

**T.C.**  
**BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAFİF ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN MPPT TABANLI BATARYA ŞARJ SİSTEMİ**  
**TASARIMI VE UYGULAMASI**

**LEYLA ARSLAN**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Programı**

**OCAK 2025**

**T.C.**  
**BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAFİF ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN MPPT TABANLI BATARYA ŞARJ SİSTEMİ**  
**TASARIMI VE UYGULAMASI**

**LEYLA ARSLAN**

**DANIŞMAN**  
**Doç. Dr. Harun ÖZBAY**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Programı**

**OCAK 2025**

## ONAY

Leyla Arslan tarafından hazırlanan “**Hafif Elektrikli Araçlar için MPPT Tabanlı Batarya Şarj Sistemi Tasarımı ve Uygulaması**” adlı tez çalışması .../.../...tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

Doç. Dr. Harun ÖZBAY  
(Danışman)

---

Prof. Dr. Selim ÖNCÜ  
(Üye)

---

Doç. Dr. Adem DALCALI  
(Üye)

---

Bu tezin kabulü, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../...gün ve .../... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Ahmet AYDIN  
Enstitü Müdürü

**BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI**  
**ETİK BEYANI**

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum **“Hafif Elektrikli Araçlar için MPPT Tabanlı Batarya Şarj Sistemi Tasarımı ve Uygulaması”** adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim. 03/01/2025

**Leyla ARSLAN**

## ÖNSÖZ

Son yıllarda dünya nüfusunun hızla artması ve teknolojinin gelişmesiyle enerji ihtiyacı artmıştır. Enerji ihtiyacının büyük bir kısmının fosil yakıt kaynaklarından üretilmesi, bu kaynakların sınırlı olması ve çevre için zararlı etkileri göz önüne alındığında yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim kaçınılmaz olmuştur. Dolayısıyla güneş, rüzgâr ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına rağbet artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşmaya başlamasıyla elektrikli araç kullanımının önü açılmıştır. Batarya teknolojisi ve batarya şarj sistemlerinde gerçekleşen gelişmelerle de yüksek verimli batarya şarj sistemleri geliştirilmeye başlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, hafif elektrikli araç batarya şarj sisteminin MPPT tabanlı tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Elektrikli araç batarya şarj sistemi için ZVS SEPIC DA-DA dönüştürücü tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar sert anahtarlama ve yumuşak anahtarlama için MPPT verimi ve sistem verimi açısından karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışması sırasında hedefime doğru ilerlerken sürecin başından sonuna kadar araştırma ve uygulama çalışmalarında yol gösterip desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, teşvik eden ve cesaretlendiren değerli hocam Sayın Doç. Dr. Harun ÖZBAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Beni yüksek lisansa başlama kararım konusunda, tüm bu süreçte ve hayatım boyunca destekleyen annem, babam ve kardeşim Yusuf Ziya'ya, varlıkları motivasyon kaynağı olan ikizim Zeynep ve eşi Oğuzhan'a, her konuda desteklerini hep hissettiğim babaannem, anneannem, dayım, yengem ve kuzenim Özge'ye, yanımda olamasalar da varlıklarını her daim hissettiğim biricik dedelerime, lisans ve yüksek lisans süreçlerimde desteğini esirgemeyen meslektaşım amcam Hasan ARSLAN'a teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında Bandırma'da bulunduğum süreçte desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Araştırma Görevlisi hocalarım Maide Feyza ER, Esra BALIK, Tuğba TEKKOL, Fatma Kebire BARDAK, Maide ÇAKIR, Şeyma ŞAHİNER YILMAZ ve Emre ÇELİK'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını BAP-22-1004-008 numaralı proje kapsamında destekleyen Bandırma Onyedİ Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### HAFİF ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN MPPT TABANLI BATARYA ŞARJ SİSTEMİ TASARIMI VE UYGULAMASI

Leyla ARSLAN

Bandırma Onyeddi Eylül Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Harun ÖZBAY

Ocak 2025, 85 sayfa

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle enerji ihtiyacı artmaktadır. Bu durum alternatif enerji kaynakları ihtiyacını beraberinde getirmektedir. Çevreci, temiz ve yenilenebilir olması yönüyle güneş enerjisi oldukça popüler bir konuma gelmiştir. Güneş enerjisinin kullanımının yaygınlaşması elektrikli araçlara yönelimin önünü açmıştır. Elektrikli araçlar için önemli bir konu olan batarya ve batarya şarj sisteminde gerçekleşen gelişmelerle batarya şarj sistemleri yüksek verimli şekilde tasarlanabilmektedir.

Bu çalışmada, hafif elektrikli araçlar için MPPT tabanlı batarya şarj sistemi tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Güneş enerjisi tabanlı tasarlanan sistemde güneş enerjisinden maksimum gücün elde edilebilmesi için maksimum güç noktasını takip eden (MPPT) algoritmalar kullanılmıştır. Elde edilen enerjinin maksimum verimde elektrikli araç bataryasına aktarılabilmesi için ise Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS) tekniği uygulanan ZVS SEPIC DA-DA dönüştürücü kullanılmıştır. Sıfır gerilimde anahtarlama tekniği uygulanan yumuşak anahtarlama ile anahtar üzerindeki kayıplar azaltılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Fotovoltaik Sistem, Batarya Şarj Cihazı, MPPT Algoritması, ZVS SEPIC Dönüştürücü

## **ABSTRACT**

**M.Sc. THESIS**

### **DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MPPT BASED BATTERY CHARGER SYSTEM FOR LIGHT ELECTRIC VEHICLES**

**Leyla ARSLAN**

**Bandırma Onyedi Eylül University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Electrical Electronics Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Harun ÖZBAY**

**January 2025, 85 pages**

Nowadays, with the development of technology, the need for energy is increasing. This situation brings with it the need for alternative energy sources. Solar energy has become very popular because it is environmentally friendly, clean, and renewable. The widespread use of solar energy has paved the way for electric vehicles. Battery and battery charging systems, which are an important issue for electric vehicles, can be designed in a highly efficient way with the developments.

In this study, the design and application of an MPPT-based battery charging system for light electric vehicles was carried out. In the system designed based on solar energy, maximum power point tracking (MPPT) algorithms are used to obtain maximum power from solar energy. In order to transfer the obtained energy to the electric vehicle battery at maximum efficiency, a SEPIC DC-DC converter using the Zero Voltage Switching (ZVS) technique was used. Losses on the switch are reduced with the soft switching technique applied by switching at zero voltage.

**Keywords:** Photovoltaic System, Battery Charger, MPPT Algorithm, ZVS SEPIC Converter

# İÇİNDEKİLER

|                                                                    | <u>Sayfa</u> |
|--------------------------------------------------------------------|--------------|
| ÖZET .....                                                         | I            |
| ABSTRACT .....                                                     | II           |
| İÇİNDEKİLER.....                                                   | III          |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                                | VI           |
| TABLO LİSTESİ.....                                                 | IX           |
| SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....                                     | X            |
| 1. GİRİŞ.....                                                      | 1            |
| 2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR.....                                         | 7            |
| 2.1. Elektrikli Araç Çeşitleri .....                               | 7            |
| 2.1.1. Tümü Elektrikli Araçlar (TEA).....                          | 8            |
| 2.1.2. Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA) .....                       | 8            |
| 2.1.3. Yakıt Hücresi Elektrikli Araçlar (YHEA).....                | 9            |
| 2.2. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryalar.....               | 10           |
| 2.3. Elektrikli Araç Şarj İstasyonları.....                        | 10           |
| 2.4. Batarya Şarj Yöntemleri .....                                 | 12           |
| 2.5. Yenilenebilir Enerji Kaynağı Entegreli Şarj İstasyonları..... | 13           |
| 3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER.....                                      | 14           |
| 3.1. Güneş Enerjisi .....                                          | 14           |
| 3.2. Fotovoltaik Hücreler.....                                     | 14           |
| 3.2.1. Fotovoltaik Etki .....                                      | 14           |
| 3.2.2. FV Hücre Türleri ve Eşdeğer Devre Modeli .....              | 15           |
| 3.2.2.1. Birinci Nesil FV Hücreler .....                           | 15           |
| 3.2.2.2. İkinci Nesil FV Hücreler .....                            | 16           |
| 3.2.2.3. Üçüncü Nesil FV Hücreler .....                            | 17           |
| 3.2.2.4. Eşdeğer Devre Modeli .....                                | 17           |

|          |                                                                     |    |
|----------|---------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.     | Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) .....                            | 20 |
| 3.3.1.   | MPPT Performansı.....                                               | 20 |
| 3.3.2.   | MPPT Algoritmaları .....                                            | 21 |
| 3.3.2.1. | Değiştir & Gözle (P&O) Algoritması.....                             | 21 |
| 3.3.2.2. | Artan İletkenlik (IC) Algoritması .....                             | 23 |
| 4.       | ANAHTARLAMALI DA-DA GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİ.....                        | 26 |
| 4.1.     | DA-DA Güç Dönüştürücülerin Sınıflandırılması .....                  | 26 |
| 4.2.     | SEPIC DA-DA Dönüştürücü .....                                       | 27 |
| 4.3.     | Anahtarlama Kayıpları .....                                         | 27 |
| 4.4.     | Yumuşak Anahtarlama Tekniği.....                                    | 30 |
| 4.4.1.   | Sıfır Akımda Anahtarlama Kısımlı Rezonans Dönüştürücü (ZCS) .....   | 31 |
| 4.4.2.   | Sıfır Gerilimde Anahtarlama Kısımlı Rezonans Dönüştürücü (ZVS)..... | 32 |
| 4.5.     | ZVS SEPIC Dönüştürücü .....                                         | 34 |
| 4.5.1.   | ZVS SEPIC Dönüştürücü Analizi.....                                  | 34 |
| 4.5.1.1. | Çalışma Aralıkları.....                                             | 35 |
| 5.       | BENZETİM ÇALIŞMALARI.....                                           | 40 |
| 5.1.     | MPPT Tabanlı Batarya Şarj Sistemi PSIM Benzetimi .....              | 41 |
| 5.1.1.   | P&O MPPT ve Sert Anahtarlama Benzetim Sonuçları.....                | 42 |
| 5.1.2.   | IC MPPT ve Sert Anahtarlama Benzetim Sonuçları .....                | 45 |
| 5.1.3.   | P&O MPPT ve Yumuşak Anahtarlama Benzetim Sonuçları .....            | 48 |
| 5.1.4.   | IC MPPT ve Yumuşak Anahtarlama Benzetim Sonuçları.....              | 51 |
| 6.       | DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....                                           | 56 |
| 6.1.     | MPPT Tabanlı Batarya Şarj Sistemi Tasarımı.....                     | 56 |
| 6.2.     | Kontrol ve Güç Katı Tasarımı.....                                   | 59 |
| 6.3.     | MPPT Tabanlı Batarya Şarj Sistemi Uygulama Çalışmaları.....         | 62 |
| 6.3.1.   | P&O MPPT ve Sert Anahtarlama Uygulama Sonuçları .....               | 62 |
| 6.3.2.   | P&O MPPT ve Yumuşak Anahtarlama Uygulama Sonuçları.....             | 67 |

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>7. SONUÇLAR.....</b>  | <b>75</b> |
| <b>8. KAYNAKLAR.....</b> | <b>78</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>    | <b>85</b> |



## ŞEKİL LİSTESİ

| <u>Sekil</u>                                                                                                                        | <u>Sayfa</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 2-1: Elektrikli araç (EA) çeşitleri.....                                                                                      | 7            |
| Şekil 2-2: Tümü elektrikli araçlara (TEA) ait çalışma sistemi.....                                                                  | 8            |
| Şekil 2-3: Hibrit elektrikli araçlara (HEA) ait çalışma sistemi .....                                                               | 9            |
| Şekil 2-4: Yakıt hücreli elektrikli araçlara (YHEA) ait çalışma sistemi .....                                                       | 9            |
| Şekil 2-5: EA şarj yöntemlerinin sınıflandırılması.....                                                                             | 11           |
| Şekil 2-6: SA-SG şarj yönteminde batarya gerilimi ve akımının değişimi.....                                                         | 13           |
| Şekil 3-1: FV hücre modeli .....                                                                                                    | 15           |
| Şekil 3-2: FV hücre tek diyotlu eşdeğer devre modeli.....                                                                           | 18           |
| Şekil 3-3: FV hücre akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristik eğrileri.....                                             | 20           |
| Şekil 3-4: P&O algoritmasına ait akış diyagramı.....                                                                                | 22           |
| Şekil 3-5: P&O algoritmasına ait güç-gerilim (P-V) eğrisi.....                                                                      | 22           |
| Şekil 3-6: IC algoritmasına ait akış diyagramı .....                                                                                | 24           |
| Şekil 3-7: IC algoritmasına ait akım-gerilim (I-V) eğrisi.....                                                                      | 24           |
| Şekil 4-1: DA-DA güç dönüştürücülerin sınıflandırılması .....                                                                       | 26           |
| Şekil 4-2: SEPIC DA-DA güç dönüştürücü.....                                                                                         | 27           |
| Şekil 4-3: Anahtarlama DC-DC dönüştürücü çıkış dalga şekli .....                                                                    | 28           |
| Şekil 4-4: Referans sinyali ve taşıyıcı sinyalin karşılaştırılması (a) Blok diyagram (b) Dalga şekilleri.....                       | 28           |
| Şekil 4-5: Anahtarlama elemanının akım, gerilim ve güç değişimleri.....                                                             | 29           |
| Şekil 4-6: Rezonans anahtar tipleri (a) L-tip, (b) M-tip.....                                                                       | 31           |
| Şekil 4-7: ZC rezonans anahtar tipleri (a) L-tip yarım dalga, (b) M-tip yarım dalga, (c) L-tip tam dalga, (d) M-tip tam dalga ..... | 32           |
| Şekil 4-8: Sıfır akım anahtarlama (ZCS) .....                                                                                       | 32           |
| Şekil 4-9: ZV rezonans anahtar tipleri (a) L-tip yarım dalga, (b) M-tip yarım dalga, (c) L-tip tam dalga, (d) M-tip tam dalga ..... | 33           |
| Şekil 4-10. Sıfır gerilim anahtarlama (ZVS) .....                                                                                   | 33           |
| Şekil 4-11: ZVS SEPIC DA-DA güç dönüştürücü.....                                                                                    | 34           |
| Şekil 4-12: ZVS SEPIC dönüştürücü dalga formları.....                                                                               | 36           |
| Şekil 4-13: ZVS SEPIC dönüştürücünün Mod-1’de çalışması.....                                                                        | 36           |
| Şekil 4-14: ZVS SEPIC dönüştürücünün Mod-2’de çalışması.....                                                                        | 37           |

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4-15: ZVS SEPIC dönüştürücünün Mod-3'te çalışması.....                                                                          | 38 |
| Şekil 4-16: ZVS SEPIC dönüştürücünün Mod-4'te çalışması.....                                                                          | 39 |
| Şekil 5-1: Elektrikli araç batarya şarj sistemi için önerilen sisteme ait blok diyagram .....                                         | 40 |
| Şekil 5-2: P&O MPPT sert anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m <sup>2</sup> için güç takibi .....                             | 42 |
| Şekil 5-3: Geleneksel SEPIC dönüştürücü PSIM benzetimi .....                                                                          | 43 |
| Şekil 5-4: P&O MPPT sert anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m <sup>2</sup> için anahtar akımı ve gerilimi .....              | 44 |
| Şekil 5-5: P&O MPPT sert anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m <sup>2</sup> için dönüştürücü çıkış akımı ve gerilimi.....     | 44 |
| Şekil 5-6: IC MPPT sert anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m <sup>2</sup> için güç takibi .....                              | 45 |
| Şekil 5-7: IC MPPT sert anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m <sup>2</sup> için anahtar akımı ve gerilimi .....               | 46 |
| Şekil 5-8: IC MPPT sert anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m <sup>2</sup> için dönüştürücü çıkış akımı ve gerilimi.....      | 46 |
| Şekil 5-9: P&O MPPT yumuşak anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m <sup>2</sup> için güç takibi .....                          | 48 |
| Şekil 5-10: ZVS SEPIC dönüştürücü PSIM benzetimi .....                                                                                | 49 |
| Şekil 5-11: P&O MPPT yumuşak anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m <sup>2</sup> için anahtar akımı ve gerilimi.....           | 50 |
| Şekil 5-12: P&O MPPT yumuşak anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m <sup>2</sup> için diyot akımı ve gerilimi.....             | 50 |
| Şekil 5-13: P&O MPPT yumuşak anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m <sup>2</sup> için dönüştürücü çıkış akımı ve gerilimi..... | 51 |
| Şekil 5-14: IC MPPT yumuşak anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m <sup>2</sup> için güç takibi .....                          | 52 |
| Şekil 5-15: IC MPPT yumuşak anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m <sup>2</sup> için anahtar akımı ve gerilimi.....            | 53 |
| Şekil 5-16: IC MPPT yumuşak anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m <sup>2</sup> için diyot akımı ve gerilimi.....              | 53 |
| Şekil 5-17: IC MPPT yumuşak anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m <sup>2</sup> için dönüştürücü çıkış akımı ve gerilimi.....  | 54 |
| Şekil 6-1: Elektrikli araç batarya şarj sistemi deney düzeneği .....                                                                  | 56 |

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6-2: 48V batarya grubu ve batarya yönetim sistemi (BMS) .....                                                                               | 57 |
| Şekil 6-3: Batarya şarj sistemi için uygulama devresi .....                                                                                       | 57 |
| Şekil 6-4: ACS712 akım sensörü, gerilim bölücü ve DSP mikrodenetleyici .....                                                                      | 58 |
| Şekil 6-5: (a) Geleneksel SEPIC dönüştürücü ve (b) ZVS SEPIC dönüştürücü .....                                                                    | 59 |
| Şekil 6-6: Kart tasarımları (a) Kontrol katı, (b) Güç katı .....                                                                                  | 60 |
| Şekil 6-7: Kontrol katına ait PCB tasarımı.....                                                                                                   | 61 |
| Şekil 6-8: Güç katına ait PCB tasarımı .....                                                                                                      | 62 |
| Şekil 6-9: P&O MPPT ve sert anahtarlama koşullarında 40W için güç takibi.....                                                                     | 63 |
| Şekil 6-10: P&O MPPT ve sert anahtarlama koşullarında 70W için güç takibi.....                                                                    | 63 |
| Şekil 6-11: P&O MPPT ve sert anahtarlama koşullarında 100W için güç takibi .....                                                                  | 64 |
| Şekil 6-12: P&O MPPT ve sert anahtarlama koşullarında (a) 40W, (b) 70W ve (c) 100W<br>için anahtar akım ve gerilimi.....                          | 65 |
| Şekil 6-13: P&O MPPT ve sert anahtarlama koşullarında (a) 40W, (b) 70W ve (c) 100W<br>için dönüştürücü çıkış akımı ve gerilimi .....              | 66 |
| Şekil 6-14: P&O MPPT ve yumuşak anahtarlama koşullarında 40W için güç takibi.....                                                                 | 67 |
| Şekil 6-15: P&O MPPT ve yumuşak anahtarlama koşullarında 70W için güç takibi.....                                                                 | 68 |
| Şekil 6-16: P&O MPPT ve yumuşak anahtarlama koşullarında 100W için güç takibi.....                                                                | 68 |
| Şekil 6-17: P&O MPPT ve yumuşak anahtarlama koşullarında (a) 40W, (b) 70W ve (c)<br>100W için anahtar akım ve gerilimi.....                       | 69 |
| Şekil 6-18: P&O MPPT ve yumuşak anahtarlama koşullarında (a) 40W, (b) 70W ve (c)<br>100W için diyot akım ve gerilimi .....                        | 70 |
| Şekil 6-19: P&O MPPT ve yumuşak anahtarlama koşullarında (a) 40W, (b) 70W ve (c)<br>100W için dönüştürücü çıkış akımı ve gerilimi ölçümleri ..... | 71 |
| Şekil 6-20: Termal analizör ölçümü.....                                                                                                           | 72 |
| Şekil 6-21: 40W için termal analizör sonuçları (a) Sert anahtarlama ve (b) yumuşak<br>anahtarlama .....                                           | 73 |
| Şekil 6-22: 70W için termal analizör sonuçları (a) Sert anahtarlama ve (b) yumuşak<br>anahtarlama .....                                           | 73 |
| Şekil 6-23: 100W için termal analizör sonuçları (a) Sert anahtarlama ve (b) yumuşak<br>anahtarlama .....                                          | 74 |

## TABLO LİSTESİ

| <b><u>Tablo</u></b>                                                                                | <b><u>Sayfa</u></b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>Tablo 3-1: P&amp;O algoritması için güç-gerilim (P-V) eğrisine göre çalışma koşulları .....</b> | <b>23</b>           |
| <b>Tablo 3-2: IC algoritması için akım-gerilim (I-V) eğrisine göre çalışma koşulları.....</b>      | <b>25</b>           |
| <b>Tablo 5-1: Geleneksel SEPIC ve ZVS SEPIC dönüştürücüye ait parametreler .....</b>               | <b>41</b>           |
| <b>Tablo 5-2: PI denetleyici ve fotovoltaik panele ait parametreler .....</b>                      | <b>42</b>           |
| <b>Tablo 5-3: Sert anahtarlama koşullarına ait benzetim sonuçları .....</b>                        | <b>47</b>           |
| <b>Tablo 5-4: Yumuşak anahtarlama koşullarına ait benzetim sonuçları.....</b>                      | <b>55</b>           |
| <b>Tablo 6-1: Sert anahtarlama koşullarına ait uygulama sonuçları.....</b>                         | <b>65</b>           |
| <b>Tablo 6-2: Yumuşak anahtarlama koşullarına ait uygulama sonuçları.....</b>                      | <b>71</b>           |
| <b>Tablo 6-3: Sert anahtarlama ve yumuşak anahtarlama için termal analizör sonuçları.....</b>      | <b>74</b>           |

## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

| Kisaltmalar | Açıklama                                                     |
|-------------|--------------------------------------------------------------|
| AA          | : Alternatif Akım                                            |
| CHadeMO     | : CHArge de MOve                                             |
| DA          | : Doğru Akım                                                 |
| DSP         | : Sayısal İşaret İşleyici (Digital Signal Process)           |
| EA          | : Elektrikli Araçlar                                         |
| EMI         | : Elektromanyetik Girişim (Electromagnetic Interference)     |
| FL          | : Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)                               |
| FV          | : Fotovoltaik                                                |
| HEA         | : Hibrit Elektrikli Araçlar                                  |
| IC          | : Artan İletkenlik (Incremental Conductance)                 |
| IEC         | : International Electrotechnical Commission                  |
| İYM         | : İçten Yanmalı Motor                                        |
| MPPT        | : Maksimum Güç Noktası Takibi (Maximum Power Point Tracking) |
| P&O         | : Değiştir & Gözle (Perturb & Observe)                       |
| PWM         | : Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)        |
| SA          | : Sabit Akım                                                 |
| SAE         | : Society of Automotive Engineers                            |
| SEPIC       | : Single Ended Primary Inductor Converter                    |
| SG          | : Sabit Gerilim                                              |
| SoC         | : Şarj Durumu (State of Charge)                              |
| TEA         | : Tümü Elektrikli Araçlar                                    |
| YEK         | : Yenilenebilir Enerji Kaynakları                            |
| YHEA        | : Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar                           |
| YSA         | : Yapay Sinir Ağları                                         |
| ZC          | : Sıfır Akım (Zero Current)                                  |
| ZCS         | : Sıfır Akımda Anahtarlama (Zero Current Switching)          |
| ZV          | : Sıfır Gerilim (Zero Voltage)                               |
| ZVS         | : Sıfır Gerilimde Anahtarlama (Zero Voltage Switching)       |

# 1. GİRİŞ

Günümüzde ulaşımdan sanayiye birçok sektörde gereken enerji ihtiyacı fosil yakıtlar tarafından karşılanmaktadır. Bu yakıtların karbon emisyonunu artırması ve çevreye olumsuz etkileri sebebiyle zaman açısından sürdürülebilir olmakla birlikte dünyanın her bölgesinde var olabilme özelliğini taşıyan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması yönünde atılan adımlar hızlanmaktadır [1]. Yenilenebilir enerji kaynaklarına (YEK) güneş, rüzgâr, hidrolik, biokütle, jeotermal, dalga ve hidrojen örnektir. YEK'ler doğal döngüsü içerisinde kendini hızlı bir şekilde yenileyebilme özelliğine sahip olduğundan tükenmez enerji kaynaklarıdır. Son yıllarda, fosil yakıtların hızla azalması nedeniyle de rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim büyük oranda artmıştır [2].

Güneş enerjisi, temiz, sınırsız, çevreci, güvenilir olması ve kullanım kolaylığı yönüyle yenilebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde meydana gelen füzyon olayı ile açığa çıkan ışıma enerjisidir. Atmosferin dışında güneş ışıınımı değeri  $1367 \text{ W/m}^2$  iken yeryüzüne ulaşan değer  $0-1000 \text{ W/m}^2$ 'dir. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretiminin temeli "fotovoltaik etki"ye dayanır. Fotovoltaik etki, bir malzeme güneş ışıınımına maruz kaldığında o malzeme üzerinde oluşan gerilim veya elektrik akımını ifade eder. Yeryüzüne ulaşan güneş ışıınımı fotovoltaik etki sonucunda fotovoltaik paneller yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Güneş ışıınımının elektrik enerjisi üretmek için kullanıldığı sistemlere fotovoltaik (FV) sistemler adı verilir [3],[4].

Tasarımı uygun şekilde yapılmış bir FV sistem az bir güneş ışıınımı ile MW mertebesinde elektrik üretebilir. FV sistemler, bir işletme ücreti, enerji kaynağı ya da ayrıca bir makine kullanımı gerektirmez ve hava kirliliğine sebep olmazlar. FV sistemler doğru akım (DA) üreten sistemlerdir. Üretilen bu elektrik enerjisini doğrudan DA gerilim ile çalışan cihazlarda kullanmak DA olarak depolanmak ya da alternatif akıma (AA) dönüştürerek AA ile çalışan cihazlarda kullanmak mümkündür [5].

