F.v_s^2} & \omega \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-2x_{12}}{C_F.v_s^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_F} & -\omega & -\frac{1}{R.C_F} + \frac{1}{C_F.v_s^2} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{-v_s}{v_s.L_{eq}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(4.108)



Şekil 4.20. GSSA yöntemi ile elde edilen 4.108 nolu matris denkleminin Matlab'ta yazılan Ek D'deki çözümünden alınan devrenin akım gerilim sonuçları

5. 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 genelleştirilmiş 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 metot 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 parametrelerinin 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 benzetişim ve analizleri MATLAB, PSPICE yazılım paketleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir.
- Zaman tabanlı yazılımlarda gerçekleştirilen modellemede, sistemin benzetişim 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 benzetişim süresi, dönüşüm problemleri ve büyük program dosyaları gerektirmektedir.
- 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 modellenebilir.
- Bu metotlar daha hızlıdır ve büyük bilgisayar sınırlamaları gerektirmezler.
- Fakat bu metotlar büyük işaret analizlerinin gerçekleştirilememesi gibi dezavantajlara sahiptirler.
- GSSA modeli kullanılarak sistemin büyük işaret modeli çıkartılmış ve tüm sistem parametrelerin 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.

- 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] [http://tr.wikipedia.org/wiki/Hibrit_\(otomobil\)](http://tr.wikipedia.org/wiki/Hibrit_(otomobil)), 04.07.2011
- [2] Electric vehicle technology explained, Kitap Yazarı: James LARMİNİE, John LOWRY. 2004
- [3] ÜNLÜ, N., KARAHAN, Ş., TÜR, O., UÇAROL, H., ÖZSU, E., YAZAR, A., TURHAN, L., AKGÜN, F. ve TIRIS, M., Elektrikli Araçlar, Tübitak MAM, Kocaeli, 2003
- [4] <http://www.ele-drive.com/>, What are EVs?., 2nd European Ele-Drive Transportation. 30th May - 1st June , 2007
- [5] <http://www.howstuffworks.com/> How Electric Cars Work?, 2002, Son erişim tarihi: 04.07.2011
- [6] KESSELS T.B.A., Energy Management for Automotive Power Nets, PhD Thesis, Eindhoven Technical University, Eindhoven, 2007
- [7] GUZELLA L., SCIARRETA A., Vehicle Propulsion Systems, Introduction to Modeling and Optimization, Springer Verlag, Berlin, 2005
- [8] KOOT M.W.T., Energy Management for Vehicular Electric Power Systems, PhD Thesis, Eindhoven Technical University, Eindhoven, 2006
- [9] TUNCAY R. N., ÜSTÜN Ö., Otomotiv Elektronikindeki Gelişmeler, IX. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, İstanbul, 27-28 Mayıs 2005
- [10] THOUNTHONG, P., RAEI, 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] BAS, M. E., Katı oksit yakıt pilleri., Bitirme Tezi, Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, 2005

- [13] ÇİTLER, M., VARHAN, F., HEV (Hybrid Electric Vehicle), Bitirme Tezi, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Ankara, 2002
- [14] MEHRDAD Ehsani, Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory and Design 2005
- [15] IQBAL Husain, Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals, 2003
- [16] Yüksek Performanslı Doğrultucuların İncelenmesi, KARABAĞ, Y., Veri Merkezleri Altyapı Yön. İşletim Uzmanı Veri Merkezleri Altyapı Yönetimi İşletim Müdürlüğü Teknoloji Başkanlığı, 2011
- [17] ARİFOĞLU, U., Güç Elektroniği Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, 2006
- [18] RASHİD, M.H., Power Electronics Handbook, Academic Press, New York, 2001
- [19] WU, B., High Power Converters and AC Drives, John Wiley and Sons, New Jersey, 2005
- [20] ADAM, A.A., Sabit Miknatıslı Senkron Motorda Moment Dalgalanması ve Gürültünün Azaltılması, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007
- [21] MOHAN, N., UNDELAND, T.M. ve ROBBİNS, W.P., Power Electronics Converters, Applications and Design, John Wiley & Sons, New York, 2002
- [22] BAKAN, A.F., Asenkron Motorda Doğrudan Tork Kontrolünün İncelenmesi ve Gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002
- [23] EMADİ, A., EHSANİ, E. ve MİLLER, J.M., Vehicular Electric Power Systems Land, Sea, Air and Space Vehicles, Marcel Dekker, New York, 2004
- [24] BOSE, B.K., Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall, New Jersey, 2002
- [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] ALTINAY M., ERGÜN AMAÇ, A., KARAKAS 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] ALTINAY, 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] EMADİ 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] MAHDAVİ J., EMADİ A., BELLAR M., D., EHSANİ 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] NASİRİ A., EMADİ A., Modelling, Simulation, and Analysis of Active Filter Systems Using Generalized State Space Averaging Method, 29th IEEE Industrial Electronics Society, 1999-2004, 2003
- [33] GAVİRİA, C., FOSSAS, E., GRİÑÓ, 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., GAVİRİA, C., GRİÑÓ 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., GAVİRİA, C., GRİÑÓ 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] NASİRİ A., Harmonics in Sea and Undersea Vehicles: Sources, Effects, and Solutions, IEEE Industrial Applications Conference, 161-167, 2005
- [37] 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
- [38] EMADİ, A., NASİRİ, A., BEKIAROV, S., B., Uninterruptible Power Supplies and Active Filters, Illinois Institute of Technology Elektrical and Computer Engineering Department Chicago, 246-259, 2005