FV sistemler ile elde edilen elektrik enerjisi sıcaklık, gölgelenme ve güneş ışıınım seviyesi gibi çevresel faktörlerin değişmesi nedeniyle sürekli olarak aynı seviyede olmamaktadır. Bu nedenle FV sistemlerde maksimum verimde enerji üretimi gerçekleştirebilmek için maksimum güç noktasını takip eden (MPPT) algoritmalar kullanılmalıdır [6]. Elde edilen maksimum gücün FV sistem çıkışına eklenecek olan yüke maksimum verimde aktarılabilmesi için ise FV ile yük arasına DA-DA güç dönüştürücü eklenmelidir [7]. Kullanılan bu dönüştürücü genellikle anahtarlamalı DA-DA dönüştürücü olarak tercih edilir. Anahtarlamalı DA-DA dönüştürücüler

günümüzde elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji sistemleri, bilgisayar, televizyon, cep telefonu gibi sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [8].

Anahtarlamalı DA-DA dönüştürücülerin temeli yarı iletken anahtar kullanılarak anahtarlama işleminin yapılmasıyla enerji aktarımı prensibine dayanır. Bu dönüştürücüler yüksek frekanslarda çalıştırılıp yüksek güç yoğunluğuna sahip olabilirler. Fakat ortalama güç değeri enerjinin periyoda bölümü olarak düşünüldüğünde daha yüksek anahtarlama frekansı değerlerinde çalışma yapmak anahtarın ilettime girerken ve iletimden çıkarken daha yüksek anahtarlama kayıplarına sahip olmasına ve elektromanyetik girişime (EMI) sebep olacaktır. Bu durumu önlemenin bir yolu anahtarlamalı dönüştürücü devresini sıfır akımda anahtarlama (ZCS) ya da sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS) yapacak şekilde yumuşak anahtarlama yöntemine göre düzenlemektir [9], [10], [11].

FV sistemlerin uygulama alanlarından biri olan elektrikli araçların (EA) ulaşım sektöründe yaygın olarak kullanılmaya başlamasıyla içten yanmalı motora (İYM) sahip araçların olumsuz çevresel etkilerini azaltacağı düşünülmektedir [12]. EA'lar enerji kullanımını optimize etmek için etkili güç yönetimi ve kontrolü gerektiren çok enerjili bir sistemdir. EA'lar, sıfır emisyon kabiliyetleri sayesinde son derece verimli bir ulaşım şekli olarak kabul edilir. EA'ların çeşitli avantajları aracılığıyla küresel olarak EA satışları önemli ölçüde artmış olup 2021 yılında bir önceki yıla göre iki katına çıkmış ve 2030 yılına kadar yollardaki EA sayısının 100 milyonu aşacağı tahmin edilmektedir [13],[14]. EA sayısının artması aynı zamanda enerji ihtiyacını da beraberinde getirecektir ve gereken bu enerjinin nereden ve nasıl karşılanacağı sorunu ortaya çıkacaktır. Şebeke üzerindeki yükler ile şebeke altyapısının sınırları düşünüldüğünde EA şarj istasyonu gibi yüksek güçte ve sayıda yükün aynı anda enerji talebi şebeke altyapısının aşırı yüklenmesi hatta çökmesi gibi sorunlar oluşturabilir. Dolayısıyla enerji talebinin artması ile bu araçların şarj altyapısının etkili bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Bu sorunlar için farklı çözüm önerileri sunulmaktadır. Bunlardan birisi de YEK'lerin şarj istasyonlarının yakınına kurulması veya bu istasyonlara entegre edilmesidir. Bu kapsamda, FV sistem entegreli EA şarj istasyonları enerji tüketimini sürdürülebilir ve çevre dostu bir şekilde karşılayabilme potansiyeli sunmaktadır [15].

EA'ların temel enerji kaynağı, elektrik enerjisini kimyasal ortamda depolamayı sağlayan bataryalardır. Batarya, EA'nın herhangi bir iç hasara neden olmadan verimli bir şekilde şarj edilmesi gereken ana bileşenidir. Bu nedenle batarya şarj sistemleri önem arz etmektedir [16].

Literatürde, YEK'ler ve güneş enerjisi kullanan sistemlere yönelik çalışmalar vardır. Güneş enerjisi şebekeye bağımlı ya da şebekeden bağımsız olarak birçok ticari, konut ve

endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Batarya şarj sistemleri, tarımda sulama sistemleri, ısıtma sistemleri gibi uygulamalar bu kullanıma örnektir.

Ş. Küçük çalışmasında, düşük güçlü batarya şarj sistemleri için tam köprü izoleli DA-DA dönüştürücünün analiz, tasarım ve benzetimini gerçekleştirmiştir. Önermiş olduğu DA-DA dönüştürücüde faz kaydırma kontrol yöntemi ile güç elemanlarının kendiliğinden yumuşak anahtarlama koşullarında çalışmasını amaçlamaktadır. Bu kapsamda 500W (48V/ 10A) çıkış gücüne sahip tam köprü türü izoleli faz kaydırmalı DA-DA dönüştürücünün kararlı hal analizi ve benzetimini gerçekleştirmiştir. Bu benzetim devresi ile 390 V giriş gerilimini 48 V çıkış gerilimine dönüştürmek amacıyla bir faz kaydırmalı DA-DA dönüştürücü tasarlamıştır. Dönüştürücü devresi 50 kHz anahtarlama frekansı ile çalıştırmıştır ve sonuçta yüksek verim elde edilmiştir [17].

E. A. Dantondji çalışmasında, şehir içinde kullanılan EA'lar için 1,2 kW'lık güç faktörü düzelten (GFD), izolasyon transformatörlü, yüksek frekanslı ve faz kaydırmalı sıfır gerilimde anahtarlama tam denetimli köprü (FB-PS-ZVS) dönüştürücü ve yüksek güç yoğunluklu yerleşik şarj cihazı tasarımı yapmıştır. Yapmış olduğu analiz ve tasarım çalışmalarının neticesinde gerçekleştirilen şarj cihazı prototipinin deneysel sonuçlarının, benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlara çok yakın olduğunu gözlemlemiştir [18].

T. Duman çalışmasında, FV sistemler için modüler yumuşak anahtarlama SEPIC DA-DA dönüştürücünün tasarımı ve uygulamasını yapmıştır. Çalışmada dönüştürücüye ait ZVS yöntemi ile çalışma detaylı olarak incelenmiştir. Önermiş olduğu SEPIC dönüştürücünün 80 W'lık silisyum FV panel için bir prototipini gerçekleştirmiş ve seri bağlı iki FV panelden oluşan bir sistem üzerinde testini gerçekleştirmiştir. Sürekli aynı seviyede olmayan güneş ışınımı koşullarında bile diğer yöntemlere göre çıkış gücünün %7 arttığını gözlemlemiştir. Sonuçta kısmi gölgelenme koşullarında çalışan FV sistemler için çalışmada önerilen modüler SEPIC DA-DA dönüştürücünün verim açısından daha başarılı olduğunu tespit etmiştir [19].

F. Aslan çalışmasında, tek fazlı köprüsüz GFD devreli veya FV panel destekli yükselten DA-DA dönüştürücü batarya şarj ve deşarj sistemi tasarımı ve benzetimini gerçekleştirmiştir. Sistemde şarj ve deşarj blokları ile PI denetleyici kullanarak sabit akım veya sabit gerilimde bataryanın şarj ve deşarj işlemi gerçekleştirilmektedir. FV panel destekli yükselten DA-DA dönüştürücü devresi MPPT algoritmalarından Değiştir & Gözle (P&O) algoritması kullanılarak kontrol edilmiştir. Batarya şarj ve deşarj devrelerinin benzetim çalışmalarını PSIM programı kullanarak yapmıştır. Çalışma sonucunda, FV panel beslemeli batarya şarj ve deşarj sistemi ve önerilen PQ denetleyicili batarya şarj ve deşarj sistemlerinin doğruluğunu PSIM ile yapmış olduğu benzetimde test etmiştir. Önerilen FV panel destekli şarj ve deşarj sisteminin sabit akım-sabit gerilim metodu ile lityum-iyon (Li-ion) bataryalara uygulanabildiğini göstermiştir [20].

O. Alkul çalışmasında, batarya şarj sistemleri için güç elektroniği elemanlarından ve yüksek frekanslı transformatörden meydana gelen ve çift yönlü enerji akışı sağlayan bir DA-DA dönüştürücü tasarımı yapmıştır. Gerçekleştirdiği sistemde farklı gerilim seviyelerinde çalışma sağlamak amacıyla üç giriş, üç çıkışlı transformatör kullanmıştır. Tasarımını yapmış olduğu sistemin benzetimini MATLAB-Simulink programı yardımı ile yaparak laboratuvar ortamında kurşun asit batarya ünitelerine uygulayarak çalışmasını test etmiştir. Kontrolcü olarak PI denetleyici ve Ziegler-Nichols parametre ayarlama yöntemi kullanmıştır. Benzetim ve uygulamasını gerçekleştirdiği dönüştürücünün farklı gerilim aralıklarında her iki yönde de çalışmaya imkân verdiğini ve farklı sayıda batarya üniteleri ile kullanılabileceğini tespit etmiştir. Ayrıca tek bir denetleyici yardımıyla batarya şarj/deşarj kontrolü yapılabildiğini gözlemlemiştir. Çalışmasında galvanik yalıtım sağlayan yüksek frekanslı transformatör kullandığından transformatör boyut ve çıkış filtre boyutlarında küçülme ve toplam ağırlıkta azalma sağlamıştır. Tasarımını yapmış olduğu dönüştürücünün EA'larda, mikroşebekelerde, kesintisiz güç kaynaklarında ve batarya şarj/deşarj işlemlerinde kullanılabileceği gibi FV sistemler veya yakıt hücreleri gibi dağıtık üretim birimlerinin şebeke bağlantılarında da kullanılabileceği sonucuna varmıştır [21].

E. P. Kesik çalışmasında, FV sistem uygulamaları için bir SEPIC batarya şarj cihazı tasarlamış ve gerçekleştirmiştir. İlk aşamada ideal devre elemanları kullanarak bir benzetim devresi hazırlamıştır. FV panel yerine giriş güç kaynağı olarak ideal bir gerilim kaynağı ve çıkış yükü olarak batarya yerine direnç seçmiştir. LTSPICE programı ile benzetim çalışmasını yapmıştır. Benzetim sonuçlarını yapmış olduğu teorik hesaplarla karşılaştırmıştır. Çalışmaya ait testleri laboratuvar ortamında iki aşamada yapmıştır. Her iki aşamada da giriş kaynağı olarak bir güç kaynağı kullanmıştır. İlk aşamada, yük olarak direnç ve ikinci aşamada ise yük olarak 12V/9Ah'lık bir batarya kullanmıştır. İkinci aşamada ise giriş güç kaynağı olarak 130 W güce sahip FV panel ve yük olarak 12V/12Ah'lık bir batarya kullanarak gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirmiş olduğu SEPIC şarj cihazına ait çıkış gerilim değeri 14,14V ve çıkış akımı değeri 8,32A'dır. Bu sonuçları giriş gerilimi değerini 12 V ile 25 V arasında değiştirerek elde etmiştir. Gerçekleştirilen SEPIC şarj cihazının 12 V giriş gerilimi değeri için %87,6 verime sahip olduğunu gözlemlemiştir. Giriş gerilimi değeri artarken şarj cihazına ait verimin de arttığını gözlemlemiştir [22].

Ü. C. Özçelik çalışmasında, farklı çıkış gerilimlerine sahip bataryaları şarj edebilmek amacıyla DA-DA dönüştürücü uygulaması gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda akım ve gerilim kontrollü Tam Köprü DA-DA dönüştürücü tasarımı yapmıştır. AA şebeke geriliminin doğrultularak DA-DA güç dönüştürücünün besleme geriliminin elde edilmesini sağlamıştır.

30 kHz anahtarlama sinyalinin elde edilmesi, akım ve gerilim kontrolünün yapılabilmesi amacıyla kontrol devresi tasarlamıştır. Yüksek frekans değerinde çalışma yapabilmek amacıyla ise yüksek frekans transformatörü tasarımı yapmıştır. Yüksek frekans transformatörünün çıkışından elde edilen kare dalga sinyalini doğrultmak amacıyla yüksek frekanslı doğrultucu devre tasarımı yapmıştır. Tasarlanan sistem ile çıkış gerilimi 0-250 V aralığındadır ve 10 A akım değerine kadar kontrol edilebilmektedir. Deney sonuçlarına bakıldığında ise giriş gerilimi şebeke beslemeli olarak, çıkış gerilimi ise görev döngüsü değerini kademe kademe arttırarak elde etmiştir. Çıkışa 25  $\Omega$  değerinde sabit yük bağlayarak ve çıkıştan 10 A akım çekilene kadar çalışma yüzdesini arttırıp sonuç almıştır [23].

A. Singh ve J. Gupta çalışmalarında, düşük gerilim değerine sahip EA'lar için iki aşamalı yerleşik batarya şarj cihazının tasarımını ve kontrolünü yapmışlardır. Önermiş oldukları şarj cihazı, yüksek güç faktörü değerinde geniş bir AA giriş gerilimi aralığında çalışmaktadır. Batarya şarj cihazı tasarımının ilk aşamasında sürekli giriş akımı özelliğine sahip köprüsüz, yüksek kazançlı, yüksek güç faktörü değerine sahip bir AA-DA dönüştürücü bulunmaktadır. Şarj cihazının ikinci aşamasında ise sabit akım ve sabit gerilim şarj yöntemine uygun farklı batarya şarj yöntemleri için izole edilmiş bir Cuk DA-DA dönüştürücü kullanılmaktadır. Batarya şarj sistemi 650 W güç değerinde ve 24-72V aralığında değişken çıkış gerilimine sahiptir. Tasarımlarının doğruluğunu benzetim ve uygulama çalışmalarıyla test etmişlerdir. Önermiş oldukları batarya şarj cihazının performansını GFD gibi çeşitli parametreler açısından literatür ile karşılaştırmışlardır [24].

S. Narthana ve J. Gnanavadiyel çalışmalarında, EA batarya şarj işleminde kullanılmak üzere tasarlanan Cuk dönüştürücü için bulanık mantık (FL) denetleyicisinin (IT2FLC) tasarımını yapmışlardır. Bu tasarımdaki amaçları, sağlam ve akıllı bir kontrol yaklaşımı kullanarak dönüştürücünün besleme tarafında daha az harmonik bozulma ve bir değerinde güç faktörü gibi iyi güç kalitesi özelliklerine sahip gelişmiş doğruluk ve kararlılık gibi en iyi kontrolör parametrelerini elde etmektir. IT2FLC, batarya şarj sisteminin çalışmasını verimli hale getirmek için sabit akım ve sabit gerilim şarj yöntemlerine ait en uygun PI parametrelerini elde etmişlerdir. Bu parametrelere bakıldığında, 0,01 saniyeden daha az yerleşme süresi, %1'lik azaltılmış aşım ve yaklaşık %93,85'lik verimliliğe sahip bir tasarım olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu nedenle, belirsizlikleri azaltmak ve şarj işleminin dinamik kararlılığını iyileştirmek için IT2 kontrolör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Kontrolörün özelliklerini MATLAB/Simulink kullanılarak incelemiş ve Ziegler-Nicholas yöntemi ile PI ve T1FL tabanlı PI ile karşılaştırılmışlardır. IT2 kontrolör kullanıldığında dönüştürücünün çalışmasını değerlendirmek amacıyla 350 W, 48 V/5 A şarj cihazının bir prototipini oluşturmuş ve DSPIC33F ile doğrulamışlardır [25].

Bu tez çalışmasında ise, EA batarya şarj işlemini gerçekleştirmek amacıyla MPPT tabanlı bir ZVS SEPIC DA-DA dönüştürücü tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Batarya şarj işleminin yüksek verimle yapılabilmesi için FV sistemden elde edilen maksimum gücün sürekliliğinin sağlanması önemlidir. Dolayısıyla MPPT algoritmaları kullanılmıştır. FV sistemden elde edilen enerjinin maksimum verimle bataryaya aktarılabilmesi amacıyla ise anahtarlama kayıplarının azaltıldığı ZVS SEPIC dönüştürücü kullanılmıştır. Tasarlanan ve uygulaması yapılan sistemin ilk olarak PSIM programında benzetimi yapılmıştır. PSIM benzetiminde, sistem ilk geleneksel SEPIC dönüştürücü olarak çalıştırılmış ve sert anahtarlama yöntemine ait sonuçlar iki farklı MPPT algoritması için alınmıştır. Ardından yumuşak anahtarlamanın sağlanabilmesi amacıyla dönüştürücü devresine rezonans devresi eklenmiş ve ZVS SEPIC dönüştürücü için yine iki farklı MPPT algoritmasına ait sonuçlar alınmıştır. Her iki algoritma ve her iki anahtarlama yöntemi için de sistemin maksimum gücü takip etme performansı incelenmiştir. Dönüştürücü devresinde kullanılan yarı iletken anahtara ait akım ve gerilim sonuçları ile sistemin çıkışına ait akım ve gerilim sonuçları alınarak sert anahtarlama ve yumuşak anahtarlama yöntemlerinin verim açısından karşılaştırması yapılmıştır.

Benzetimi yapılan sistemin deneysel çalışmalarında ise benzetim çalışmalarında olduğu gibi iki farklı dönüştürücü topolojisi ve iki farklı anahtarlama yöntemi için çalışma yapılmıştır. Tek bir MPPT algoritması kullanılarak oluşturulan program gömülü kod ile oluşturulmuş ve TI firmasına ait TMS320F28335 DSP mikrodeneleyici ile dönüştürücüde bulunan yarı iletken anahtar için PWM sinyali oluşturularak anahtarın sürülmesi sağlanmıştır. Yarı iletken anahtara ait akım ve gerilim sonuçları ile sistem çıkışındaki akım ve gerilim sonuçlarına bakılarak verim açısından karşılaştırma yapılmıştır. Anahtarlama yöntemleri arasındaki farkın gözlemlenebilmesi amacıyla ek olarak, sistemin geleneksel SEPIC dönüştürücü şeklinde çalışması ile ZVS SEPIC dönüştürücü olarak çalışmasında termal analizör ile sıcaklık ölçümü yapılarak yarı iletken anahtar üzerindeki sıcaklık ölçülmüş ve iki farklı anahtarlama yöntemi için karşılaştırması yapılmıştır.

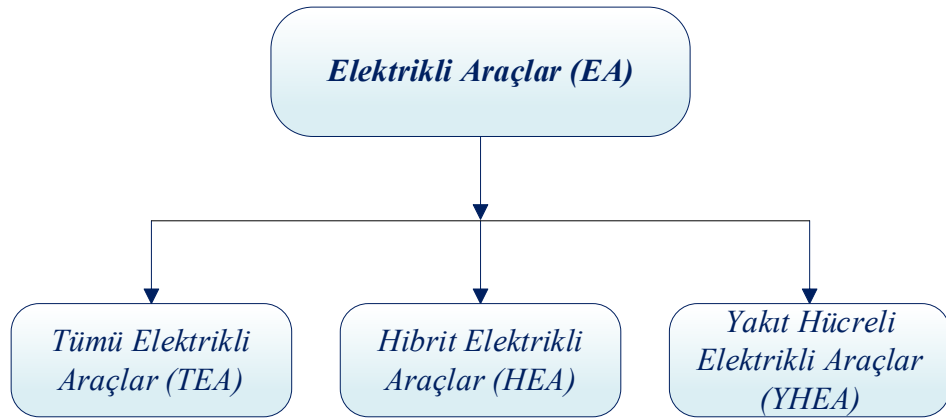
## 2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

EA'ların tarihi, ilk kez 1885 yılında üretilen içten yanmalı motorlu (İYM) araçlardan daha eskidir. İlk EA 1832-1836 yılları arasında tekrar şarj edilemeyen batarya sistemi ile yapılmıştır [26]. 1856-1881 yılları arasında verimi yüksek DA motorlarının kullanıldığı şarj edilebilir batarya sistemleri ile ilgili gelişmeler yaşanmıştır. 1859 yılında ilk şarj edilebilir batarya olan kurşun-asit batarya icat edilmiş ve 1881 yılında pazarlanabilir ürün haline getirilmiştir [27]. Lityum-iyon (Li-ion) bataryaların 1970 yılında geliştirilmesi ile de EA'larda batarya sistemi açısından yeni bir gelişme gerçekleşmiştir. Yaşanan bu gelişmeler ışığında EA'lar gün geçtikçe popülerlik kazanmış ve yaklaşık 70 yıl boyunca kullanılmıştır [28].

Batarya teknolojisinin istenilen boyutlara ulaşamaması, şarj istasyonu sayısının sınırlı olması ve şarj sürelerinin uzun olması gibi dezavantajlar EA'ların kullanımını kısıtlamaktadır. Bu dezavantajların en önemlisi motor tahrik sistemine enerji sağlayan bataryaların arzu edilen performansta olmamasıdır çünkü bataryalar aracın sürüş mesafesini belirlemekte ve aracın maliyetini doğrudan etkilemektedir. Fakat teknolojinin ilerlemesi ile bataryaların kapasitelerinde de önemli artışlar olmuştur. Bu durum da EA'lara tekrardan yönelimin önünü açmıştır [29].

### 2.1. Elektrikli Araç Çeşitleri

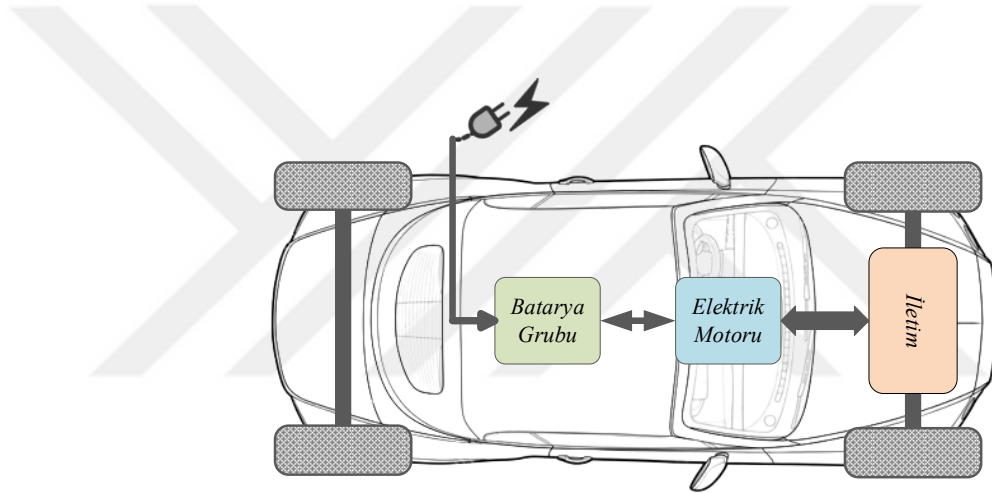
Günümüzde EA'lar motor teknolojilerine göre Tümü Elektrikli Araçlar (TEA), Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA) ve Yakıt Hücresi Elektrikli Araçlar (YHEA) olmak üzere üç sınıfa ayrılabilir [30]. EA'lara ait sınıflandırma Şekil 2-1'de gösterilmiştir.



Şekil 2-1: Elektrikli araç (EA) çeşitleri

### 2.1.1. Tümü Elektrikli Araçlar (TEA)

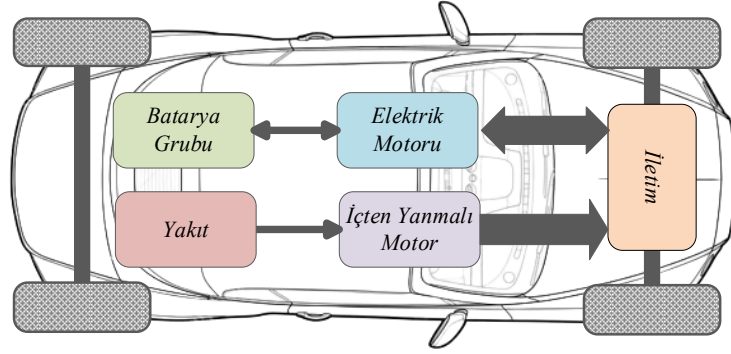
Tümü elektrikli araçlar (TEA), İYM'ye sahip değildir ve benzin veya dizel gibi yakıt kullanımı bulunmamaktadır. Bu nedenle TEA'lar “sıfır emisyonlu araçlar” olarak adlandırılmaktadır [30]. Bu tür araçlarda tahrik, elektrik motoru, batarya grubu ve güç dönüştürücülerinden oluşan kontrol sistemi ile yapılmaktadır [31]. TEA'ların avantajları, batarya grubu ile sağlanan elektrik enerjisinin elektrik motorunu tahriki ile hareketin sağlanması ve rejeneratif frenleme sayesinde batarya grubunun şarj edilebilmesi iken, HEA'lara kıyasla batarya grubunun daha büyük ağırlığa sahip olması, İYM araçlara kıyasla menzillerinin sınırlı olması ve batarya şarj sürelerinin uzun olması dezavantajlarıdır [32]. TEA'ların çalışma sistemi Şekil 2-2'de gösterilmiştir.



Şekil 2-2: Tümü elektrikli araçlara (TEA) ait çalışma sistemi

### 2.1.2. Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA)

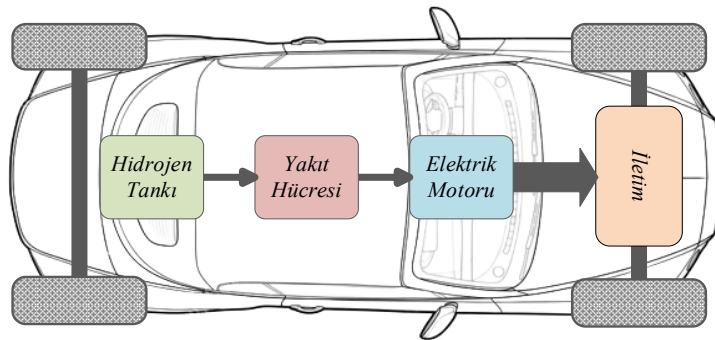
Hibrit elektrikli araçlar (HEA), geleneksel İYM ve bir elektrik motorunun birleşimiyle tahrik edilir. Elektrik motoruna enerji sağlayan batarya grubu, aracın içten yanmalı motorunun ürettiği güç sayesinde şarj olur [31]. HEA'ların hem elektrik motoru hem de içten yanmalı motora sahip olmaları yönüyle verimlerinin artması ve egzoz emisyonlarını önemli ölçüde azaltması avantajları iken, elektrik motoru ile gidilebilecek menzilin kısıtlı ve bu tür araçların maliyetinin yüksek olması dezavantajlarıdır [32]. HEA'ların çalışma sistemi Şekil 2-3'te gösterilmiştir.



**Şekil 2-3:** Hibrit elektrikli araçlara (HEA) ait çalışma sistemi

### 2.1.3. Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (YHEA)

Yakıt hücreli elektrikli araçlar (YHEA), yakıt olarak doğrudan hidrojen kullanarak kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi ile tahrik edilmektedir. YHEA’larda TEA’larda bulunan batarya grubu yerine yakıt hücresi bulunmaktadır. Bu tür araçlarda bir de hidrojenin depolanması için tank bulunmaktadır [30]. YHEA’ların yüksek verimli olmaları, egzoz emisyonlarının az olması, gürültüsüz çalışmaları avantajları iken, maliyetlerinin yüksek olması, yakıt hücrelerinde kullanılacak hidrojenin dağıtımı ve depolanmasının zorlukları ise dezavantajlarıdır [32]. YHEA’ların çalışma sistemi Şekil 2-4’te gösterilmiştir.



**Şekil 2-4:** Yakıt hücreli elektrikli araçlara (YHEA) ait çalışma sistemi

## 2.2. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryalar

Günümüzde gelişen teknolojinin ürünleri olan EA'lar, robotik, bilgisayar, cep telefonu, uzay sistemleri gibi teknolojik ürünler yüksek enerji potansiyeline sahip, çevre dostu, hafif, kolay ulaşılabilir, düşük maliyetli, güvenilir ve depolanabilen enerji kaynağına ihtiyaç duymaktadır. Bugüne kadar devam eden enerji depolama çalışmaları depolanacak enerjinin çeşidine bağlı olarak ısı enerjisinin, elektrik enerjisinin, mekanik enerjisinin ve kimyasal enerjisinin depolanması şeklinde gerçekleştirilmiştir [33].

Piller kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek depolayan cihazlardır. Genellikle aynı kimyasal yapıya, aynı boyutlara ve aynı elektrik kapasiteye sahip pillerin bir araya getirilmesiyle oluşan gruplar ise batarya olarak adlandırılmaktadır [34].

Bataryalar şarj edilemeyen (birincil) ve şarj edilebilir (ikincil) bataryalar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bataryalarda uygulanan kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi işlemi tek yönlü ise bu bataryalara şarj edilemeyen, dönüşümün tersinir olduğu çift yönlü dönüşüm varsa bu bataryalara şarj edilebilir bataryalar denilmektedir. Şarj edilebilir bataryalar kullanılan elektrot/elektrolit veya kimyasal yapısına göre kurşun-asit (Pb-asit), nikel-kadmiyum (Ni-Cd), nikel-metal-hidrit (Ni-MH), lityum-iyon (Li-ion), lityum-iyon-polimer (Li-Po) ve sodyum-nikel-klorür (NaNiCl) olarak sınıflandırılmaktadır [35]. Li-ion bataryalar yüksek enerji yoğunluğu ve uzun çevrim ömrü nedeniyle günümüzde EA'ların çoğunluğunda kullanılan batarya türüdür [36].

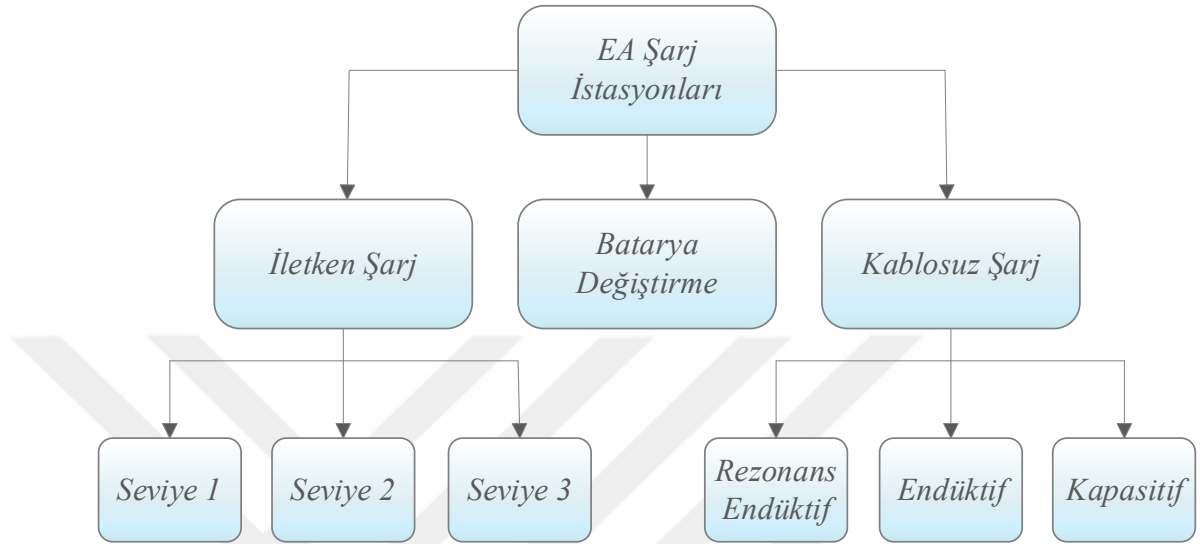
## 2.3. Elektrikli Araç Şarj İstasyonları

EA'larda kullanılan elektrik motorunun ana güç kaynağı batarya grubudur. EA'lar için en büyük zorluk batarya grubunun minimum sürede şarj edilmesidir. Bu konuda EA şarj istasyonu önemli bir rol oynamaktadır [16]. EA şarj yöntemleri iletken şarj (conductive charging), kablosuz şarj (wireless charging) ve batarya değiştirme (battery swapping) olmak üzere üç gruba ayrılabilir. EA şarj yöntemlerine ait sınıflandırma Şekil 2-5'te gösterilmiştir. Günümüzde EA şarjı için iletken şarj yöntemi yaygın olarak kullanılırken kablosuz şarj ve batarya değiştirme yöntemleri henüz geliştirilme aşamasındadır [37].

EA şarj altyapısı için birkaç uluslararası standart yer almaktadır. Avrupa'da yaygın olarak kullanılan IEC (International Electrotechnical Commission), merkezi Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan üreticiler tarafından kullanılan SAE (Society of Automotive Engineers), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), Japonya'da geliştirilmiş olan CHAdeMO

(CHArge de MOve) ve Çin’de hem AA hem de DA için kullanılan Guabiao (GB/T) bu standartlardandır. EA şarjı için IEC ve SAE standartları en yaygın kullanılanlardır [38].

Türkiye’de IEC 61851 ve IEC 62196 standartları, SAE J1772 standardı ve hızlı şarj için CHAdeMO’ya ait standart kullanılmaktadır [39].



Şekil 2-5: EA şarj yöntemlerinin sınıflandırılması

Otomotiv endüstrisinin belirlediği SAE J1772 standardına göre Seviye 1, Seviye 2 ve Seviye 3 olmak üzere üç farklı şarj seviyesi bulunmaktadır. İletken şarj yöntemleri de olarak bilinen bu şarj seviyelerinden seviye 1 şarjı yavaş şarj yöntemi olarak kabul edilirken seviye 2 şarjı daha kısa süreli şarj imkânı sağlar. Seviye 3 şarjı ise hızlı şarj yöntemi olarak kabul edilmektedir. [37].

**Seviye 1:** Herhangi bir güvenlik tedbirine ihtiyaç duyulmadan standart bir priz ile giriş gerilimi 120-220 V AA ve akım değeri 15-20 A olarak şarj işlemi gerçekleştirilebilmektedir [38]. Çoğunlukla evlerde ve iş yerlerinin otoparklarında kullanılan Seviye 1 şarj istasyonunda şarj süresi yeteri kadar uzun olduğundan dağıtım şebekesi üzerinde diğer şarj seviyelerine göre daha az olumsuz etkisi vardır. Seviye 1 şarj istasyonu, 5-12 saat şarj süresine ve 1,2-3,8 kW çıkış gücü değerlerine sahiptir [40].

**Seviye 2:** Kamu ve özel tesislerde tercih edilen şarj yöntemidir. Seviye 3 şarj istasyonlarına göre daha ucuzdur ve Seviye 1 şarj istasyonlarına göre daha kısa şarj süresine

sahiptir [41]. Seviye 2 şarj istasyonu, 208-240 V AA giriş gerilimi, 20-80 A akım ve 3,8-15 kW çıkış gücü değerlerinde şarj imkânı sunmaktadır. Şarj süresi 1-4 saattir [40].

**Seviye 3:** Hızlı şarj etme yöntemidir. Seviye 3 şarj istasyonlarında şarj işlemi AA ve DA sınıf şarj olarak iki şekilde olmaktadır. Şarj süresi elektrikli aracın batarya boyutuna bağlı olarak 20-30 dakika arasındadır. Seviye 3 şarj istasyonları hızlı ve yüksek şarj kapasitelerine sahip olduğundan trafiğin yoğun olduğu, acil enerji ihtiyacının bulunduğu dinlenme tesisleri ve otoyollarda bulunmaktadır. Giriş gerilimi değeri sınıfa göre 208-240 V AA ve 600 V DA değerlerinde olabilmektedir [40].

## 2.4. Batarya Şarj Yöntemleri

Bir bataryanın verimli bir şekilde şarj edilebilmesi için uygun bir batarya, optimum bir şarj mimarisi ve bataryaya uygun bir şarj yöntemi gerekmektedir. Batarya şarj yöntemlerinin amacı batarya ömrünü ve performansını koruyarak şarj süresini azaltmak ve bataryanın önceden belirlenmiş güvenli çalışma parametrelerine uyum sağlayarak şarj işlemini gerçekleştirmektir [13].

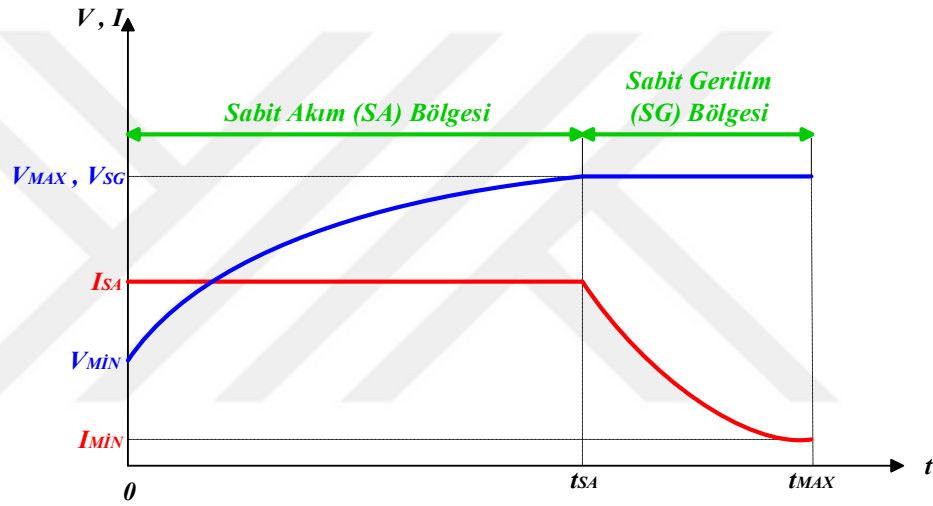
EA bataryası şarj edilirken kullanılan iletken şarj ve kablosuz şarj için üç farklı şarj yöntemi bulunmaktadır.

**Sabit Akım (SA) Şarj Yöntemi:** Sabit akım şarj yöntemi yaygın olarak kullanılan ve karmaşık olmayan geleneksel şarj tekniğidir [13]. Bu yöntemde, şarj boyunca sabit bir akım değerinin korunması sağlanır. SA şarj yönteminde şarj akımını belirlemek kolayken aşırı şarja maruz kalıp ısınma dolayısıyla bozulmasının önlenmesi açısından akım sınırlı bir değere sahiptir [20]. Genellikle nikel-kadmiyum (Ni-Cd) bataryaların şarj edilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde bataryanın şarj durumunu (State of Charge) (SoC)) belirleme zorluğu vardır ve bu durum aşırı şarja ya da yetersiz şarja sebep olabileceğinden bataryanın yaşam döngüsünde bir azalmaya yol açabilir [42].

**Sabit Gerilim (SG) Şarj Yöntemi:** Sabit gerilim şarj yöntemi, gerçekleştirmesi ve kontrolü basit bir yöntemdir. Şarj işleminin başlangıcında, düşük batarya iç direnci değerine bağlı olarak kaynaktan yüksek bir akım çekilebilir ve bu akım değerinin bataryaya zarar vermemesi için sınırlandırılması gerekmektedir [43]. Şarj işlemine bataryaya zarar vermeyen bir gerilim değeri ile başlanır ve bu gerilim değeri istenilen seviyeye ulaştığında sabitlenir. Şarjın artışına bağlı olarak batarya iç direncinin artması nedeniyle şarj akımı zamanla azaltılır. Şarj akımı sızıntı akımı ile

tamamlanmış olur ve böylelikle SA şarj yöntemine kıyasla bataryanın aşırı şarj olması önlenmiş olur. Ancak şarj süresi SA şarj yöntemine göre daha uzundur [13].

**Sabit Akım – Sabit Gerilim (SA-SG) Şarj Yöntemi:** Bu şarj yöntemi, SA ve SG şarj yöntemlerinin birleştirildiği bir yöntemdir. Şarj işlemi ilk olarak SA yöntemi ile başlar. Gerilim değeri en yüksek güvenli eşik değerini ( $V_{MAX}$ ) aştığında SG şarj yöntemine geçiş yapılır. Şarj akımı değerinin artması durduğunda veya batarya maksimum şarj değerine ulaştığında şarj işleminin bittiği kabul edilmektedir [13]. Li-ion ve Li-ion polimer elektrokimyasal pil yapıları için SA-SG şarj yöntemi önerilmektedir. Bu şarj yöntemine ait grafik Şekil 2-6'da gösterilmiştir.



Şekil 2-6: SA-SG şarj yönteminde batarya gerilimi ve akımının değişimi

## 2.5. Yenilenebilir Enerji Kaynağı Entegreli Şarj İstasyonları

İYM'ye sahip araçların yakıt kaynağı olarak fosil yakıtları kullanması ve bu kaynakların çevreye olumsuz etkileri sebebiyle EA kullanımı önem arz etmektedir. EA'ların verimi son derece yüksek olsa da çevreye verilen zararı azaltabilmeleri için bu araçlara güç sağlayan elektrik kaynağının seçimi önemlidir. Bu bağlamda YEK kullanımının yaygınlaştırılması gerekmektedir [2].

YEK'ler, EA'ların şarj edilmesi için en iyi alternatiftir çünkü bu kaynaklar karbon emisyonunu ve şebeke üzerindeki yükü azaltma konusunda iyi bir çözümdür. Ayrıca YEK'ler tarafından üretilen fazla enerji şebekeye geri aktarılabilir [16].

### 3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

#### 3.1. Güneş Enerjisi

Dünyada yaşam enerjisinin büyük bir bölümü güneş tarafından sağlanmaktadır. Güneş içerisinde sürekli olarak hidrojenin helyuma dönüştüğü füzyon olayı gerçekleşmektedir ve bunun sonucunda oluşan kütle farkı ısı enerjisine dönüşerek uzaya yayılmaktadır. Yayılan bu enerjinin çok az bir kısmı yeryüzüne ulaşmaktadır. Bunun nedeni atmosferdeki karbondioksit, su buharı ve ozon gibi gazların enerjiyi absorbe etmeleri ve bunun yanı sıra enerjinin kat etmesi gereken yolun uzunluğudur. Tüm bu durumlar göz önüne alındığında atmosferin dışına ulaşan güneş ışınımı değeri  $1367 \text{ W/m}^2$  olarak kabul edilir ve bu değer güneş sabitidir. FV sistem uygulamaları gibi pratik uygulamalarda ise yeryüzüne ulaşan maksimum ışınım değeri  $1000 \text{ W/m}^2$  olarak kabul edilmektedir [44].

#### 3.2. Fotovoltaik Hücreler

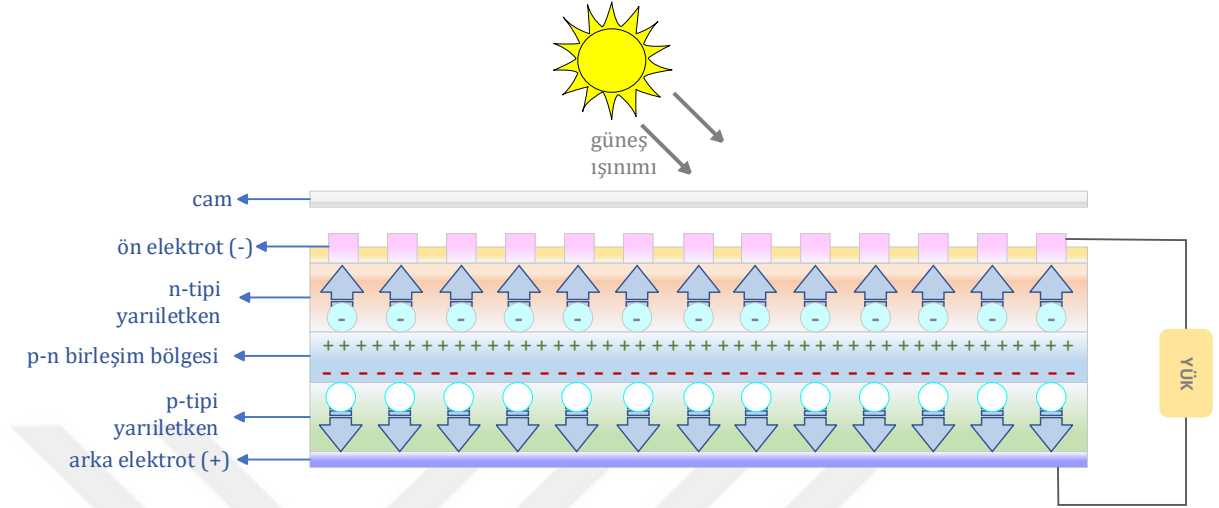
Fotovoltaik hücreler, güneş ışınımını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken cihazlardır [45]. Bir fotovoltaik hücre, yarı iletken bir malzemeye farklı bir yarı iletken malzeme eklenerek n-tipi ve p-tipi bölgelerin oluşturulmasıyla elde edilir [39]. Fotovoltaik hücreye ait model Şekil 3-1’de gösterilmiştir. Fotovoltaik hücreden elektrik üretiminin sağlanabilmesi için ise n-tipi ve p-tipi birleşim bölgesinde “fotovoltaik etki”nin sağlanması gerekmektedir [46].

##### 3.2.1. Fotovoltaik Etki

Fotovoltaik etki ilk olarak Fransız fizikçi Alexandre Edmond Becquerel tarafından 1839 yılında keşfedilmiştir. Becquerel güneş ışığı ve kimyasal tepkimeler üzerine çalışmıştır. Asidik bir çözelti ve gümüş klorür ile kaplanmış platin elektrotlarla ışığın tepkimelere etkisini ölçmeye çalıştığı deneyi esnasında ışığın elektrotlar arasında bir potansiyel fark oluşturduğunu fark etmiş ve bu olayı “fotovoltaik etki” olarak adlandırmıştır [47].

Güneş ışınımı enerji taşıyan fotonların birleşiminden oluşmaktadır. Fotonlar, FV hücre üzerindeki p-n birleşim bölgesine düştüğünde bu bölgedeki serbest elektronlara enerji vererek elektronları harekete geçirmektedir. P-n birleşim bölgesindeki elektrik alanı, bu bölgede enerji kazanan elektronları ve delikleri birbirinden ayırmaktadır. Böylelikle FV hücre uçlarında bir

potansiyel fark meydana gelmektedir. FV hücrenin uçları harici bir devreye bağlandığında ise elektrik akımı oluşmaktadır.



Şekil 3-1: FV hücre modeli

### 3.2.2. FV Hücre Türleri ve Eşdeğer Devre Modeli

FV hücre teknolojisi, hücrede kullanılan temel malzemeye ve ticari kullanım tercih şekline bağlı olarak üç türe ayrılabilir. Kristal silikon hücreler “Birinci Nesil”, ince film hücreler “İkinci Nesil” ve nanoteknolojiye dayalı hücreler “Üçüncü Nesil” olarak adlandırılır [48]. FV hücrelerin veriminin artırılması ve maliyetinin düşürülmesi konusunda ise farklı maddeler kullanılarak ve yeni yöntemler tasarlanarak çalışmalar devam etmektedir.

#### 3.2.2.1. Birinci Nesil FV Hücreler

Kristal silikon FV hücreleri ticari olarak en yaygın kullanılan birinci nesil hücre türüdür. Kristal silikon hücreler kullanılan silikon tipine göre monokristal silikon hücre ve polikristal silikon hücre olarak iki gruba ayrılabilir:

- **Monokristal silikon hücre:** Güneş pillerinde en çok tercih edilen ancak üretimlerinde en fazla enerji tüketen hücre türüdür [49]. Bu hücre türünde yapı, kristal kafesinin sürekli olduğu, kenarlara kadar kırılmadığı ve herhangi bir tane sınırı içermediği silikondan oluşur [50]. Monokristal silikon hücrenin üretilmesinde Czochralski yöntemi kullanılmaktadır

[51]. Bu yöntem yarı iletkenlerin tek kristallerini elde etmek için kullanılan maliyeti oldukça yüksek kristal büyütme işlemidir. Bu hücrelerin verimi %24 ile %30 arasında değişmektedir [39].

- **Polikristal silikon hücre:** Bu hücre türünü oluşturmak için bir dizi farklı kristal bir araya getirilmektedir. Üretim süreçleri monokristal hücrelere göre daha ekonomiktir [51]. Bu hücrelerin verimliliği %12 ile %17 arasında değişmektedir [39].

### 3.2.2.2. İkinci Nesil FV Hücreler

İkinci nesil FV hücreler, ince film FV hücre teknolojisini içerir ve amorf silikon (a-Si) ince film, kadmiyum tellür (CdTe) ince film ve bakır-indiyum-galyum-diseleneid (CIGS) olarak üç gruba ayrılabilir:

- **Amorf silikon ince film hücre (a-Si):** Amorf silikon (a-Si), silikonun kristal olmayan bir formudur. Bu hücre yapısı, ince film hücre teknolojisinin piyasada bulunan en gelişmiş türüdür. Hesap makinelerinde yaygın olarak kullanılırlar. Amorf silikon hücreler, cam veya metal gibi bir alt tabaka malzemesi üzerine ince bir silikon malzeme tabakasının buharla biriktirilmesiyle oluşturulur. Bu hücrelerin verimliliği Staebler-Wronski etkisi nedeniyle %7 ile sınırlıdır [50].
- **Kadmiyum tellür ince film hücre (CdTe):** Kadmiyum tellür (CdTe) ince film hücreleri, güneş ışınımını dönüştürmek ve dolayısıyla elektrik üretmek için yarı iletken olarak kadmiyum tellürden oluşan ince film katmanları içerir. Bu ince film hücreler, dünya pazarında kristal silikon bazlı fotovoltaik hücrelerden sonra en yaygın kullanılan fotovoltaik hücre teknolojisidir [52]. Bu hücrelerin verimliliği genellikle %9,5 ile %11 arasındadır [51].
- **Bakır-indiyum-galyum-seleneid ince film hücre (CIGS):** Bakır-indiyum-galyum-seleneid ince film hücreler üç ana ince film teknolojilerinden biridir. Güneş ışınımından elektrik elde etmek için hücre yapısında bulunan ön ve arka elektrotlarla birlikte cam ve plastik destek üzerine ince bir bakır-indiyum-galyum-seleneid tabakasının biriktirilmesi ile üretilirler [50]. Bu hücrelerin verimlilikleri %10 ile %12 arasındadır [51].