- [39] Hibrit Elektrikli Araçlarda Kullanılan Konvertörlerin Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama (GSSA) Yöntemiyle Modellenmesi Tek.Öğrt.MURAT, T., Kocaeli Üniv., 2008
- [40] Elektrikli Hibrit Araçlar ve Sürme Devreleri, Y.T.Ü, Yüksek Lisans Bitirme Tezi, VOLKAN, E., 2009
- [41] Hibrit Elektrikli Yol Taşıtlarının Modellenmesi ve Kontrolü, Doktora Bitirme Tezi, ALİ, B., 2008
- [42] Seri Hibrit Elektrikli Araçların Modellenmesi ve Kontrolü, Yüksek Lisans Bitirme Tezi, BİLİROĞLU, A.Ö., 2008
- [43] Modeling of Power Electronic Loads in AC Distribution Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method, EMADİ, A., 2004
- [44] Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State-Space Averaging Approach, MAHDAVİ, J., EMADİ A., BELLAR, M.D. and EHSANİ, M., 1997

Ek A

%Boost dönüştürücü GSSA modeli için gerekli yazılım

global A B;

VIN = 20;

R = 10;

L = 1e-3;

C =50e-6;

t = [0 0.025];

x0 = [0; 0; 0; 0; 0; 0];

w = 1e4;

d = 0.25;

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)];

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

%asagida genelleştirilmiş durum uzay ortalama sonucu alınmaktadır

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)));
% durum uzay ortalama metodu
ssa_iL(inc) = (x5(inc));%0 dereceden yaklaşım SSA metodunu verecektir
ssa_vO(inc) = (x6(inc));%0 dereceden yaklaşım SSA metodunu verecektir
end
figure
plot(t,iL,t,vO,t,ssa_iL,t,ssa_vO)
gtext('GSSA Gerilim')
gtext('GSSA Akim')
gtext('SSA Gerilim')
gtext('SSA Akim')
xlabel('Zaman')
ylabel('Gerilim ve Akim')

```

Ek B

%Buck dönüştürücü GSSA modeli için gerekli yazılım

```

global A B;
VIN = 20;
R = 10;
L = 1e-3;
C = 10e-6;
t = [0 0.01];
x0 = [0; 0; 0; 0; 0; 0];
W = pi*1e4;
D = 0.25;
A = [ 0 W -1/L 0 0 0
      -W 0 0 -1/L 0 0
      1/C 0 -1/(R*C) W 0 0
      0 1/C -W -1/(R*C) 0 0
      0 0 0 0 -1/L
      0 0 0 0 1/C -1/(R*C)];
B=[(VIN*sin(2*pi*D))/(2*pi*L) -(VIN*(1-cos(2*pi*D)))/(2*pi*L) 0 0 (D*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
%asagida genellestirilmis durum uzay ortalama sonucu alınmaktadır
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)));
% durum uzay ortalama metodu
ssa_iL(inc) = (x5(inc));%0 dereceden yaklaşıım SSA metodunu verecektir
ssa_vO(inc) = (x6(inc));%0 dereceden yaklaşıım SSA metodunu verecektir
end
plot(t,iL,t,vO,t,ssa_vO,t,ssa_iL)
gtext('GSSA Gerilim')
gtext('GSSA Akim')
gtext('SSA Gerilim')
gtext('SSA Akim')
xlabel('Zaman')
ylabel('Gerilim ve Akım')

```

Ek C

%Buck-Boost dönüştürücü GSSA modeli için gerekli yazılım