### 3.2.2.3. Üçüncü Nesil FV Hücreler

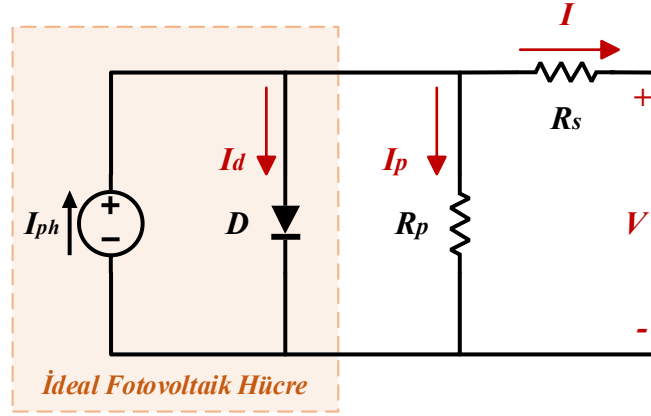
Birinci nesil FV hücrelerin üretim maliyetinin yüksek olması ve ikinci nesil FV hücrelerde kullanılan malzemelerin sınırlı olması nedeniyle yeni FV hücre teknolojileri araştırılmaya başlanmıştır. Üçüncü nesil FV hücreler olarak adlandırılan bu teknolojiler dört gruba ayrılabilir:

- **Nano kristal hücre:** Bu hücreler, nano kristal kaplamalı bir alt tabakaya dayanan FV hücre türüdür [50].
- **Polimer bazlı hücre:** Yarı iletken organik molekül olan konjuge polimerlerin iyot ile katkılanması sonrasında elektron aktarabildiğinin keşfedilmesi ile FV hücre üretiminde polimerlerin kullanımı mümkün olmuştur. Bir polimer bazlı hücre, tekrarlanan yapısal birimlere sahip büyük moleküller olan polimerlerden üretilmiş bir tür esnek FV hücre türüdür. Silikon bazlı hücrelerle karşılaştırıldığında daha hafif ve ucuz olmasına karşın verimlilikleri %10 ile sınırlıdır [50].
- **Boyaya duyarlı hücre:** Işık enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren üçüncü nesil FV hücre teknolojilerinde olan boyaya duyarlı FV hücresi ilk olarak Michel Gratzel tarafından tanıtılmıştır [50]. Bu hücre türünde farklı elektrotlar arasında boya molekülleri kullanılır. Titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ) filmlerinin ışık emici boyalarla ışığa duyarlı hale getirilmesi %10'dan yüksek verimliliğe sahip boyaya duyarlı hücrelerin geliştirilmesine yol açmıştır [51].
- **Yoğunlaştırılmış hücre:** Güneş enerjisinin yoğunlaştırılıp elektrik enerjisi üretilmesi amacıyla ışınımın hücre üzerinde odaklanmasını sağlayan ayna veya merceklerin kullanıldığı hücre türüdür [53]. Günümüzde çok eklemlili yoğunlaştırılmış hücrelerin verimliliği %47'ye ulaşmıştır [54].

### 3.2.2.4. Eşdeğer Devre Modeli

FV hücrelerin çalışma prensiplerinin anlaşılabilmesi ve FV sistemler kurulmadan önce analizlerin yapılabilmesi için hücrenin elektriksel eşdeğer devre modelinin oluşturulması gerekmektedir.

FV sisteme ait modelleme yapılırken hücre, modül ya da dizi kullanılır. Bir FV hücrenin elektriksel eşdeğer devresi tek diyotlu, çift diyotlu ve üç diyotlu olmak üzere üç şekilde oluşturulabilir [55].



Şekil 3-2: FV hücre tek diyotlu eşdeğer devre modeli

Tek diyotlu eşdeğer devre modeli Şekil 3-2’de gösterilmiştir. Bu eşdeğer devre modeli diğer modeller ile karşılaştırıldığında basit bir yapıda ve FV hücrenin gerçek karakteristiğine benzer olması sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır [45].

Eşdeğer devrede  $I_{ph}$  hücrenin güneş ışıınımlı ile ürettiği akımı,  $I_d$  diyot üzerinden geçen akımı,  $I_p$  paralel direnç üzerinden geçen akımı ve  $I$  toplam akımı aynı zamanda FV hücrenin çıkış akımını ifade etmektedir.  $V_d$  diyot üzerine düşen gerilimi,  $V_{ph}$  hücrenin çıkış gerilimini ifade etmektedir. Seri bağlı direnç  $R_s$ , FV hücrelerin arasındaki bağlantılardan, güneş ışıınımlının düştüğü ve elektrik üretiminin gerçekleştiği p-n eklem derinliğinden ve kullanılan malzemenin saf olmaması gibi nedenlerden kaynaklanan direnç değeridir. Paralel bağlı direnç  $R_p$  ise p-n eklem bağlantısında oluşan sızıntı akımından kaynaklanan direnç değeridir ve bu değer doğrudan hücre yapısında kullanılan malzemenin kalitesi ile ilgilidir [56]. FV hücrenin güneş ışıınımlı ile ürettiği akım  $I_{ph}$ , güneş ışıınımlı miktarı ile doğru orantılıdır ve Eşitlik 3.1 ile hesaplanır [39].

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i \cdot (T_c - T_r)] \cdot \frac{G}{G_r} \quad (3.1)$$

Burada,

$I_{ph}$ : FV hücrenin ürettiği fotovoltayik akımı

$I_{sc}$ : Standart test koşullarında (25 °C ve 1000 W/m<sup>2</sup>) kısa devre akımı

$K_i$ : Kısa devre akımının sıcaklık katsayısı (0,0017 A/°C)

$T_c$ : FV hücre sıcaklığı (Kelvin)

$T_r$ : Referans sıcaklık değeri (25 °C için 298,15 °K)

$G$ : Güneş ışıınımı miktarı (W/m<sup>2</sup>)

$G_r$ : Güneş ışıınımı miktarının referans değeri (1000 W/m<sup>2</sup>)

olarak ifade edilir.

Diyot üzerinden geçen akım  $I_d$ , diyot üzerinde düşen gerilim  $V_d$  ve ters sızıntı akımı  $I_o$ 'a bağlıdır [39].

$$I_d = I_o \left( e^{q \cdot \frac{(V + I \cdot R_s)}{A \cdot k \cdot T_c}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

Burada,

$q$ : Elektrik yükü (1,602x10<sup>-19</sup> C)

$k$ : Boltzman sabiti (1,3806505x10<sup>-23</sup> J/K)

$A$ : Diyotun kalite faktörü

olarak ifade edilir. Paralel direnç  $R_p$  üzerinden akan akım ise Eşitlik 3.3 ile hesaplanabilir.

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (3.3)$$

FV hücrenin çıkış akımı  $I$  ve çıkış gerilimi  $V$  ise Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.5 ile hesaplanabilir.

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (3.4)$$

$$V = V_d - I \cdot R_s \quad (3.5)$$

Diyot akımı ve paralel direnç üzerinden akan akım ifadeleri Eşitlik 3.4'te yerine yazılıp eşitlik yeniden düzenlenirse Eşitlik 3.6 elde edilir.

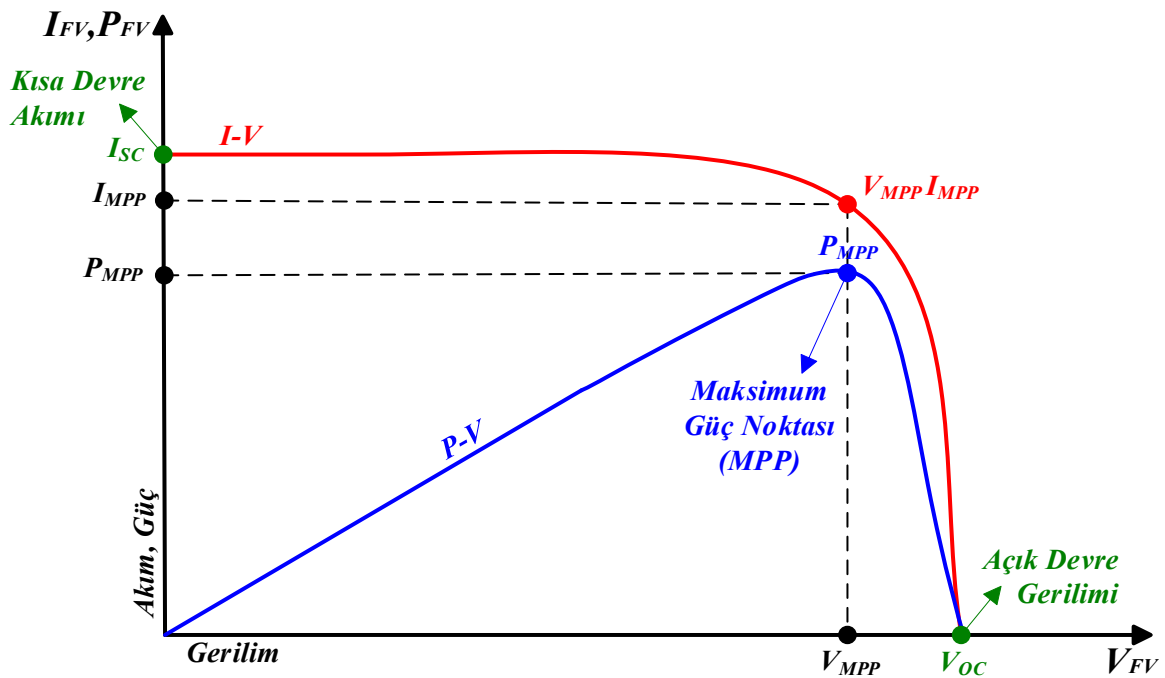
$$I = I_{ph} - I_o \left( e^{q \cdot \frac{(V + I \cdot R_s)}{A \cdot k \cdot T_c}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (3-6)$$

### 3.3. Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT)

FV hücreler bir araya getirilerek FV panel elde edilir. FV panellerin kendi aralarında seri ya da paralel bağlanması ile istenilen güç değerinde FV sistemler oluşturulabilir fakat panele gelen güneş ışınımı miktarı, FV hücre sıcaklığı ve sisteme bağlı yüke göre panelden alınan çıkış gücü değeri değişmektedir. Bu nedenle FV panellerden maksimum verimin elde edilebilmesi için MPPT algoritmaları geliştirilmiştir [57].

#### 3.3.1. MPPT Performansı

Bir FV hücre güneş ışınım seviyesi ve sıcaklık gibi faktörlerden etkilenen bir cihaz olduğundan hücreye ait karakteristik eğrilerin (akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V)) Şekil 3-3'te gösterildiği gibi doğrusal olmadığı görülmektedir. Buna rağmen bu eğriler üzerinde maksimum gücün elde edildiği bir nokta  $P_{MPP}$  bulunmaktadır [55]. Dış etkilere (güneş ışınımı seviyesi, sıcaklık veya sisteme bağlanan yük) bağlı olarak sistemin çalışma noktası değişebilmektedir [58]. MPPT algoritmalarından beklenen performans, değişen koşullarda bile çalışma noktasının sürekli olarak maksimum güç noktasında olmasını sağlamaktır [59].



Şekil 3-3: FV hücre akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristik eğrileri

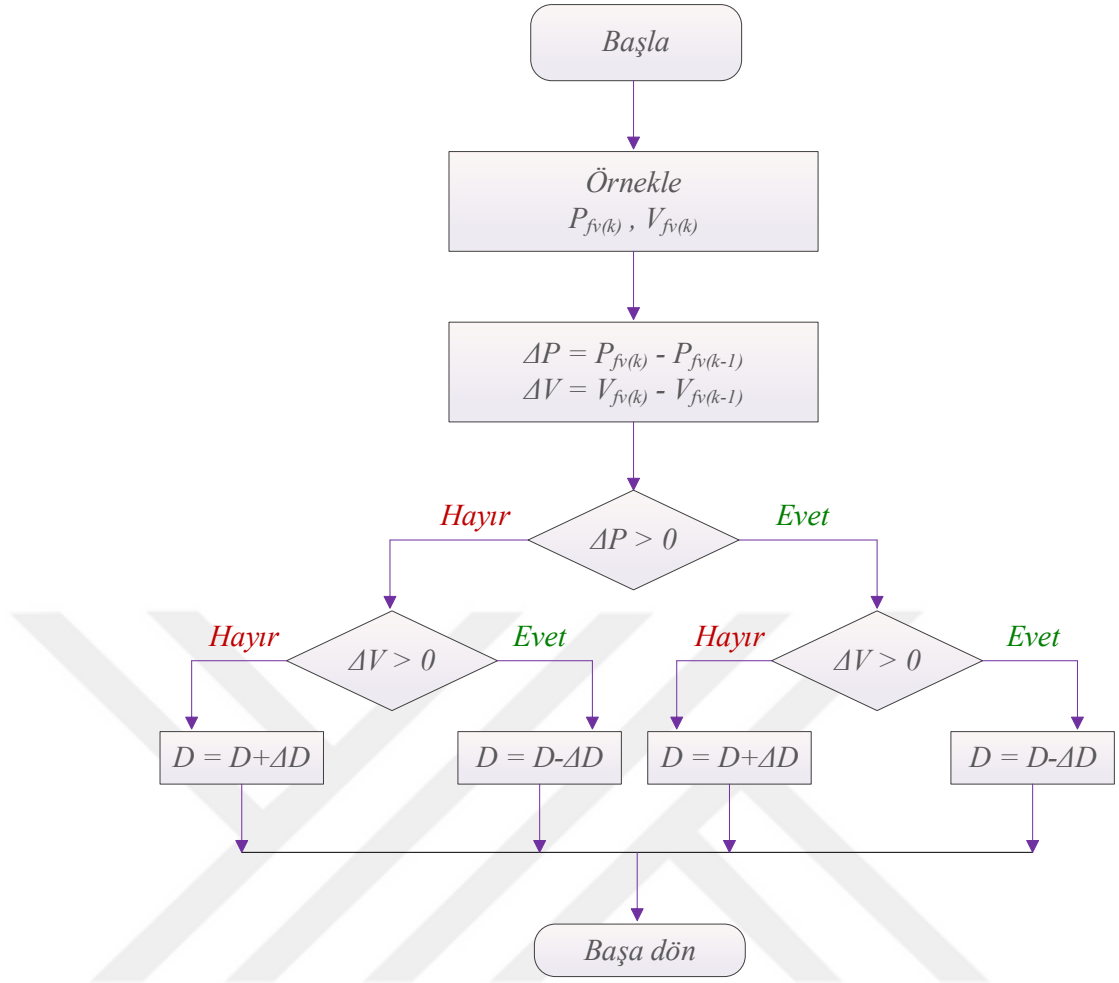
### 3.3.2. MPPT Algoritmaları

Bir FV panelin maksimum güç noktasını tespit etmek, çalışma noktasının sürekli olarak maksimum güç noktasında olmasını sağlamak ve takip etmek amacıyla literatürde birçok algoritma bulunmaktadır. MPPT algoritmaları genel olarak “Doğrudan” ve “Dolaylı” MPPT algoritmaları şeklinde sınıflandırılabilir. Dolaylı MPPT algoritmalarında amaç, FV panelin açık devre gerilimi ( $V_{OC}$ ), kısa devre akımı ( $I_{SC}$ ), güneş ışınımı veya panel sıcaklığının belirli aralıklarla ölçülerek maksimum güç noktasının tahmin edilmesidir. Sabit Gerilim (CV) ve Sabit Akım (CC) algoritmaları dolaylı MPPT algoritmalarındandır. Doğrudan MPPT algoritmalarında ise çalışma noktası FV panelden anlık olarak alınan akım, gerilim ve güç değerlerinin doğrudan kullanılması ile tespit edilmektedir. Değişir & Gözle (P&O) ve Artan İletkenlik (IC) MPPT algoritmaları literatürde en yaygın kullanılan doğrudan MPPT algoritmalarıdır. Bu algoritmalara ek olarak literatürde Bulanık Mantık (FL) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) gibi akıllı MPPT algoritmaları ile yapılan çalışmalar da mevcuttur [60]. Bu tez çalışmasında yaygın olarak kullanılan P&O ve IC MPPT algoritmaları kullanılmıştır.

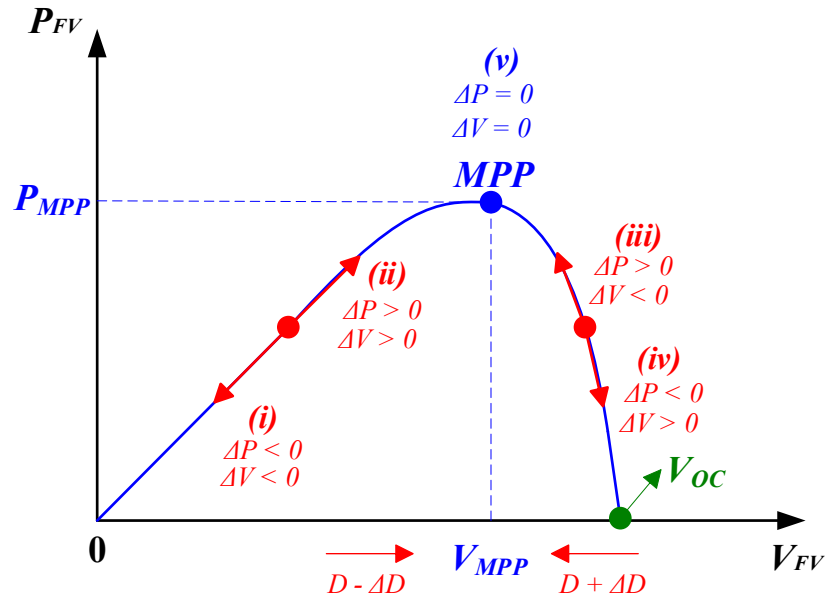
#### 3.3.2.1. Değişir & Gözle (P&O) Algoritması

P&O algoritması basit ve herhangi bir mikrodenetleyici üzerinde uygulaması kolay olan bir MPPT algoritmasıdır [57]. Algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 3-4’te gösterilmiştir. Algoritmanın temeli FV hücrenin çıkış gerilimi ve çıkış akımının izlenmesine dayanmaktadır. Bu algorithmada amaç FV hücrenin güç ve gerilim (P-V) karakteristik eğrisine bakılarak çalışma noktasının maksimum güç noktasında tutulmasıdır. P-V karakteristik eğrisi Şekil 3-5’te verilmiştir.

FV hücrenin güç ve gerilim değişimi aynı işarete sahipse çalışma noktası maksimum güç noktasının solunda, farklı işarete sahipse maksimum güç noktasının sağında olacaktır. Güç ve gerilimde değişim yoksa maksimum güç noktasında çalışma sağlanıyor demektir. Çalışma noktası maksimum güç noktasının solunda ise görev döngüsü değeri (duty cycle) ( $D$ ) azaltılarak, sağında ise görev döngüsü değeri artırılarak maksimum güç noktasında çalışma sağlanır. Çalışma noktasına ait değişimler Tablo 3-1’de verilmiştir [61].



Şekil 3-4: P&O algoritmasına ait akış diyagramı



Şekil 3-5: P&O algoritmasına ait güç-gerilim (P-V) eğrisi

**Tablo 3-1:** P&O algoritması için güç-gerilim (P-V) eğrisine göre çalışma koşulları

| Koşullar                                   | Durum                        |
|--------------------------------------------|------------------------------|
| (i) $\Delta P < 0$ ve $\Delta V < 0$ ise   | Görev döngüsü değerini azalt |
| (ii) $\Delta P > 0$ ve $\Delta V > 0$ ise  | Görev döngüsü değerini azalt |
| (iii) $\Delta P > 0$ ve $\Delta V < 0$ ise | Görev döngüsü değerini artır |
| (iv) $\Delta P < 0$ ve $\Delta V > 0$ ise  | Görev döngüsü değerini artır |
| (v) $\Delta P = 0$ ve $\Delta V = 0$ ise   | Maksimum güç noktasında      |

### 3.3.2.2. Artan İletkenlik (IC) Algoritması

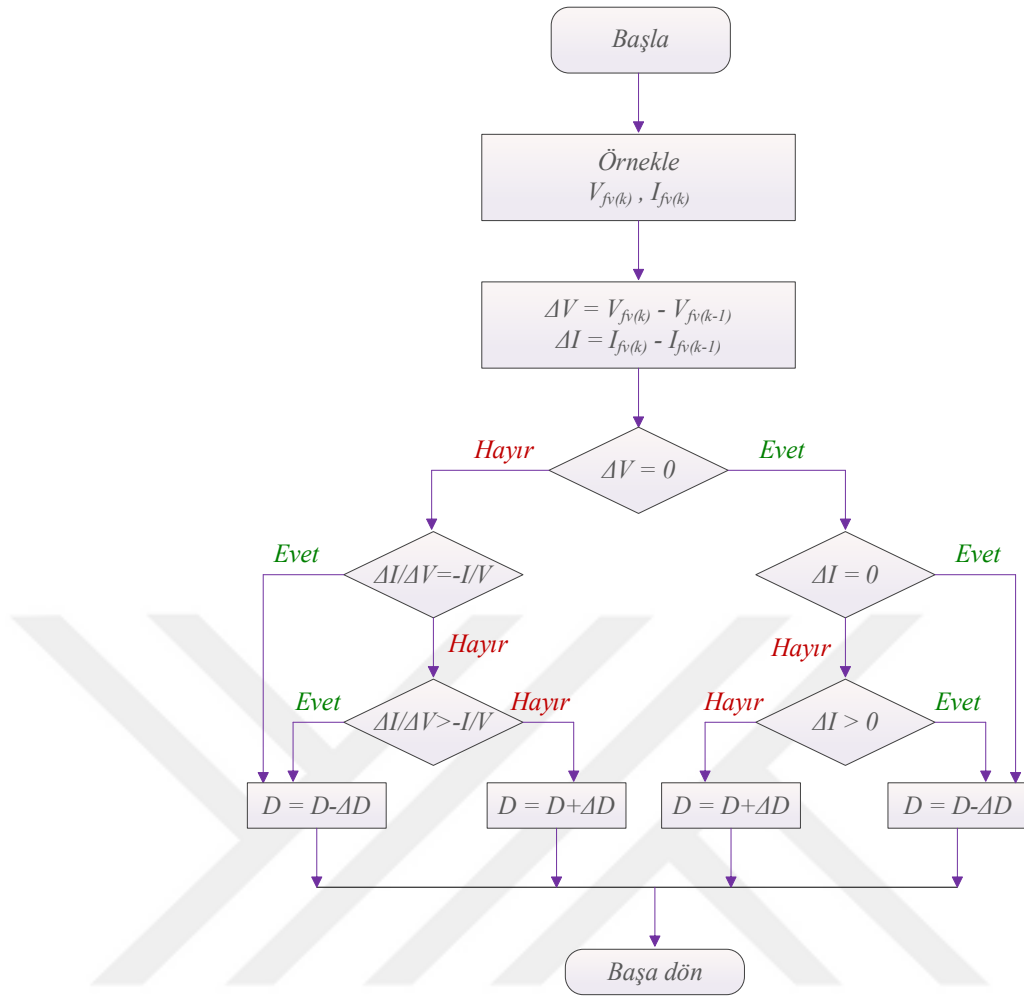
IC algoritması P&O algoritması gibi yaygın olarak kullanılan bir MPPT algoritmasıdır. Algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 3-6’da verilmiştir. P&O algoritmasından farklı olarak bu algortmada FV hücrenin akım-gerilim (I-V) eğrisine bakılmaktadır [57]. I-V karakteristik eğrisi Şekil 3-7’de gösterilmiştir. Algoritmanın temeli FV hücre çıkış akımındaki değişimin çıkış gerilimindeki değişime oranı olan FV hücrenin iletkenliğinin gözlemlenmesine dayanmaktadır [62]. Eşitlik 3-7’de verildiği üzere FV hücrenin çıkış gücünün çıkış gerilimine göre türevi alınarak çözüm yapıldığında Eşitlik 3-8 ve Eşitlik 3-9’a bakarak çalışma noktası belirlenmektedir.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (3-7)$$

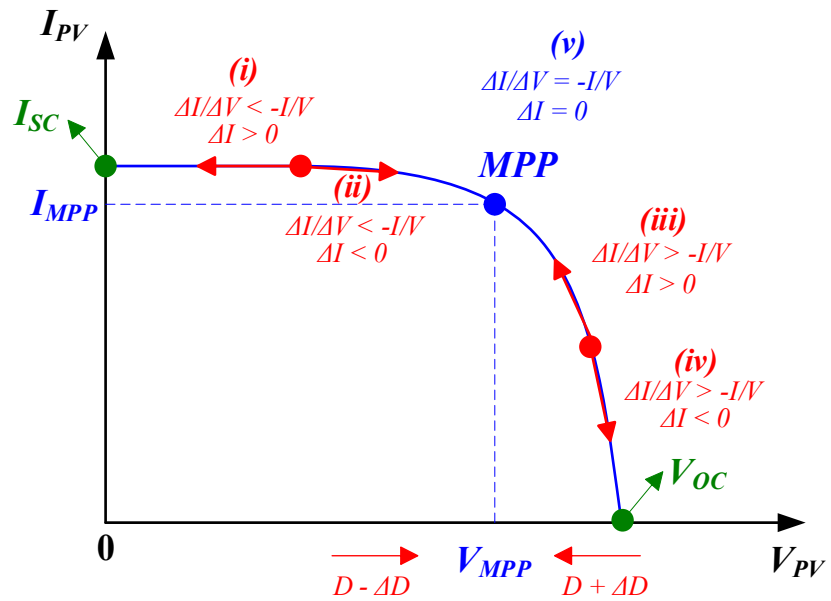
$$I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \quad (3-8)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad (3-9)$$

Artan iletkenlik değeri FV hücrenin iletkenlik değişimine eşitse çalışma noktası maksimum güç noktasındadır. Artan iletkenlik değeri FV hücrenin iletkenlik değişiminden büyükse çalışma noktası maksimum güç noktasının solunda, küçükse maksimum güç noktasının sağında olacaktır. Çalışma noktası maksimum güç noktasının solunda ise görev döngüsü değeri azaltılarak, sağında ise görev döngüsü değeri artırılarak maksimum güç noktasında çalışma sağlanır [63]. Çalışma noktasına ait değişimler Tablo 3-2’de verilmiştir.



Şekil 3-6: IC algoritmasına ait akış diyagramı



Şekil 3-7: IC algoritmasına ait akım-gerilim (I-V) eğrisi

**Tablo 3-2:** IC algoritması için akım-gerilim (I-V) eğrisine göre çalışma koşulları

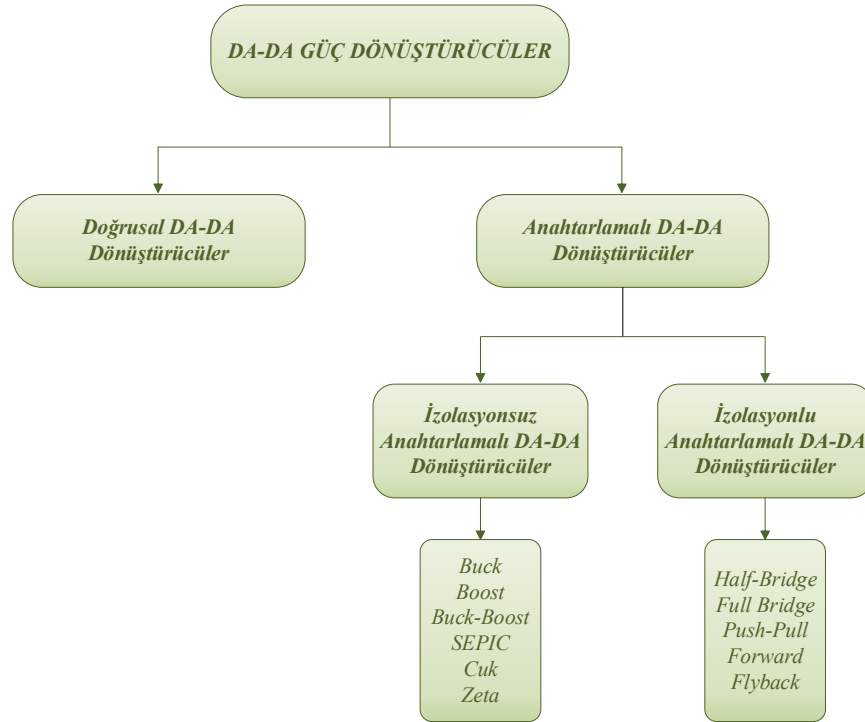
| Koşullar                                               | Durum                        |
|--------------------------------------------------------|------------------------------|
| (i) $\Delta I/\Delta V < -I/V$ ve $\Delta I > 0$ ise   | Görev döngüsü değerini azalt |
| (ii) $\Delta I/\Delta V < -I/V$ ve $\Delta I < 0$ ise  | Görev döngüsü değerini azalt |
| (iii) $\Delta I/\Delta V > -I/V$ ve $\Delta I > 0$ ise | Görev döngüsü değerini artır |
| (iv) $\Delta I/\Delta V > -I/V$ ve $\Delta I < 0$ ise  | Görev döngüsü değerini artır |
| (v) $\Delta I/\Delta V = -I/V$ ve $\Delta I = 0$ ise   | Maksimum güç noktasında      |

## 4. ANAHTARLAMALI DA-DA GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİ

### 4.1. DA-DA Güç Dönüştürücülerin Sınıflandırılması

DA-DA güç dönüştürücüler, bir DA giriş gerilimi değerini, başka bir DA çıkış değerine dönüştürmek için kullanılır. DA-DA güç dönüştürücüler; doğrusal DA-DA güç dönüştürücüler (gerilim regülatörleri) ve anahtarlama DA-DA güç dönüştürücüler olarak iki sınıfa ayrılabilir. DA-DA dönüştürücülere ait sınıflandırma Şekil 4-1’de gösterilmiştir.

Doğrusal DA-DA dönüştürücüler DA giriş gerilimini daha düşük bir DA çıkış gerilimine dönüştürmek ve regülasyon yapmak için kullanılır. Anahtarlama DA-DA dönüştürücüler ise DA giriş gerilimini daha yüksek ya da daha düşük bir DA çıkış gerilimine dönüştürmek için kullanılır. Bu dönüştürücüler yapısında bulunan anahtarlama elemanı ve bobinin devre topolojisine göre farklı şekillerde bağlanmasıyla oluşturulan güç elektroniği devreleridir. Bu dönüştürücülerin temeli, yarı iletken güç anahtarının konumuna göre bobinin enerjiyi depo edip aktarması prensibine dayanır [9]. Anahtarlama DA-DA güç dönüştürücüler izolasyonlu ve izolasyonsuz olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. İzolasyonlu dönüştürücülerde devrenin girişi ile çıkışı arasında elektriksel bağlantıyı ayıran yüksek frekans transformatörü bulunmaktadır [64].



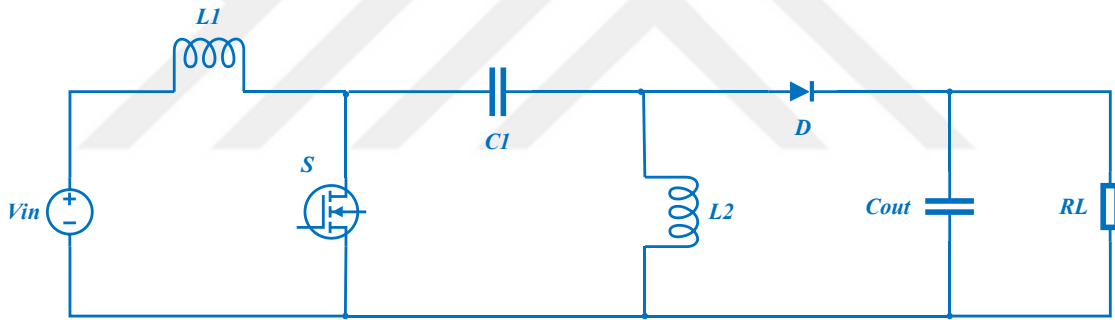
Şekil 4-1: DA-DA güç dönüştürücülerin sınıflandırılması

#### 4.2. SEPIC DA-DA Dönüştürücü

SEPIC DA-DA güç dönüştürücü, Şekil 4-2’de gösterildiği gibi bir anahtar ( $S$ ), bir diyot ( $D$ ), iki bobin ( $L_1, L_2$ ) ve iki kondansatörden ( $C_1, C_{out}$ ) oluşur. Giriş gerilimi değeri görev döngüsü değerine bağlı olarak çıkışta istenilen çıkış gerilimi değerine düşürülebilir ya da yükseltilebilir. Böylelikle SEPIC güç dönüştürücüleri azaltan (buck) ya da yükselten (boost) modlarında çalıştırılabilir. Bu nedenle SEPIC dönüştürücüler batarya şarj sistemlerinde kullanılmaktadır [65].

SEPIC dönüştürücülerin diğer dönüştürücülere kıyasla sürekli giriş akımı sağlaması, giriş akımındaki dalgalanmanın filtreye gerek kalmadan düşürülmesi, aşırı akım sınırlama kabiliyeti, yarı iletken anahtarı sürme kolaylığı ve çıkış gerilimi değerinin giriş gerilimi değeri ile aynı polaritede olması gibi avantajları vardır [66].

SEPIC dönüştürücülerin kullanım alanları batarya şarj sistemleri, FV sistemlerde maksimum güç noktasının takibi, LED sürücüler ve güç faktörü düzeltme uygulamalarıdır [67].



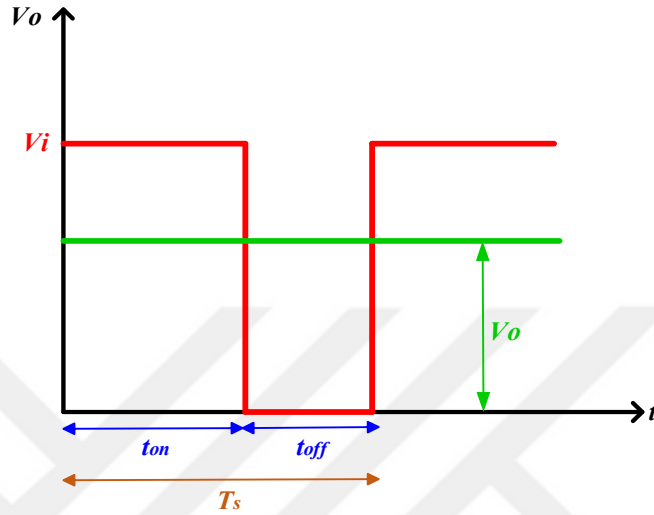
Şekil 4-2: SEPIC DA-DA güç dönüştürücü

#### 4.3. Anahtarlama Kayıpları

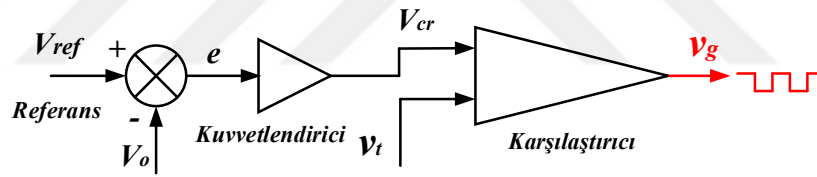
Anahtarlama DA-DA dönüştürücülerde Şekil 4-3’te gösterildiği gibi çıkış gerilimi değeri güç anahtarı  $S$ ’nin bir periyotluk sürede iletimde olduğu  $t_{on}$  ve kesimde olduğu  $t_{off}$  sürelerinin kontrol edilmesiyle belirlenir. Giriş geriliminin iletim ve kesim sürelerine göre ortalama değeri alındığında bu değer çıkış gerilimi değerini vermektedir. Sabit çalışma frekansı değerinde anahtarın iletimde kalma süresi değiştirilerek dönüştürücü çıkışında istenilen çıkış gerilimi değeri elde edilebilir. Darbe genişlik modülasyonu (PWM) olarak adlandırılan bu yöntem ile anahtarın görev döngüsü değeri değiştirilerek gerçekleştirilir [64].

Görev döngüsü değeri, anahtarın iletimde olduğu sürenin anahtarlama periyoduna oranı olarak Eş. 3-10'da gösterildiği gibi tanımlanır.

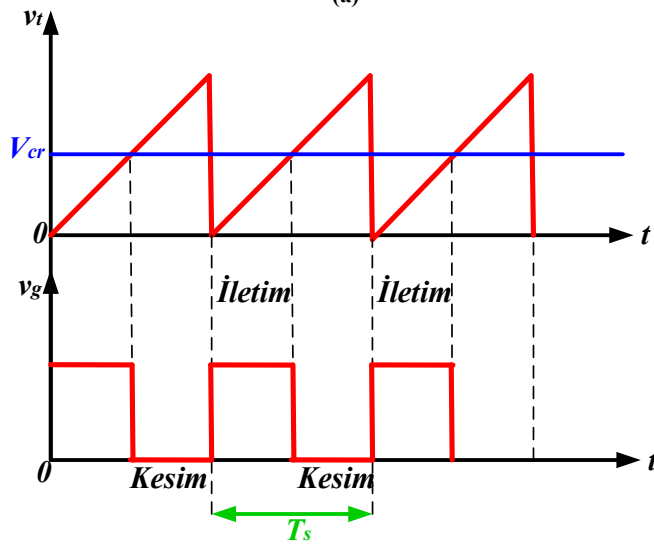
$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (3-10)$$



Şekil 4-3: Anahtarlama DC-DC dönüştürücü çıkış dalga şekli



(a)



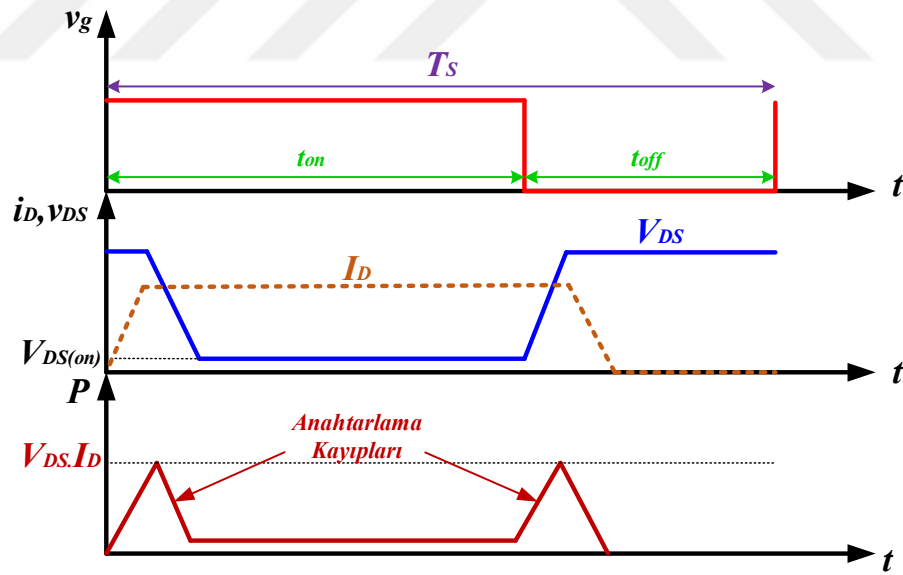
(b)

Şekil 4-4: Referans sinyali ve taşıyıcı sinyalin karşılaştırılması (a) Blok diyagram (b) Dalga şekilleri

Bir DA-DA dönüştürücüde anahtarlama elemanının PWM ile anahtarlانmasında anahtarın iletim ve kesim sürelerini kontrol eden anahtarlama sinyalinin ( $v_g$ ) üretilmesi Şekil 4-4'te gösterilmiştir.

Bu sinyalin üretilmesi için ilk olarak ( $T_s$ ) periyot değerine sahip testere dişi dalga formunda bir taşıyıcı sinyal ( $v_t$ ) ve referans gerilimi ( $V_{ref}$ ) ile dönüştürücü çıkış gerilimi ( $V_o$ ) arasındaki farkın ( $e$ ) kuvvetlendirilmesiyle elde edilen karşılaştırma sinyalinin ( $V_{cr}$ ) üretilmesi gerekmektedir. Üretilen bu iki sinyal bir karşılaştırıcı tarafından karşılaştırılır ve anahtarlama sinyali elde edilmiş olur. Anahtarlama sinyalinin frekansı taşıyıcı sinyalin frekansı ile aynı olacaktır [64], [68].

Darbe genişlik modülasyonu (PWM) ile kontrol edilen dönüştürücülerde, anahtarlama elemanının çıkış gerilimi veya çıkış akımı değerleri istenilen dalga şeklini oluşturmak için sürülebilir fakat anahtarlama elemanı yüksek  $di/dt$  yük akımında iletme ve kesime götürüldüğünde anahtarlama elemanı üzerinde yüksek gerilim stresi, anahtarlama kayıpları ve ayrıca dönüştürücü dalga şekillerindeki yüksek  $di/dt$  ve  $dv/dt$  etkilerinden dolayı elektromanyetik girişim (EMI) meydana gelir.



Şekil 4-5: Anahtarlama elemanının akım, gerilim ve güç değişimleri

Bir anahtarlama elemanının iletme ve kesime geçiş esnasındaki güç kaybı toplam güç kaybının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Anahtarlama elemanı üzerindeki güç kaybı anahtarlama frekansı arttıkça doğrusal olarak artacaktır. Dolayısıyla PWM ile anahtarlama da frekansın sınırlı olduğu söylenebilir. Anahtarlama elemanı üzerinde gözlemlenen bu durumlar

PWM ile anahtarlama yönteminin dezavantajları olarak düşünülebilir. Bir anahtarlama periyodu ( $T_s$ ) içerisinde anahtarlama elemanına ait çalışma durumu Şekil 4-5'te gösterilmiştir. Burada  $i_D$  anahtar akımını,  $v_{DS}$  anahtar gerilimi ifade etmektedir [68], [69].

Anahtarlama elemanı üzerindeki anahtarlama kaybının bulunabilmesi için genellikle Eş. (3-11) kullanılır.

$$P_{SW} = \frac{1}{2} I_D V_{DS} (t_{on} + t_{off}) f_s + \frac{1}{2} C_{oss} V_{DS}^2 f_s \quad (3-11)$$

Burada,  $I_D$  anahtar üzerinden geçen akımı,  $V_{DS}$  anahtar uçlarındaki gerilimi,  $t_{on}$  ve  $t_{off}$  anahtarın iletim ve kesim sürelerini,  $f_s$  anahtarlama frekansını ve  $C_{oss}$  MOSFET için çıkış kapasitansını ifade eder [70].

#### 4.4. Yumuşak Anahtarlama Tekniği

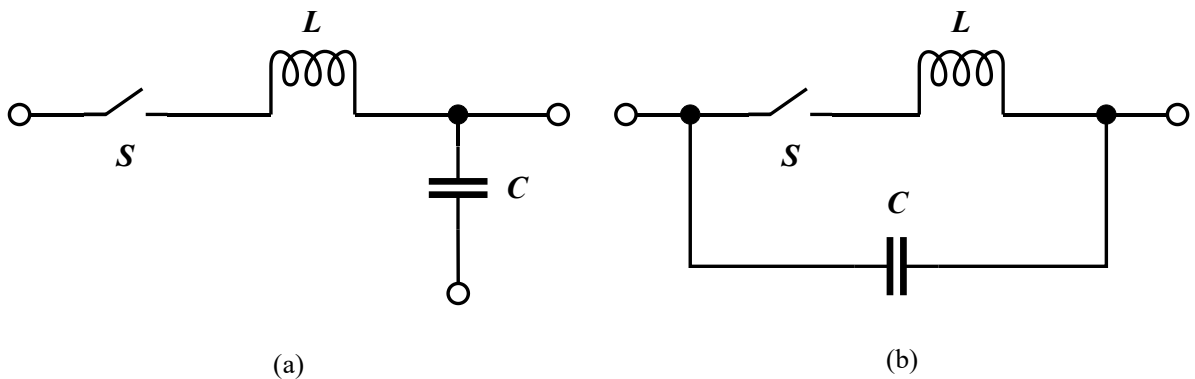
Anahtarlama DA-DA dönüştürücü devrelerinde bobin ve kondansatör gibi devre elemanları enerji depolama/aktarım gibi durumlarda ve dalgalanma filtrelemede önemli rol oynar. Dönüştürücüye ait çalışma frekansı değeri artırıldığında devrede bulunan bobin ve kondansatör için daha küçük değere sahip elemanlar tercih edilebilir. Böylelikle tasarlanan dönüştürücü hacim ve maliyet açısından avantajlı hale gelmektedir. Fakat tüm anahtarlama dönüştürücülerde olduğu gibi yüksek frekanslarda anahtarlama yarı iletken anahtar üzerinde yüksek anahtarlama gerilimleri ve anahtarlama kayıpları oluşturur. Bu zorluğun çözülebilmesi için “rezonans anahtarı” kavramı önerilmiştir. Basit olarak PWM dönüştürücülerde kullanılan anahtarlama elemanı rezonans anahtar ile değiştirilerek “kısmi rezonans dönüştürücü” topolojileri oluşturulmuştur. Böylelikle anahtarlama DA-DA dönüştürücülerde kullanılan sert anahtarlama tekniği yerine yumuşak anahtarlama tekniği kullanılarak anahtarlama kayıpları önlenmiş olur [71].

Bu dönüştürücüler PWM dönüştürücülere benzer şekilde endüktif veya kapasitif enerji depolama ve aktarma prensibini kullanırlar ve devre topolojileri de PWM dönüştürücülere benzerdir. Bununla birlikte anahtarlama elemanının yanında yumuşak anahtarlama sağlayacak bir LC rezonans tank devresi bulunur ve yalnızca anahtarlama elemanının akım ve gerilim dalga biçimlerini şekillendirmek yerine enerjiyi girişten çıkışa depolamak ve aktarmak için de kullanılır.

Anahtarlama elemanının dalga biçimlerini şekillendiren LC rezonans tank devresi tarafından üretilen sinüzoidal akım veya gerilim dalga biçimi anahtarın anahtarlama kayıpları olmadan iletme ve kesime gitmesi için sıfır akım (ZC) veya sıfır gerilim (ZV) koşulunu oluşturur [72]. Bir rezonans anahtar, yarı iletken anahtar ( $S$ ), bobin ( $L$ ) ve kondansatörden ( $C$ ) oluşan bir alt devredir. Şekil 4-6’da gösterildiği gibi L-tip ve M-tip olmak üzere iki farklı rezonans anahtar tipi vardır ve iki türde de bobin anahtar akımının  $di/dt$  değerini sınırlamak için yarı iletken anahtar ile seri olarak bağlanır ve yardımcı bir enerji depolama/aktarma elemanı olarak kondansatör bu alt devreye eklenir [68].

Rezonans anahtarın gerçek uygulaması akımın yalnızca ileri yönde akabildiği “yarım dalga modu” veya akımın çift yönlü akabildiği “tam dalga modu” ile olabilir. Bu dönüştürücüler sayesinde anahtarlama elemanının akım ve gerilim dalga biçimi sinüzoidal forma getirilmeye zorlanarak sıfır akımda anahtarlama (ZCS) veya sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS) gerçekleştirilir [64], [68], [72].

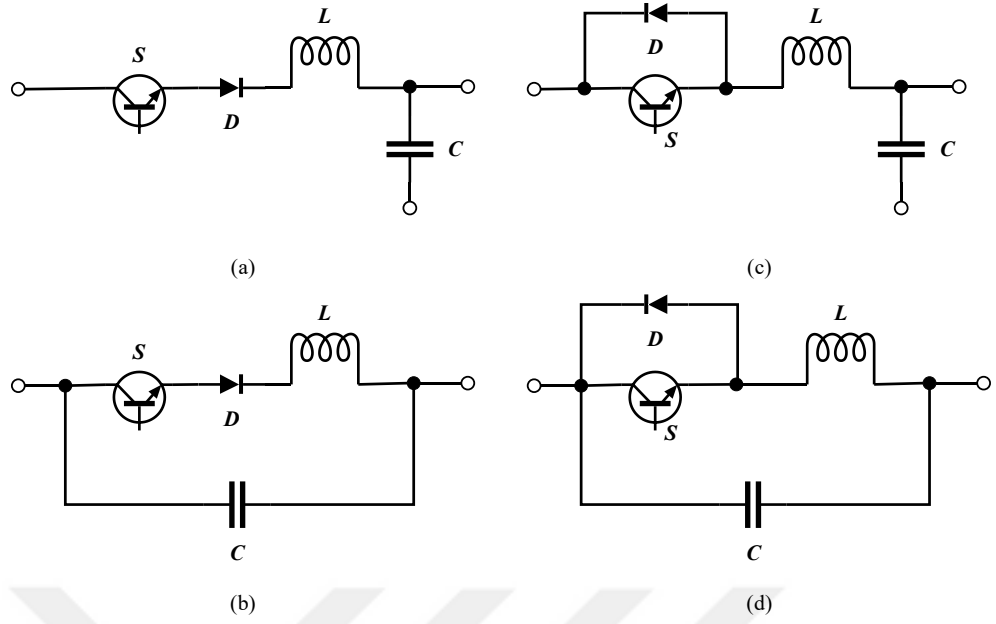
Bununla birlikte ZVS'nin güç dönüştürücülerinde, anahtara ait zamanlama devreleri gibi ek bileşenlere ihtiyaç duyması nedeniyle devre tasarımının karmaşıklığının artması, hızlı anahtarlama geçişleri nedeniyle artan EMI ve tüm yük koşulları için uygun çalışma sağlamama gibi ortak dezavantajları vardır [73].



Şekil 4-6: Rezonans anahtar tipleri (a) L-tip, (b) M-tip

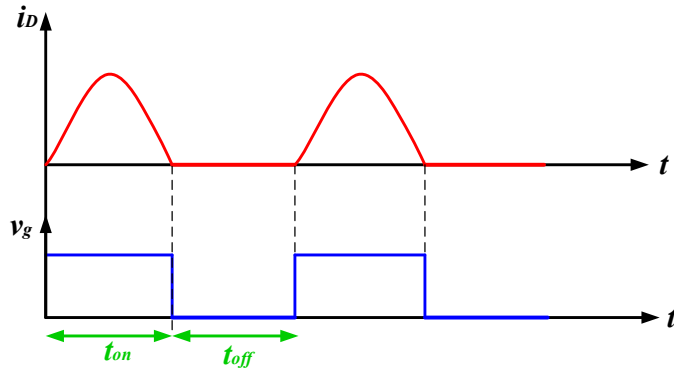
#### 4.4.1. Sıfır Akımda Anahtarlama Kısımlı Rezonans Dönüştürücü (ZCS)

Sıfır akımda anahtarlama kısımlı rezonans dönüştürücü topolojisi, bir anahtarlama elemanı ( $S$ ), bir bobin ( $L$ ) ve bir ( $C$ ) kondansatörden oluşan rezonans devresine sahip bir devredir. Bu devrede, sıfır akımda anahtarlama sağlanabilmesi için rezonans bobini anahtarlama elemanına seri olarak bağlanır. Sıfır akım (ZC) rezonans anahtar çeşitleri Şekil 4-7’de gösterilmektedir.



**Şekil 4-7:** ZC rezonans anahtar tipleri (a) L-tip yarım dalga, (b) M-tip yarım dalga, (c) L-tip tam dalga, (d) M-tip tam dalga

Sıfır akım (ZC) bir rezonans anahtar, anahtarlama elemanı kesime giderken sıfır akım koşulunu sağlamak amacıyla anahtar akımı dalga şeklini anahtar iletim süresi boyunca şekillendirir. Dolayısıyla Şekil 4-8’de görüldüğü üzere sıfır akım anahtarlama işleminin anahtarın iletim süresi boyunca gerçekleştiği görülmektedir [64],[68].



**Şekil 4-8:** Sıfır akım anahtarlama (ZCS)

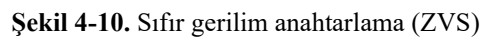
#### 4.4.2. Sıfır Gerilimde Anahtarlama Kısımlı Rezonans Dönüştürücü (ZVS)

Sıfır gerilimde anahtarlama kısımlı rezonans dönüştürücü topolojisi, bir anahtarlama elemanı (S), bir bobin (L) ve bir (C) kondansatörden oluşan rezonans devresine sahip bir devredir.

Figure 4-9 shows four circuit diagrams of ZV resonance switches. Each diagram consists of a switch  $S$  in series with a capacitor  $C$ , and a diode  $D$  in parallel with the capacitor  $C$ . The input and output terminals are shown on the left and right respectively.