```
global A B;
```

```
Vin = 20;
```

```
R = 10;
```

```
L = 1e-3;
```

```
C =50e-6;
```

```
t = [0 0.01];
```

```

x0 = [0; 0; 0; 0; 0; 0];
W = pi*1e4;
d = 0.5;
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) ] ;
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
%asagida genellestirilmis durum uzay ortalama sonucu alinmaktadir
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)));
% durum uzay ortalama metodu
ssa_iL(inc) = (x5(inc));%0 dereceden yaklasim SSA metodunu verecektir
ssa_vO(inc) = (x6(inc));%0 dereceden yaklasim SSA metodunu verecektir
end
plot(t,iL,t,vO,t,ssa_vO,t,ssa_iL)
gtext('GSSA Gerilim')
gtext('GSSA Akim')
gtext('SSA Gerilim')
gtext('SSA Akim')
xlabel('Zaman')

```

```
ylabel('Gerilim ve Akım')
```

Ek D

```
global A B;
R=35;
Req=0.1;
Leq=1e-3;
Ceq=10e-6;
RF = 10;
LF = 1e-3;
CF =100e-6;
t = [0 0.1];
x0 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
w = 2*pi*50;
Vm=115;
A = [ -Req/Leq -1/Leq 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
1/Ceq 0 0 0 0 0 0 0 4/(pi*Ceq) 0 0;
0 0 -RF/LF -1/LF 0 0 0 -4/LF 0 0 0 0;
0 0 1/CF (-1/(R*CF))+1/(CF*12^2) 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 -Req/Leq w -1/Leq 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 -w -Req/Leq 0 -1/Leq 0 0 0 0;
0 0 0 0 1/Ceq 0 0 w 0 0 0 0;
0 0 2/(pi*Ceq) 0 0 1/Ceq -w 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 -RF/LF w -1/LF 0;
0 -2/(pi*LF) 0 0 0 0 0 0 -w -RF/LF 0 -1/LF;
0 0 0 (-2*8)/(CF*12^3) 0 0 0 0 1/CF 0 (-1/(R*CF))+1/(CF*12^2) w;
0 0 0 (-2*9)/(CF*12^3) 0 0 0 0 0 1/CF -w (-1/(R*CF))+1/(CF*12^2) ] ;
B = [ 0 0 0 0 0 -Vm/(30*Leq) 0 0 0 0 0 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);
x7= x(:,7);
x8= x(:,8);
x9= x(:,9);
x10= x(:,10);
x11= x(:,11);
x12= x(:,12);
for inc = 1:trows
iout(inc) = (x3(inc)) + 2*x9(inc)*(cos(w*t(inc))) - 2*x10(inc)*(sin(w*t(inc)));
vo(inc) = (x4(inc)) + 2*x11(inc)*(cos(w*t(inc))) - 2*x12(inc)*(sin(w*t(inc)));
end
```



```
plot(t,iout,t,vo)  
xlabel('Zaman')  
ylabel('Gerilim ve Akım')
```

Ek E

%Bütün dönüştürücüler için aynı olup m file dosyası olarak oluşturulan fonksiyon yazılımı

```
function dxdt = f(t,x)
```

```
global A B;
```

```
dxdt = A*x + B;
```

ÖZGEÇMİŞ

Serhat Bağcı, 09.09.1985 tarihinde Sivas'ın Şarkışla ilçesinde doğdu. İlköğretim eğitimini Afyonkarahisar'da tamamladı. 2003 yılında Afyon Anadolu Öğretmen Lisesi'nden mezun oldu. 2003 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünden 2007 yılında mezun oldu. 2007 yılında Mercedes-Benz bünyesindeki Hasmer Otomotiv'de çalışmaya başladı. Şu anda Hasmer Otomotiv'de İdari İşler Müdürü olarak görev yapmaktadır.