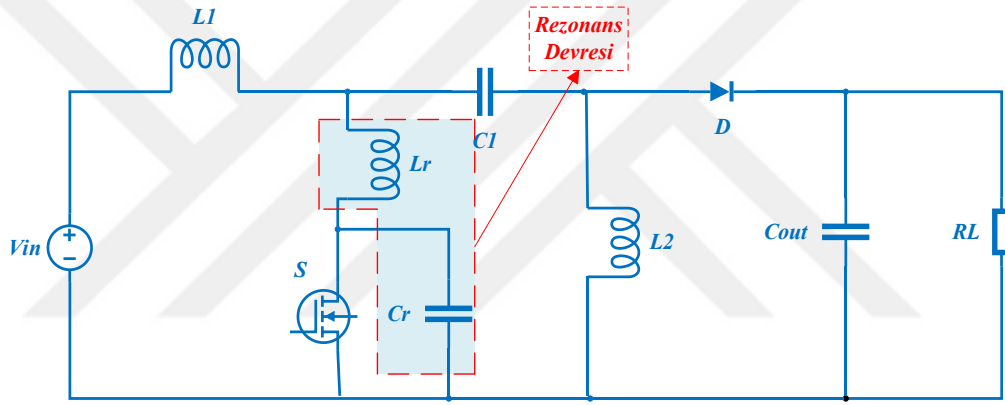
- (a) L-tip yarım dalga: The diode  $D$  is in series with the switch  $S$  and capacitor  $C$ .
- (b) M-tip yarım dalga: The diode  $D$  is in parallel with the capacitor  $C$ .
- (c) L-tip tam dalga: The diode  $D$  is in series with the switch  $S$  and capacitor  $C$ .
- (d) M-tip tam dalga: The diode  $D$  is in parallel with the capacitor  $C$ .

Sıfır gerilim (ZV) bir rezonans anahtar, anahtarlama elemanı iletime giderken sıfır gerilim koşulunu sağlamak amacıyla anahtar gerilimi dalga şeklini anahtar kesim süresi boyunca şekillendirir. Dolayısıyla Şekil 4-10’da görüldüğü üzere sıfır gerilim anahtarlama işleminin anahtarın kesim süresi boyunca gerçekleştiği görülmektedir [64], [68].



#### 4.5. ZVS SEPIC Dönüştürücü

Anahtarlama DA-DA güç dönüştürücülerde anahtar sürülürken kullanılan sert anahtarlama tekniği, anahtarlama kayıpları, anahtar üzerinde elektromanyetik girişim (EMI) ve akım-gerilim stresi gibi olumsuz etkilere neden olmaktadır. Geleneksel SEPIC DA-DA dönüştürücü devresine rezonans bobini ( $L_r$ ) ve rezonans kondansatörü ( $C_r$ ) eklenerek bu etkiler azaltılabilir. Bu yöntem yumuşak anahtarlama tekniği olarak bilinir ve Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS) ve Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS) olarak ikiye ayrılır. Bu tez çalışmasında da kullanılan ZVS tekniği, anahtarın drain-source gerilim değeri sıfır olduğunda anahtarın iletim ve kesime geçmesi prensibine dayanmaktadır [74]. ZVS SEPIC DA-DA dönüştürücüye ait devre topolojisi Şekil 4-11’de gösterilmiştir.



Şekil 4-11: ZVS SEPIC DA-DA güç dönüştürücü

##### 4.5.1. ZVS SEPIC Dönüştürücü Analizi

ZVS SEPIC dönüştürücüye ait matematiksel modelin belirlenebilmesi için dönüştürücüye ait devre elemanlarının ideal olduğun kabulü yapılarak rezonans frekansı ( $\omega_0$ ) ve karakteristik empedans ( $Z_0$ ) Eşitlik 4-1 ve Eşitlik 4-2 kullanılarak belirlenir [75].

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (4-1)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} = \omega_0 L_r = \frac{1}{\omega_0 C_r} \quad (4-2)$$

Burada  $L_r$ , rezonans bobini ve  $C_r$ , rezonans kondansatörünü ifade eder. Kalite faktörü ( $Q$ ) Eşitlik 4-3 ile hesaplanabilir.

$$Q = \frac{R_L}{Z_0} = \frac{FR_L}{\omega_s L_r} = \frac{\omega_s C_r R_L}{F_n} \quad (4-3)$$

Burada,  $F_n = f_s/f_0$  normalleştirilmiş anahtarlama frekansını,  $\omega_s = 2\pi f_s$  anahtarlama frekansının açısal hızını,  $R_L$ , yük direnci değerini göstermektedir. Rezonans bobini başlangıç akımı  $i_{Lr}(0)$  ve anahtar kapalıyken anahtar başlangıç akımı  $i_s(0)$  Eşitlik 4-4 yardımı ile bulunabilir.

$$\lambda = \frac{i_{Lr}(0)}{I_{in}+I_{out}} = \frac{i_s(0)}{I_{in}+I_{out}} \quad (4-4)$$

Burada,  $I_{in}$  giriş akımını ve  $I_{out}$  çıkış akımını ifade eder.

#### 4.5.1.1. Çalışma Aralıkları

ZVS SEPIC DA-DA dönüştürücünün dört farklı çalışma modu vardır. Çalışma modlarına ait dalga formları Şekil 4-12’de gösterilmiştir. Mod-1 ( $t - t_1$ ), Mod-2 ( $t_1 - t_2$ ), Mod-3 ( $t_2 - t_3$ ) ve Mod-4 ( $t_4 - T$ ) zaman aralığında çalışmayı ifade etmektedir.

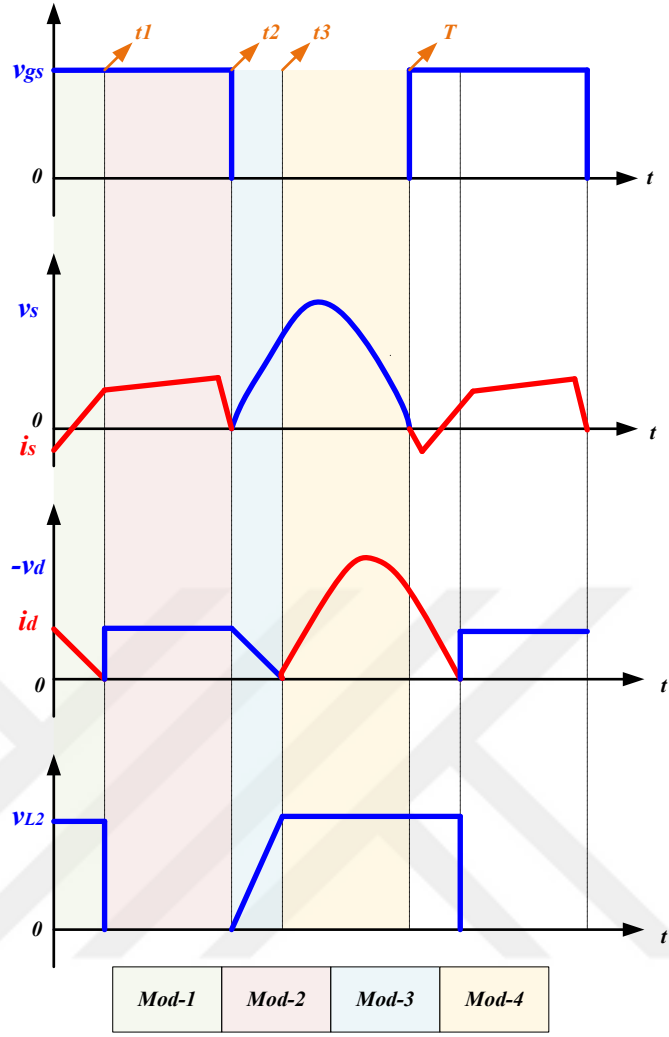
**Mod-1 ( $0 < t < t_1$ ) :** Mod-1’de yarı iletken anahtar ve diyot iletimdedir.  $M = V_{out}/V_{in}$  gerilim kazancı değeri olduğundan bu mod için anahtardan akan akım ( $i_s$ ) Eşitlik 4-5 ile verilir.

$$i_s = \frac{(I_{in}+I_{out})Q\omega_s t}{F_n M} + i_s(0) \quad (4-5)$$

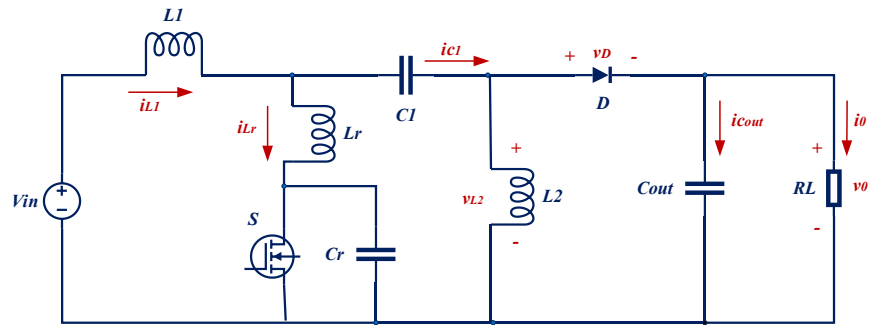
Benzer şekilde diyot akımı ( $i_d$ ) Eşitlik 4-6 ile ifade edilir.

$$i_d = I_{in} + I_{out} - \frac{(I_{in}+I_{out})Q\omega_s t}{F_n M} - i_s(0) \quad (4-6)$$

Mod-1 " $t_1$ " anında ve diyot akımı sıfır değerine ulaştığında sona erer. ZVS SEPIC dönüştürücünün Mod-1’de çalışması Şekil 4-13’te gösterilmiştir.



Şekil 4-12: ZVS SEPIC dönüştürücü dalga formları



Şekil 4-13: ZVS SEPIC dönüştürücünün Mod-1'de çalışması

**Mod-2 ( $t_1 < t < t_2$ ) :** Bu modda, yarı iletken anahtar iletimdeyken, diyot kesime gider. Anahtardan akan akım ( $i_s$ ) Eşitlik 4-7 ile gösterilir.

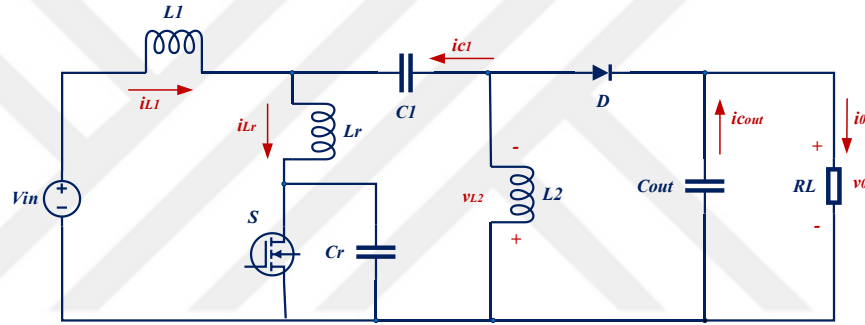
$$i_s = I_{in} + I_{out} \quad (4-7)$$

Diyot gerilimi ( $v_d$ ) ise Eşitlik 4-8 ve Eşitlik 4-9 ile verilir.

$$v_d = -V_{in} - V_{out} \quad (4-8)$$

$$-v_d = V_{in} + V_{out} \quad (4-9)$$

Burada  $V_{in}$  giriş gerilimini,  $V_{out}$  çıkış gerilimini ifade eder. Bu mod " $t_2$ " anında yani anahtar kesime gittiğinde sona erer. ZVS SEPIC dönüştürücünün Mod-2'de çalışması Şekil 4-14'te gösterilmiştir.



Şekil 4-14: ZVS SEPIC dönüştürücünün Mod-2'de çalışması

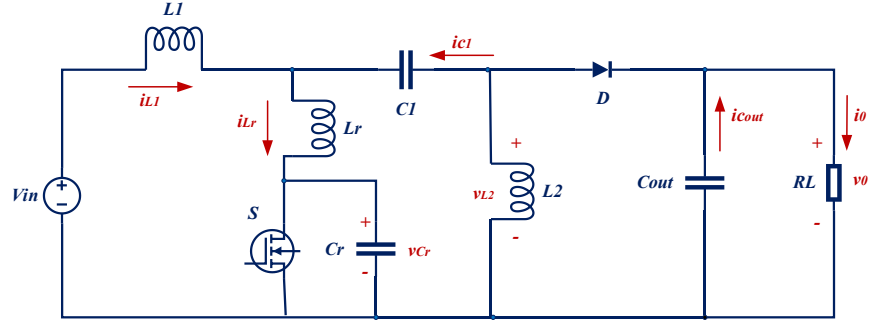
**Mod-3** ( $t_2 < t < t_3$ ) : Mod-3'te hem yarı iletken anahtar hem de diyot kesimdedir. Bu mod için anahtar gerilimi ( $v_s$ ) Eşitlik 4-10 ile gösterilir.

$$v_s = \frac{M(V_{in} + V_{out})}{F_n Q} (\omega_s t - 2\pi D) \quad (4-10)$$

Burada,  $D$  görev döngüsü değerini ifade eder. Bu mod için diyot gerilimi ( $v_d$ ) ise Eşitlik 4-11 ile verilir.

$$v_d = (V_{in} + V_{out}) \left( \frac{M}{F_n Q} (\omega_s t - 2\pi D) - 1 \right) \quad (4-11)$$

Mod-3, " $t_3$ " anında yani diyot gerilimi ( $v_d$ ) sıfır değerine ulaştığında sona erer. ZVS SEPIC dönüştürücünün Mod-3'te çalışması Şekil 4-15'te gösterilmiştir.



Şekil 4-15: ZVS SEPIC dönüştürücünün Mod-3'te çalışması

**Mod-4 ( $t_3 < t < T$ ) :** Bu modda, yarı iletken anahtar iletimdeyken diyot kesimdedir ve anahtar gerilimi ( $v_s$ ) bu mod için Eşitlik 4-12 ile ifade edilir.

$$v_s = (V_{in} + V_{out}) \left( 1 + \frac{M}{Q} \sin \left( \frac{\omega_s t - \omega_s t_3}{F_n} \right) \right) \quad (4-12)$$

Bu mod için diyot akımı ( $i_d$ ) ise Eşitlik 4-13 ile verilir.

$$i_d = (I_{in} + I_{out}) \left( 1 - \cos \left( \frac{\omega_s t - \omega_s t_3}{F_n} \right) \right) \quad (4-13)$$

Rezonans bobininden akan akım ( $i_{Lr}$ ) ise Eşitlik 4-14 ile hesaplanır.

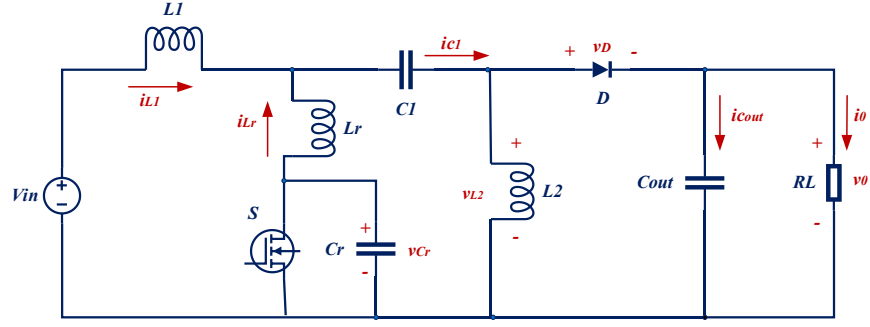
$$i_{Lr} = (I_{in} + I_{out}) \cos \left( \frac{\omega_s t - \omega_s t_3}{F_n} \right) \quad (4-14)$$

Bu mod, anahtarın kesime gittiği " $T$ " anında sona erer. ZVS SEPIC dönüştürücünün Mod-4'te çalışması Şekil 4-16'da gösterilmiştir.

ZVS SEPIC dönüştürücüde sıfır gerilimde anahtarlama yönteminin sağlanabilmesi için gerek iki şart vardır. Bu şartlar Eşitlik 4-15 ve Eşitlik 4-16'da verilmiştir.

$$v_s(T) = v_s(0) = 0 \quad (4-15)$$

$$i_{Lr}(T) = i_{Lr}(0) = \lambda(I_{in} + I_{out}) = 0 \quad (4-16)$$



Şekil 4-16: ZVS SEPIC dönüştürücünün Mod-4'te çalışması

Eşitlik 4-14 şu şekilde düzenlenebilir.

$$\frac{Q}{M} = -\sin\left(\frac{2\pi(1-D)}{F_n} - \frac{Q}{M}\right) \quad (4-17)$$

Anahtar başlangıç akımı değeri Eşitlik 4-3, Eşitlik 4-4 ve Eşitlik 4-14 yardımıyla belirlenebilir.

$$\lambda = \cos\left(\frac{2\pi(1-D)}{F_n} - \frac{Q}{M}\right) \quad (4-18)$$

Görev döngüsü ( $D$ ) değeri Eşitlik 4-19 kullanılarak ifade edilir.

$$D = 1 - \frac{1}{2\pi} F_n \left( -\cos^{-1} \left( \sqrt{1 - \left( \frac{Q}{M} \right)^2} \right) + \frac{Q}{M} + 2\pi n \right) \quad (4-19)$$

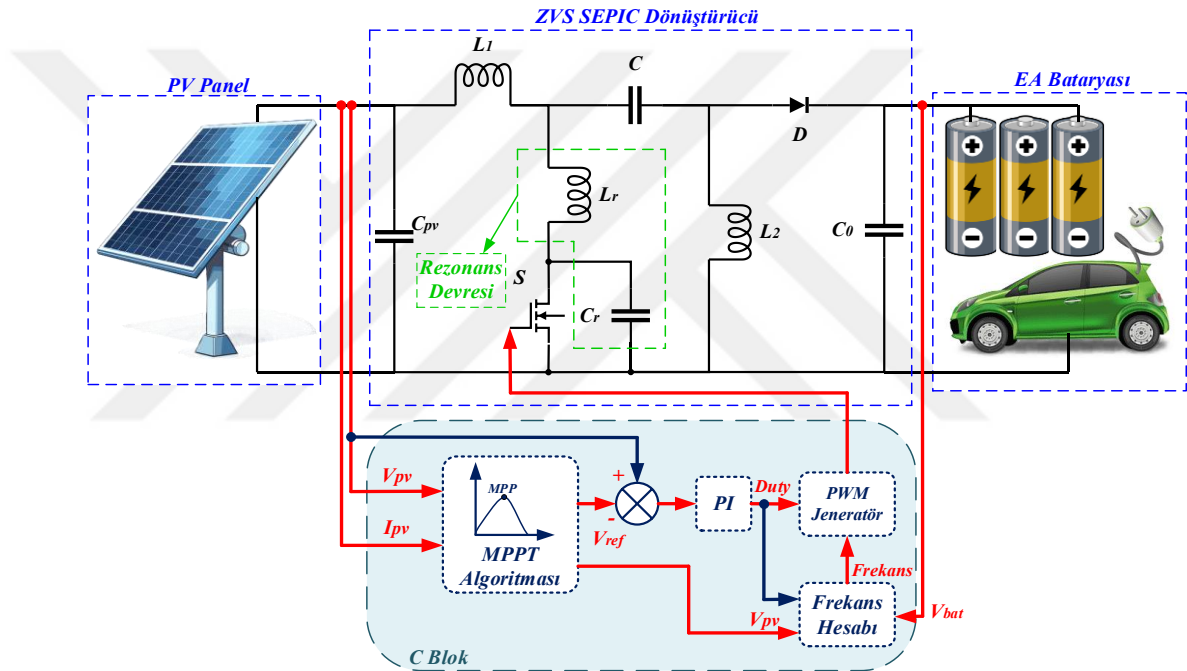
Burada,  $n$  düzeltme faktörüdür. Anahtarlama periyodunun sabit iletim ve değişken kesim süresi değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Sıfır gerilimde anahtarlama yöntemi için Eşitlik 4-20 ya da Eşitlik 4-21 sağlanmalıdır [55].

$$-1 \leq \lambda \leq 1 \quad (4-20)$$

$$0 \leq Q = \frac{R_L}{Z_0} \leq M \quad (4-21)$$

## 5. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Benzetimi ve uygulaması yapılan batarya şarj sisteminde amaç, FV panelden elde edilen maksimum gücün yüksek verimle bataryaya aktarılıp şarj işleminin gerçekleştirilmesidir. Bu kapsamda önerilen sistemde maksimum gücün sürekli korunması için maksimum güç noktasını takip eden (MPPT) algoritmalar kullanılmıştır. Elde edilen maksimum gücün EA bataryasına yüksek verimle aktarılabilmesi için ise yumuşak anahtarlama tekniği ile anahtarlama kayıplarının önlendiği ZVS SEPIC dönüştürücü tasarlanmıştır. Batarya şarj sistemi için önerilen sisteme ait modelin blok diyagramı Şekil 5-1’de gösterilmektedir.



**Şekil 5-1: Elektrikli araç batarya şarj sistemi için önerilen sisteme ait blok diyagram**

EA batarya şarj sistemi için önerilen modelde, FV panele ait akım ( $I_{pv}$ ) ve gerilim ( $V_{pv}$ ) değerleri MPPT algoritmalarında giriş değeri olarak kullanılmak üzere alınır ve bir referans gerilimi ( $V_{ref}$ ) değeri oluşturulur. Referans gerilimi değeri FV panel gerilim değeri ile karşılaştırılarak bir hata sinyali üretilir. Üretilen hata sinyali PI denetleyiciden geçirilerek yarı iletken anahtarın iletim-kesim sürelerinin kontrolünü sağlayacak olan görev döngüsü değeri oluşturulur. Oluşturulan değer Eş. 4-19 kullanılarak hesaplanan frekans değeri ile modüle edilerek gerekli PWM sinyali üretilmiş olur. PWM sinyali ZVS SEPIC dönüştürücüde kullanılan yarı iletken anahtarı sürer ve devre çıkışında yük olarak bulunan 48 V EA bataryası şarj edilir.

Bataryadan alınan ( $V_{bat}$ ) değeri ile bataryanın şarj durumu (SoC) kontrol edilerek MPPT'nin devam etmesi ya da durdurulması sağlanmaktadır.

### 5.1. MPPT Tabanlı Batarya Şarj Sistemi PSIM Benzetimi

Tasarlanan sistemin benzetimi PSIM programı ile yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında sert anahtarlama tekniğinin uygulandığı geleneksel SEPIC dönüştürücü ve yumuşak anahtarlama tekniğinin uygulandığı ZVS SEPIC dönüştürücü tasarlanmıştır. FV simülatörden maksimum gücün elde edilebilmesi için kullanılan MPPT algoritmalarından P&O ve IC algoritmaları seçilmiştir. Her iki anahtarlama yöntemi için de iki algoritma ayrı ayrı uygulanmış ve sonuçlar alınmıştır. Sistemin benzetiminde kullanılan geleneksel SEPIC dönüştürücü ve ZVS SEPIC dönüştürücüye ait PSIM tasarımları sırasıyla Şekil 5-3 ve Şekil 5-10'da gösterilmiştir.

Geleneksel SEPIC dönüştürücü için anahtarlama frekansı 10 kHz ve ZVS SEPIC dönüştürücü için anahtarlama frekansı görev döngüsü değerine bağlı olarak değişmektedir. Her iki dönüştürücüye ait parametreler Tablo 5-1'de gösterilmiştir. Her iki dönüştürücü tasarımı için Tablo 5-2'de özellikleri verilen FV panel ve PI denetleyici parametreleri kullanılmıştır.

**Tablo 5-1:** Geleneksel SEPIC ve ZVS SEPIC dönüştürücüye ait parametreler

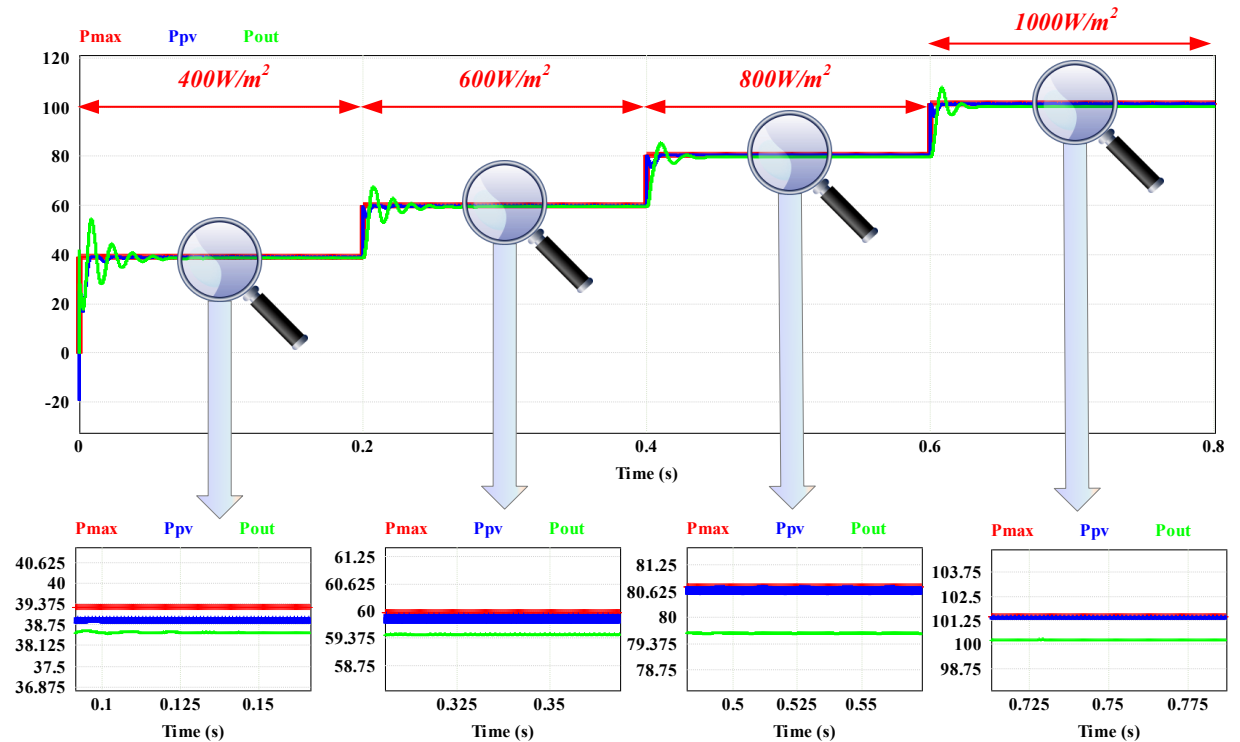
|                | Geleneksel SEPIC              | ZVS SEPIC                     |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| $C_{pv}, C_0$  | 470 $\mu$ F                   | 470 $\mu$ F                   |
| $L_1, L_2$     | 80 $\mu$ H                    | 80 $\mu$ H                    |
| $L_r$          | -                             | 20 $\mu$ H                    |
| $C_r$          | -                             | 50 nF                         |
| $C$            | 2 $\mu$ F                     | 2 $\mu$ F                     |
| <b>Batarya</b> | 48 V (2,2 $\Omega$ iç direnç) | 48 V (2,2 $\Omega$ iç direnç) |

**Tablo 5-2:** PI denetleyici ve fotovoltaik panele ait parametreler

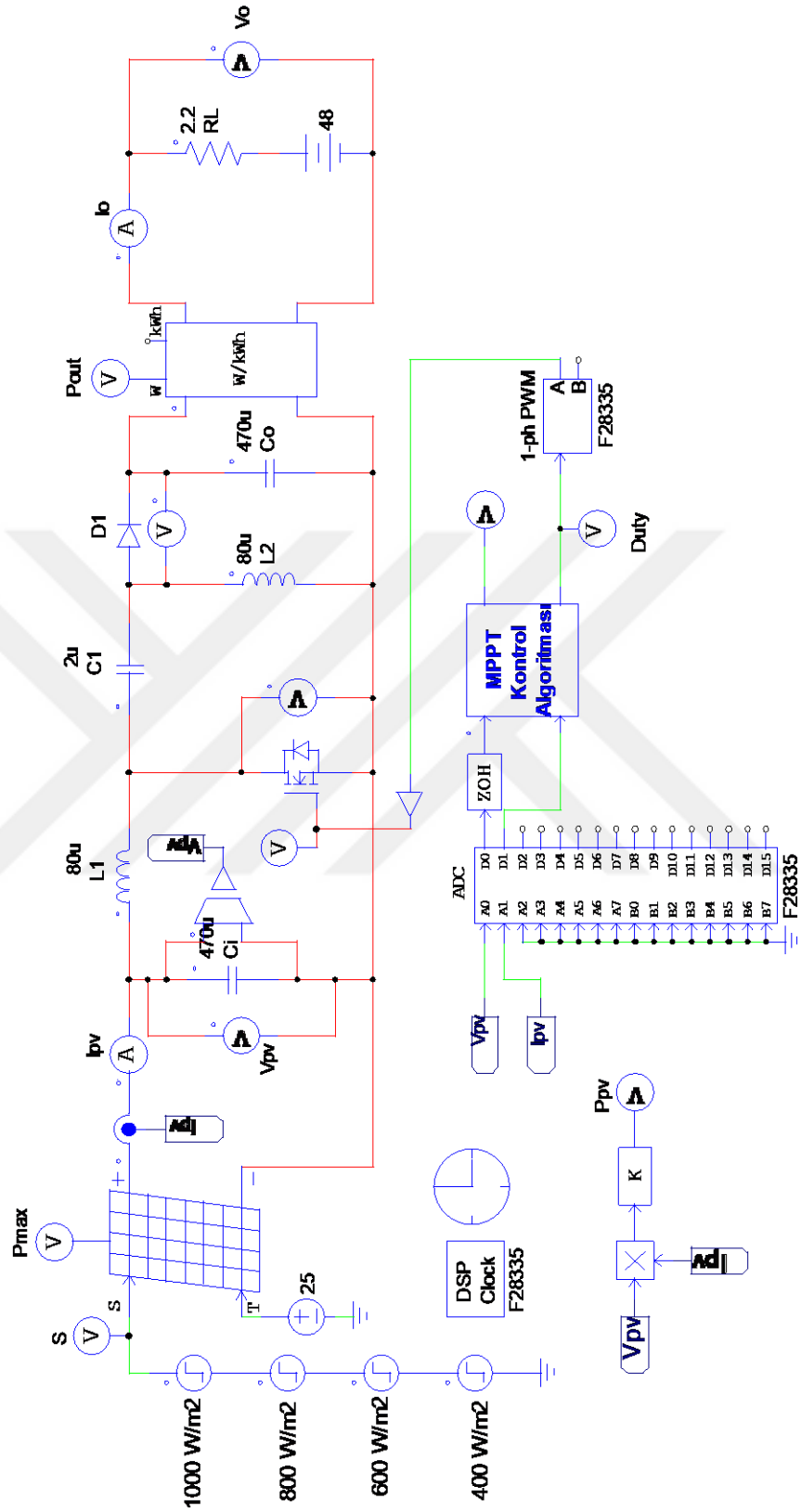
| PI Denetleyici |        | Fotovoltaik Panel   |           |        |
|----------------|--------|---------------------|-----------|--------|
| $K_p$          | 0,3    | Maksimum Güç        | $P_{mpp}$ | 100 W  |
| $K_i$          | 8      | MPP panel gerilimi  | $V_{mpp}$ | 34 V   |
| $dt$           | 0,0001 | MPP panel akımı     | $I_{mpp}$ | 2,95 A |
| $V_{ref}$      | 34 V   | Açık devre gerilimi | $V_{oc}$  | 41,8 V |
|                |        | Kısa devre akımı    | $I_{sc}$  | 3,18 A |

### 5.1.1. P&O MPPT ve Sert Anahtarlama Benzetim Sonuçları

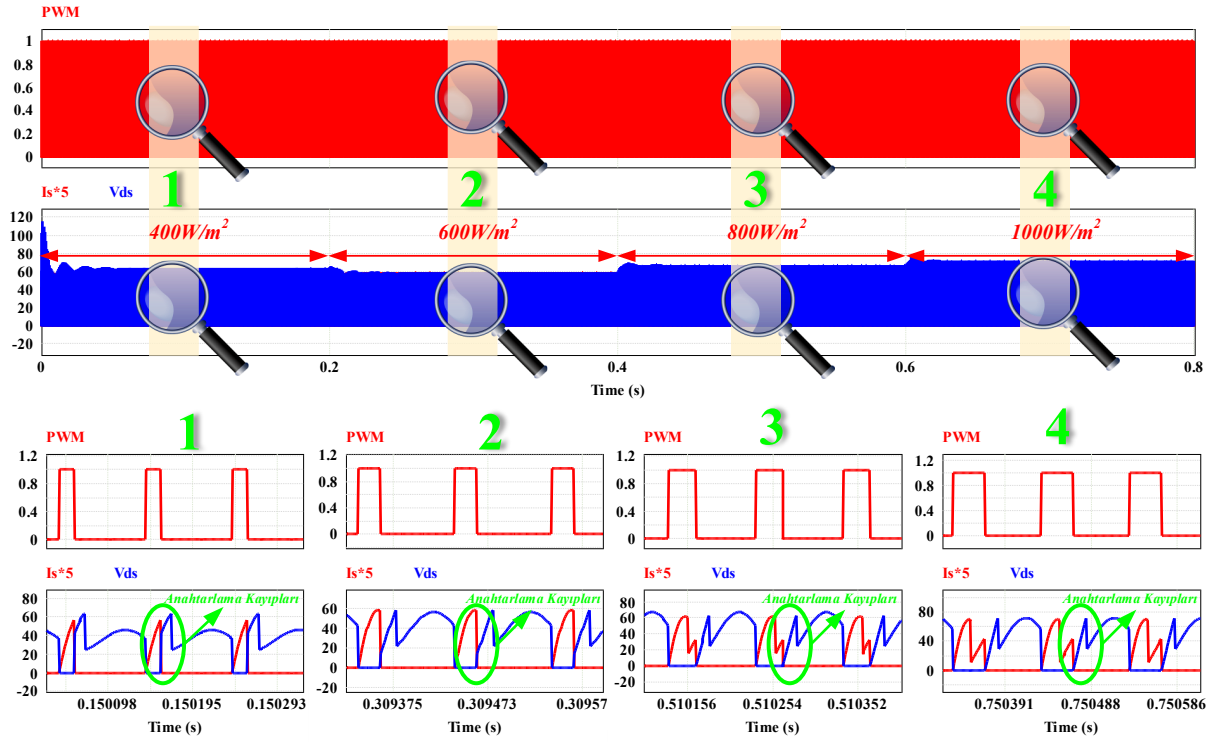
Batarya şarj sistemine ait benzetim çalışması yapılırken ilk olarak Şekil 5-3'te gösterilen PSIM benzetimi kullanılarak MPPT algoritmalarından P&O algoritmasının uygulandığı sert anahtarlama koşullarında çalışma yapılmıştır. Anahtarlama frekansı sabit 10 kHz olarak belirlenmiştir. P&O MPPT ve sert anahtarlama çalışmasına ait sonuçlar 400 – 600 – 800 – 1000  $W/m^2$  güneş ışıınımı değerleri için MPPT açısından Şekil 5-2'de ve PWM sinyali, anahtar akım-gerilimi değerleri için Şekil 5-4'te ve dönüştürücü çıkışına ait akım-gerilim değerleri için Şekil 5-5'te gösterilmiştir.



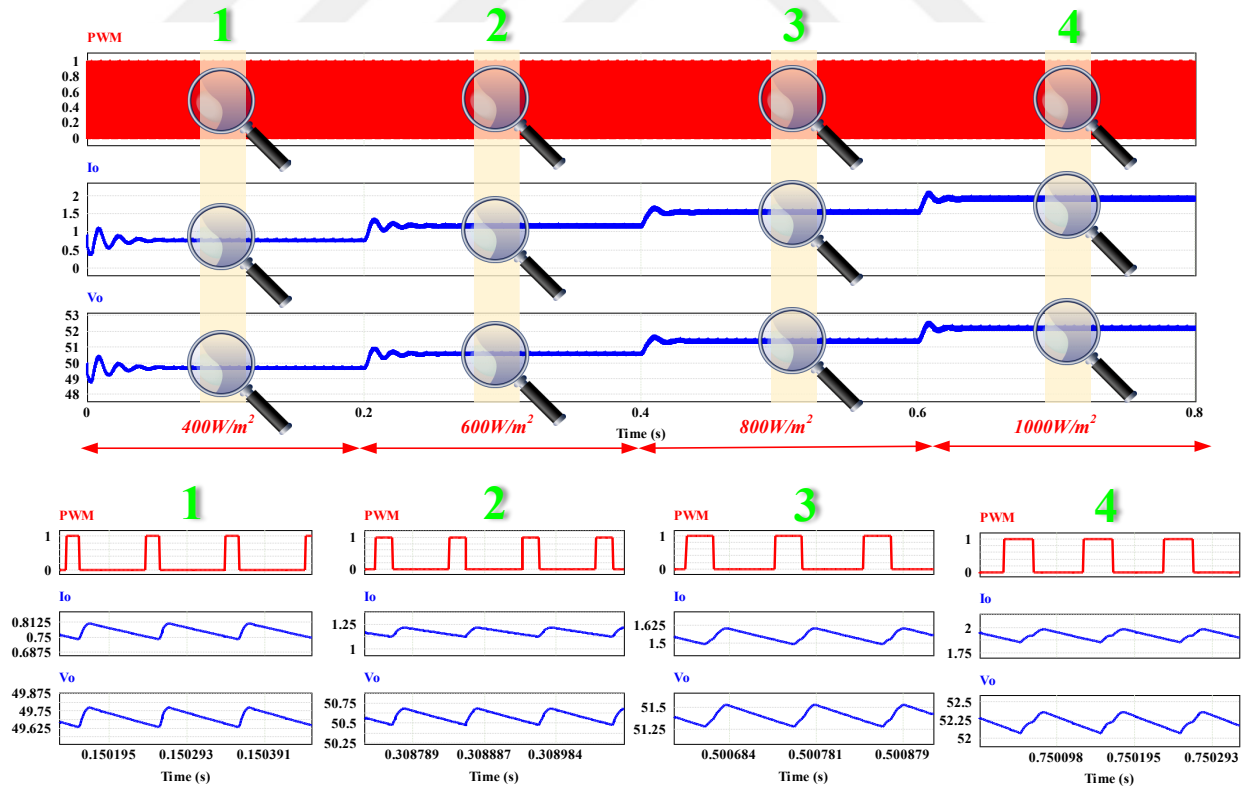
**Şekil 5-2:** P&O MPPT sert anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000  $W/m^2$  için güç takibi



Şekil 5-3: Geleneksel SEPIC dönüştürücü PSIM benzetimi



Şekil 5-4: P&O MPPT sert anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m² için anahtar akımı ve gerilimi

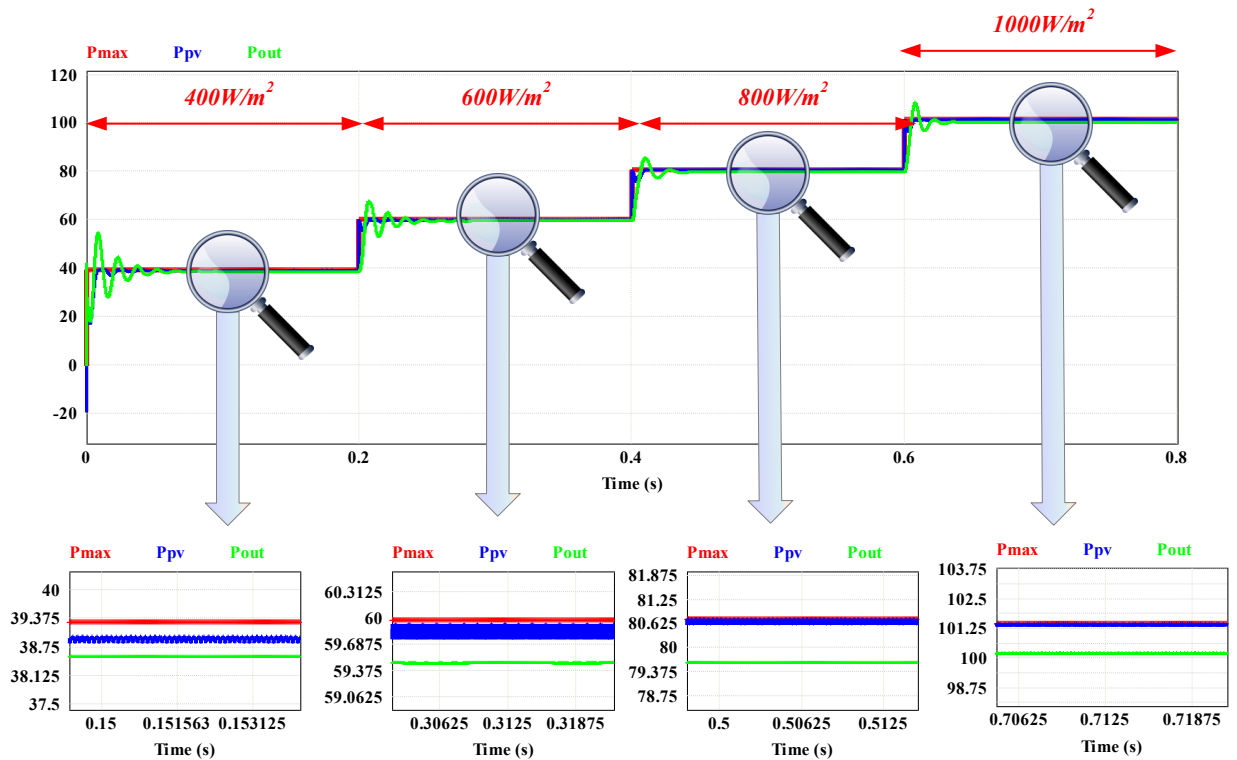


Şekil 5-5: P&O MPPT sert anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m² için dönüştürücü çıkış akımı ve gerilimi

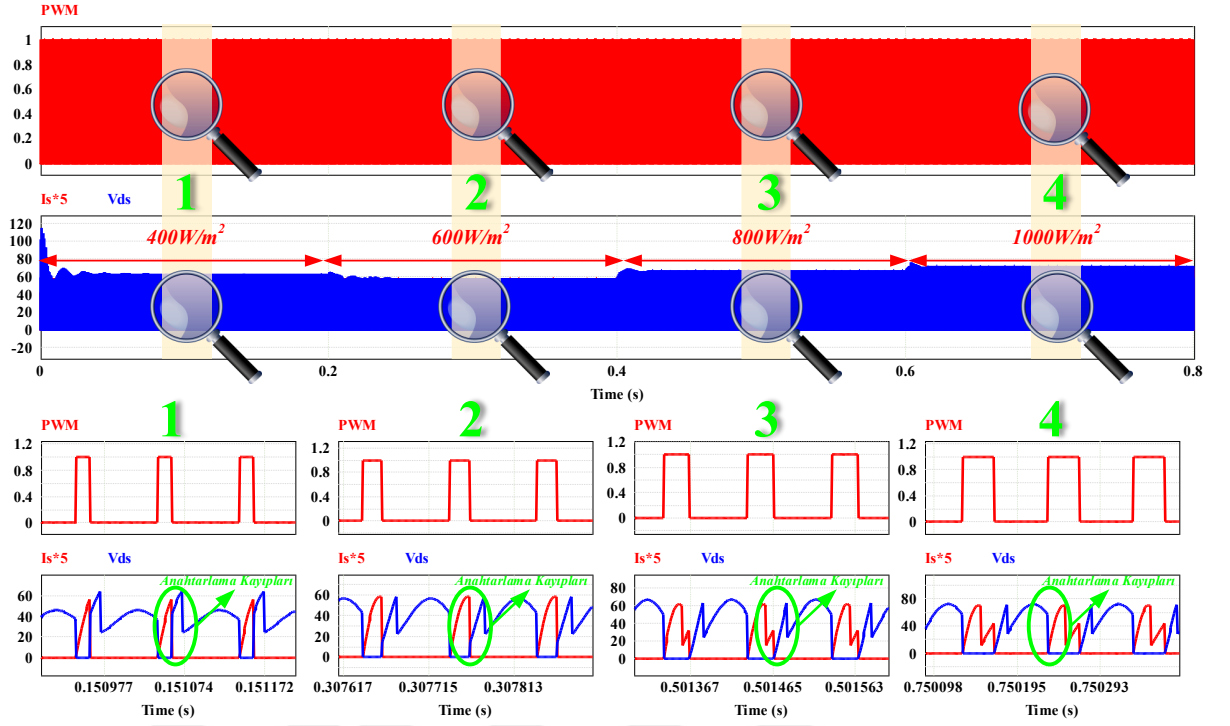
Geleneksel SEPIC dönüştürücüye ait yapılan benzetim çalışmasında sistem P&O algoritması ve sert anahtarlama yöntemi ile çalıştırıldığında maksimum güç takibine ait sonuçlar Tablo 5-2’de gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında ortalama %99,73 verimle maksimum güç takibinin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği görülmektedir. Yarı iletken anahtara ait akım ve gerilim sonuçları incelendiğinde sert anahtarlama koşullarında çalışmaya bağlı olarak anahtarlama kayıplarının olduğu gözlemlenmiştir. Dönüştürücü çıkış akımı ve gerilimi sonuçlarına bakıldığında ise verimin ortalama %98,91 olduğu görülmektedir. Benzetim çalışması yapılırken tüm devre elemanlarının ideal olduğu kabul edildiğinden gerçek devre elemanları ile bu verimin doğruluğu P&O algoritması için deneysel çalışmalar ile test edilmiştir.

### 5.1.2. IC MPPT ve Sert Anahtarlama Benzetim Sonuçları

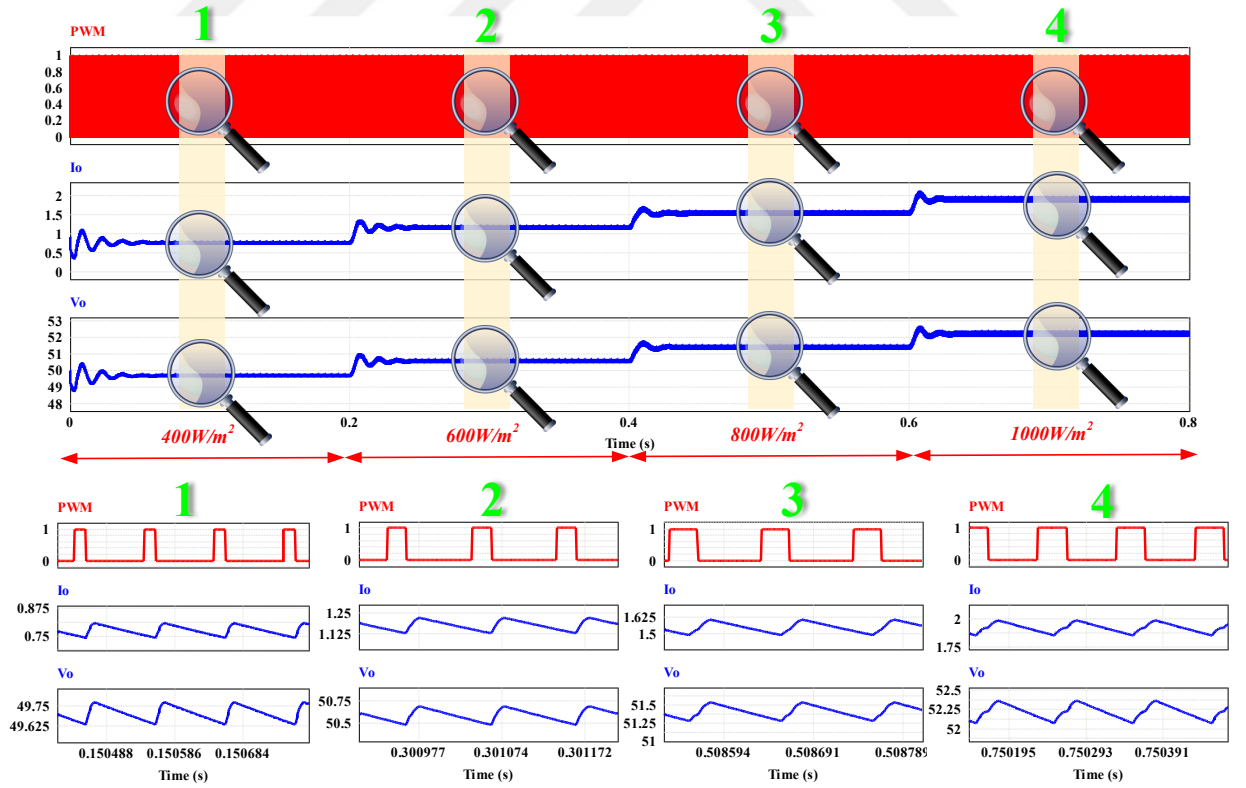
Batarya şarj sistemine ait benzetim çalışması yapılırken MPPT algoritmalarından IC algoritmasının uygulandığı sert anahtarlama koşulları için de çalışma yapılmıştır. IC MPPT ve sert anahtarlama çalışmasına ait sonuçlar  $400 - 600 - 800 - 1000 \text{ W/m}^2$  güneş ışınımı değerleri için MPPT açısından Şekil 5-6’da ve PWM sinyali, anahtar akım-gerilimi Şekil 5-7’de ve dönüştürücü çıkışına ait akım-gerilim değerleri için Şekil 5-8’de gösterilmiştir.



Şekil 5-6: IC MPPT sert anahtarlama koşullarında  $400\text{-}600\text{-}800\text{-}1000 \text{ W/m}^2$  için güç takibi



Şekil 5-7: IC MPPT sert anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m<sup>2</sup> için anahtar akımı ve gerilimi



Şekil 5-8: IC MPPT sert anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m<sup>2</sup> için dönüştürücü çıkış akımı ve gerilimi

Geleneksel SEPIC dönüştürücüye ait yapılan benzetim çalışmasında sistem IC algoritması ve sert anahtarlama yöntemi ile çalıştırıldığında maksimum güç takibine ait sonuçlar Tablo 5-3'te gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında ortalama %99,75 verimle maksimum güç takibinin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği görülmektedir. Yarı iletken anahtara ait akım ve gerilim sonuçları incelendiğinde sert anahtarlama koşullarında P&O algoritması ile yapılan çalışmada olduğu gibi anahtarlama kayıplarının oluştuğu gözlemlenmiştir.

Dönüştürücü çıkış akımı ve gerilimine ait benzetim sonuçları incelendiğinde ve verim hesabı yapıldığında P&O algoritmasında olduğu gibi sisteme verilen gücün ortalama %98,88 verimle çıkışa aktarıldığı gözlemlenmiştir.

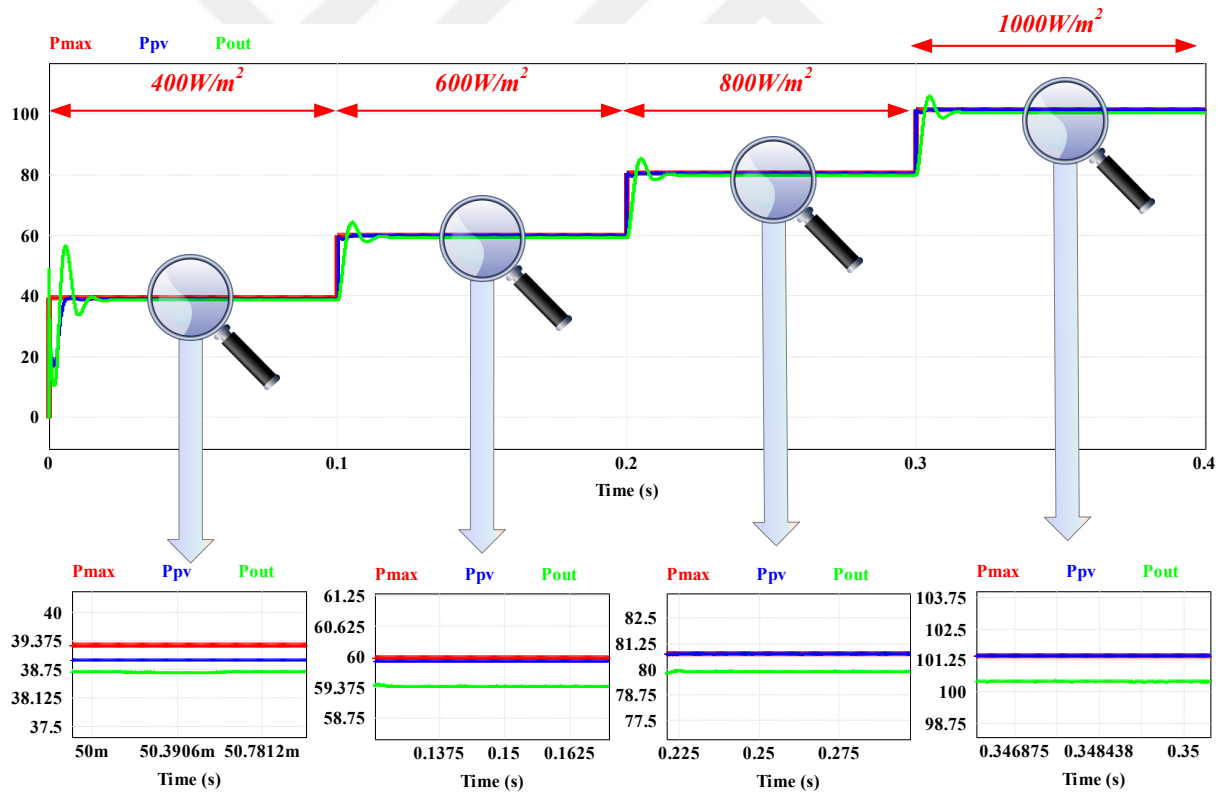
**Tablo 5-3:** Sert anahtarlama koşullarına ait benzetim sonuçları

|                | Güç<br>(W) | MPPT<br>Verimi<br>(%) | $I_{s(rms)}$<br>(A) | $V_{ds(rms)}$<br>(V) | $I_{o(rms)}$<br>(A) | $V_{o(rms)}$<br>(V) | Görev<br>Döngüsü<br>(%) | Frekans<br>(kHz) | Sistem<br>Verimi<br>(%) |
|----------------|------------|-----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|
| <b>P&amp;O</b> | 40         | 99,11                 | 3,099               | 38,48                | 0,794               | 49,74               | 17                      | 10               | 99,03                   |
|                | 50         | 99,56                 | 3,583               | 39,1                 | 0,99                | 50,17               | 19                      | 10               | 99,23                   |
|                | 60         | 99,77                 | 4,219               | 39,71                | 1,181               | 50,59               | 22                      | 10               | 99,19                   |
|                | 70         | 99,87                 | 4,472               | 42,34                | 1,354               | 50,98               | 25                      | 10               | 98,60                   |
|                | 80         | 99,92                 | 4,734               | 43,2                 | 1,541               | 51,39               | 30                      | 10               | 98,71                   |
|                | 90         | 99,94                 | 5,06                | 44,54                | 1,716               | 51,77               | 33                      | 10               | 98,69                   |
|                | 100        | 99,96                 | 5,587               | 45,33                | 1,899               | 52,17               | 36                      | 10               | 98,93                   |
| <b>IC</b>      | 40         | 99,16                 | 3,095               | 38,43                | 0,794               | 49,74               | 17                      | 10               | 99,08                   |
|                | 50         | 99,59                 | 3,584               | 39,01                | 0,99                | 50,17               | 17                      | 10               | 99,21                   |
|                | 60         | 99,79                 | 4,22                | 39,73                | 1,182               | 50,59               | 22                      | 10               | 99,24                   |
|                | 70         | 99,88                 | 4,47                | 42,3                 | 1,355               | 50,98               | 25                      | 10               | 98,57                   |
|                | 80         | 99,93                 | 4,738               | 43,19                | 1,541               | 51,39               | 30                      | 10               | 98,71                   |
|                | 90         | 99,95                 | 5,05                | 44,55                | 1,717               | 51,77               | 33                      | 10               | 98,74                   |
|                | 100        | 99,96                 | 5,6                 | 45,31                | 1,899               | 52,17               | 36                      | 10               | 98,63                   |

### 5.1.3. P&O MPPT ve Yumuşak Anahtarlama Benzetim Sonuçları

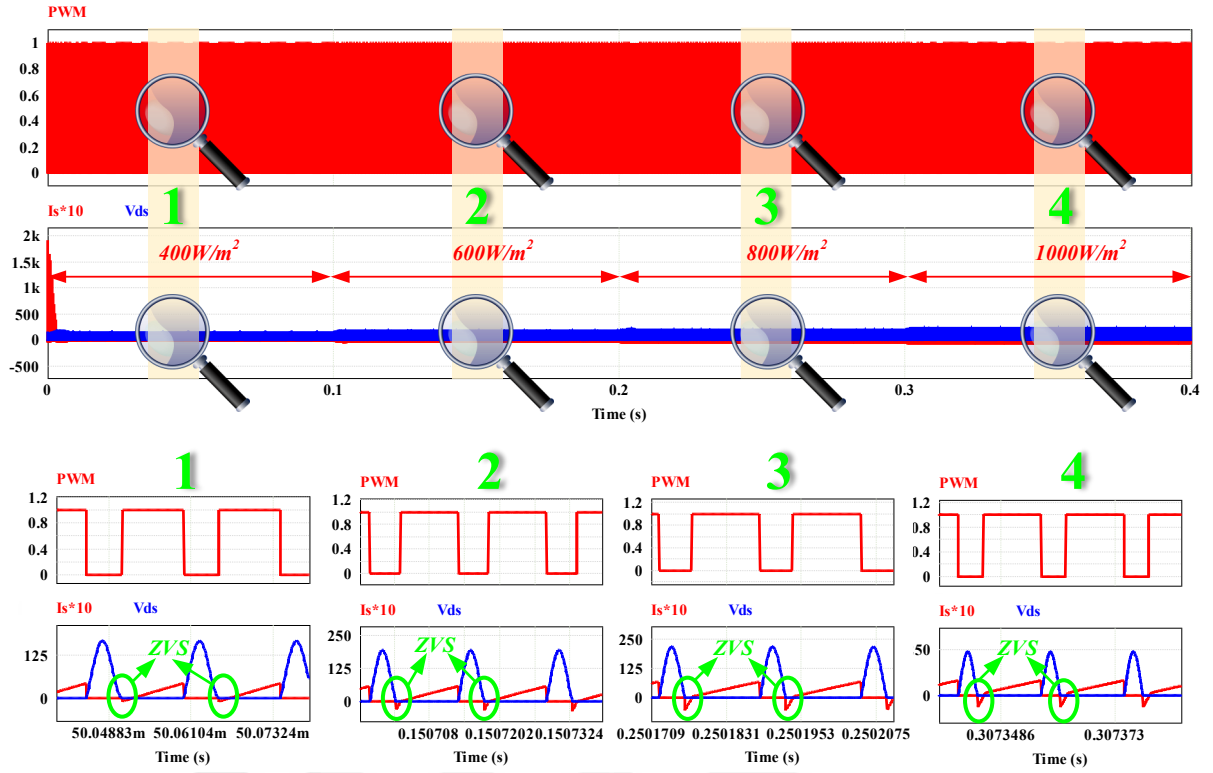
Batarya şarj sistemine ait benzetim çalışması yapılırken ikinci aşamada Şekil 5-10'da gösterilen ZVS SEPIC dönüştürücü PSIM benzetimi kullanılmıştır. Dönüştürücü yumuşak anahtarlama koşullarında çalıştırılmıştır. Anahtarlama frekansı değeri görev döngüsü değerine bağlı olarak değişmektedir. Yumuşak anahtarlama koşullarında çalışmada ilk olarak P&O algoritması kullanılarak sonuçlar alınmıştır.

P&O MPPT ve yumuşak anahtarlama benzetim sonuçlarından maksimum güç takibi Şekil 5-9'da gösterilmiştir. ZVS SEPIC dönüştürücü ile yumuşak anahtarlama koşullarında çalışmaya ait anahtarlama kayıplarının büyük ölçüde önlendiğinin gözlemlenmesi amacıyla anahtara ait akım-gerilimi, diyot akım-gerilimi ve sisteme ait verimin hesaplanabilmesi amacıyla ise dönüştürücü çıkış akımı-gerilimi sonuçları alınmıştır. Bu sonuçlar sırasıyla Şekil 5-11 ve 5-12 ve 5-13'te gösterilmiştir.

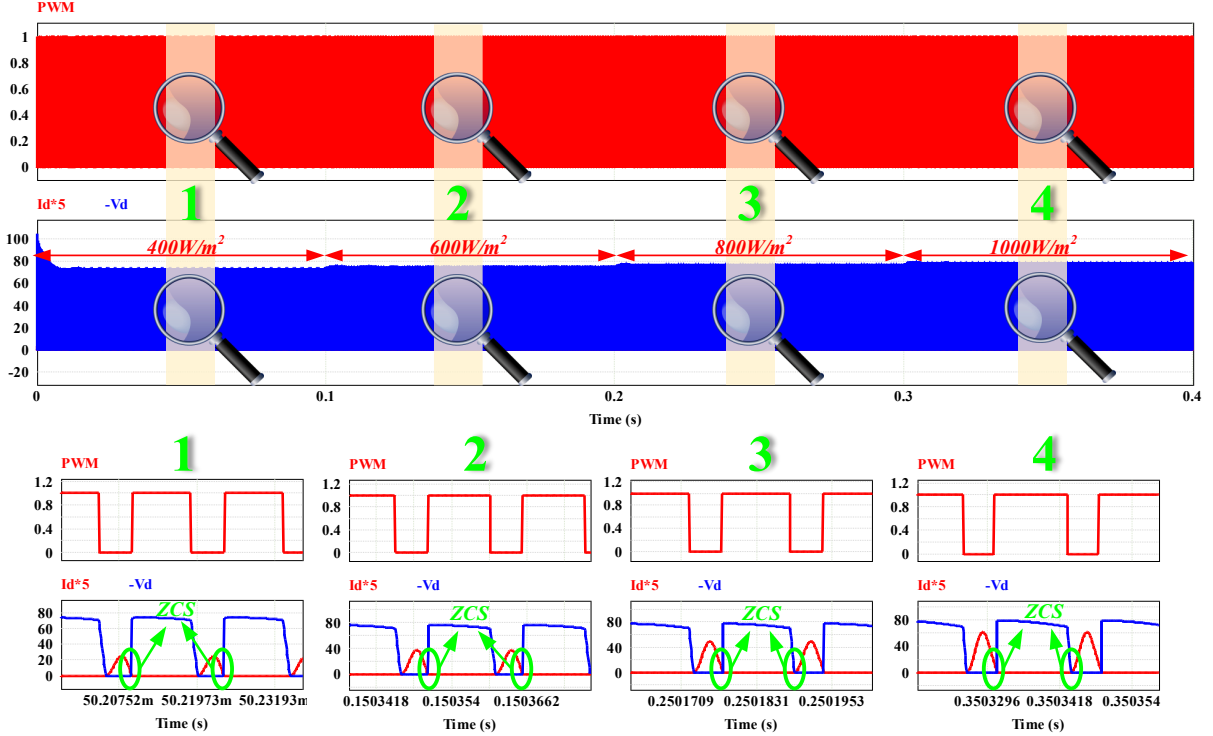


Şekil 5-9: P&O MPPT yumuşak anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000  $W/m^2$  için güç takibi

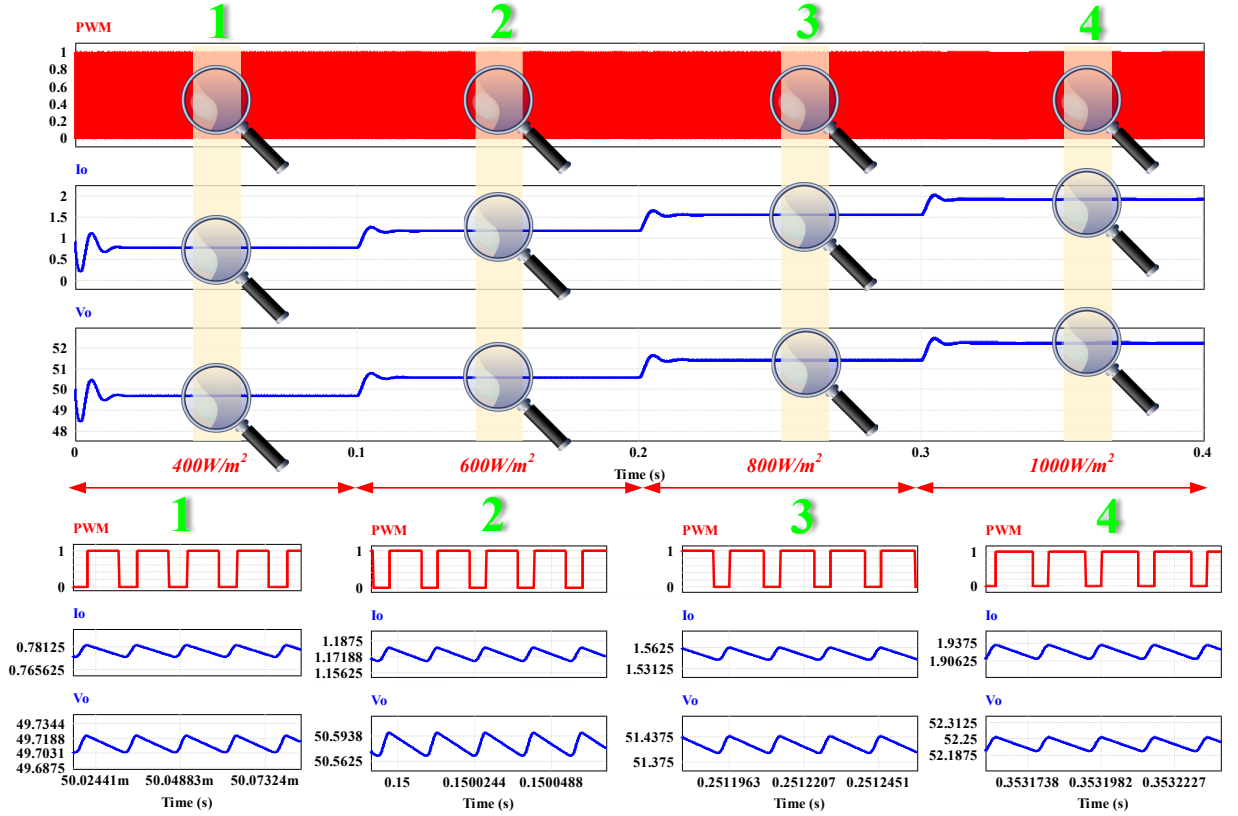




Şekil 5-11: P&O MPPT yumuşak anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m<sup>2</sup> için anahtar akımı ve gerilimi



Şekil 5-12: P&O MPPT yumuşak anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m<sup>2</sup> için diyot akımı ve gerilimi



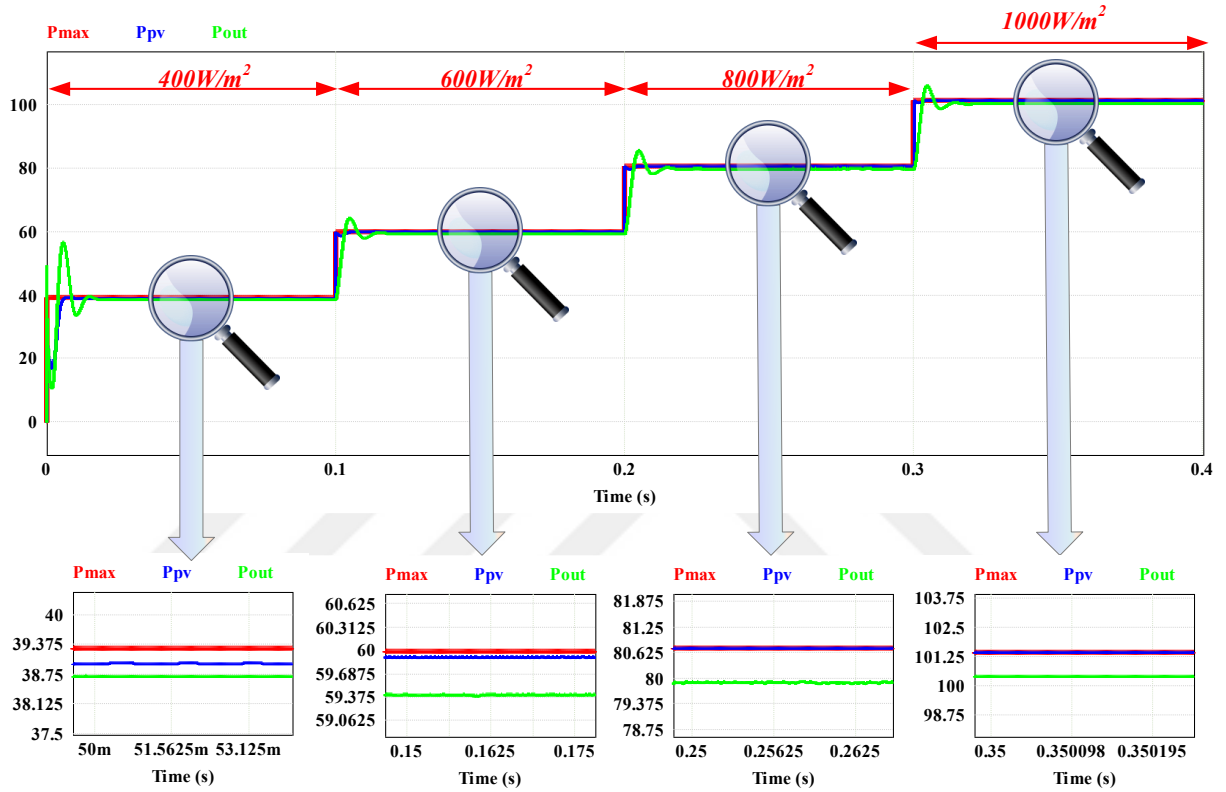
Şekil 5-13: P&O MPPT yumuşak anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m² için dönüştürücü çıkış akımı ve gerilimi

ZVS SEPIC dönüştürücüye ait yapılan benzetim çalışmasında sistem P&O algoritması ve yumuşak anahtarlama yöntemi ile çalıştırıldığında maksimum güç takibine ait sonuçlar Tablo 5-4'te gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında ortalama %99,81 verimle maksimum güç takibinin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği görülmektedir. Yarı iletken anahtara ait akım-gerilim ve diyota ait akım-gerilim sonuçları incelendiğinde yumuşak anahtarlama koşullarında çalışmaya bağlı olarak ZVS ve ZCS koşullarının sağlandığı ve anahtarlama kayıplarının büyük ölçüde azaltıldığı ve dönüştürücü veriminin ortalama %99 olduğu gözlemlenmiştir.

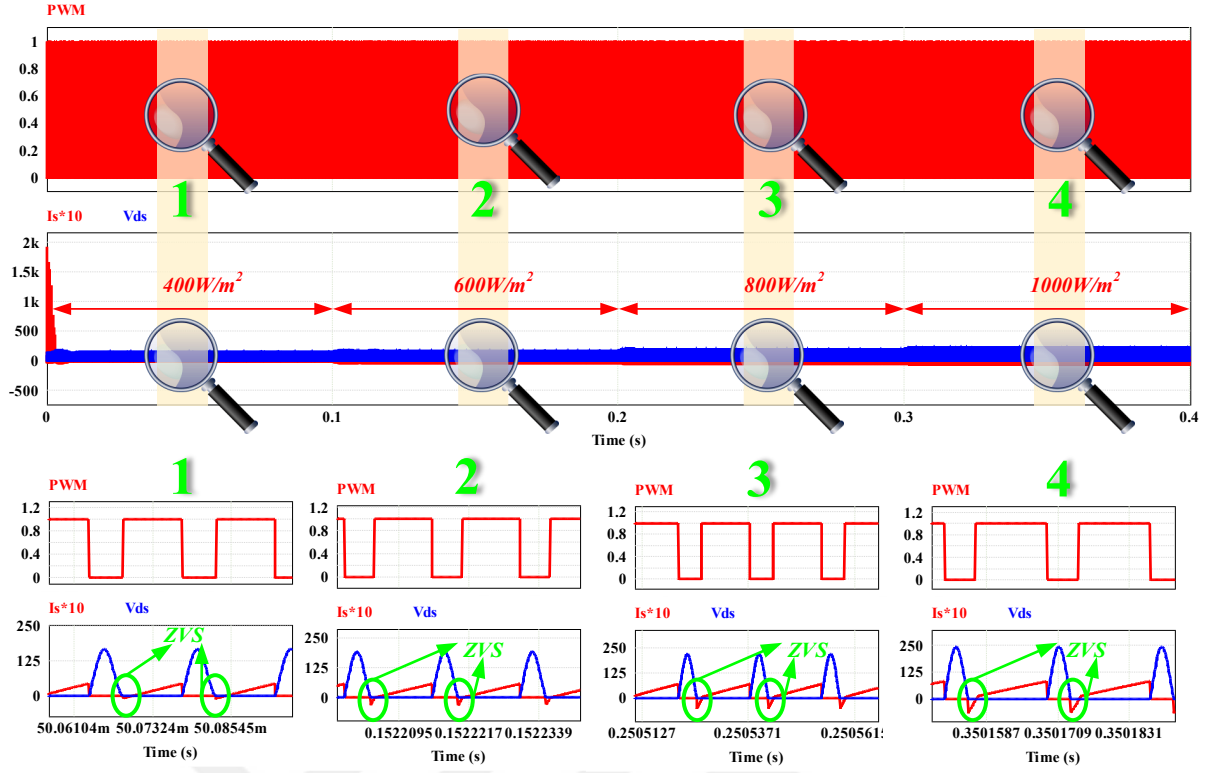
#### 5.1.4. IC MPPT ve Yumuşak Anahtarlama Benzetim Sonuçları

IC algoritması ile çalışma yapıldığında da Şekil 5-10'da gösterilen ZVS SEPIC dönüştürücü PSIM benzetimi kullanılmıştır. Dönüştürücü yumuşak anahtarlama koşullarında çalıştırılmıştır. Anahtarlama frekansı değeri görev döngüsü değerine bağlı olarak değişmektedir.

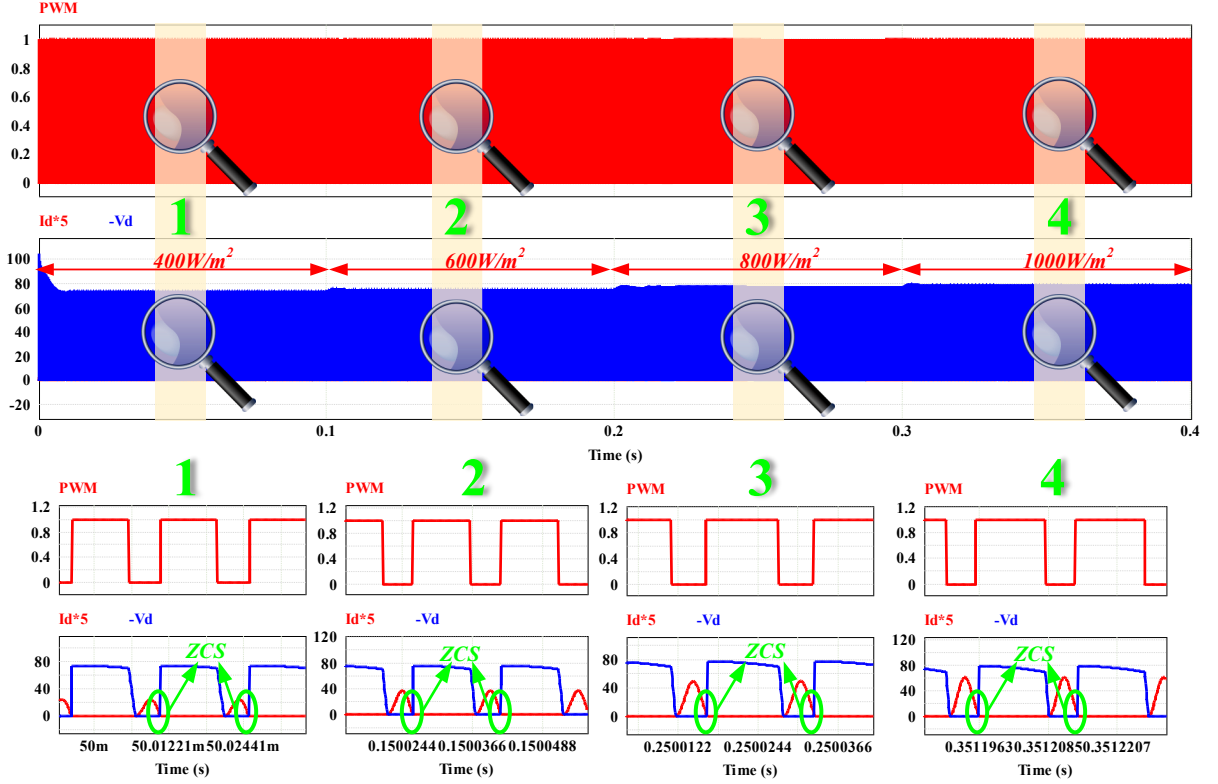
IC MPPT ve yumuşak anahtarlama benzetim sonuçlarından maksimum güç takibi Şekil 5-14'te gösterilmiştir. ZVS SEPIC dönüştürücü ile yumuşak anahtarlama koşullarında çalışmaya ait anahtarlama kayıplarının büyük ölçüde önlendiğinin gözlemlenmesi amacıyla anahtara ait akım-gerilimi, diyot akım-gerilimi ve sisteme ait verimin hesaplanabilmesi amacıyla ise dönüştürücü çıkış akımı-gerilimi sonuçları IC algoritması için de alınmıştır. Bu sonuçlar sırasıyla Şekil 5-15 ve 5-16 ve 5-17'de gösterilmiştir.



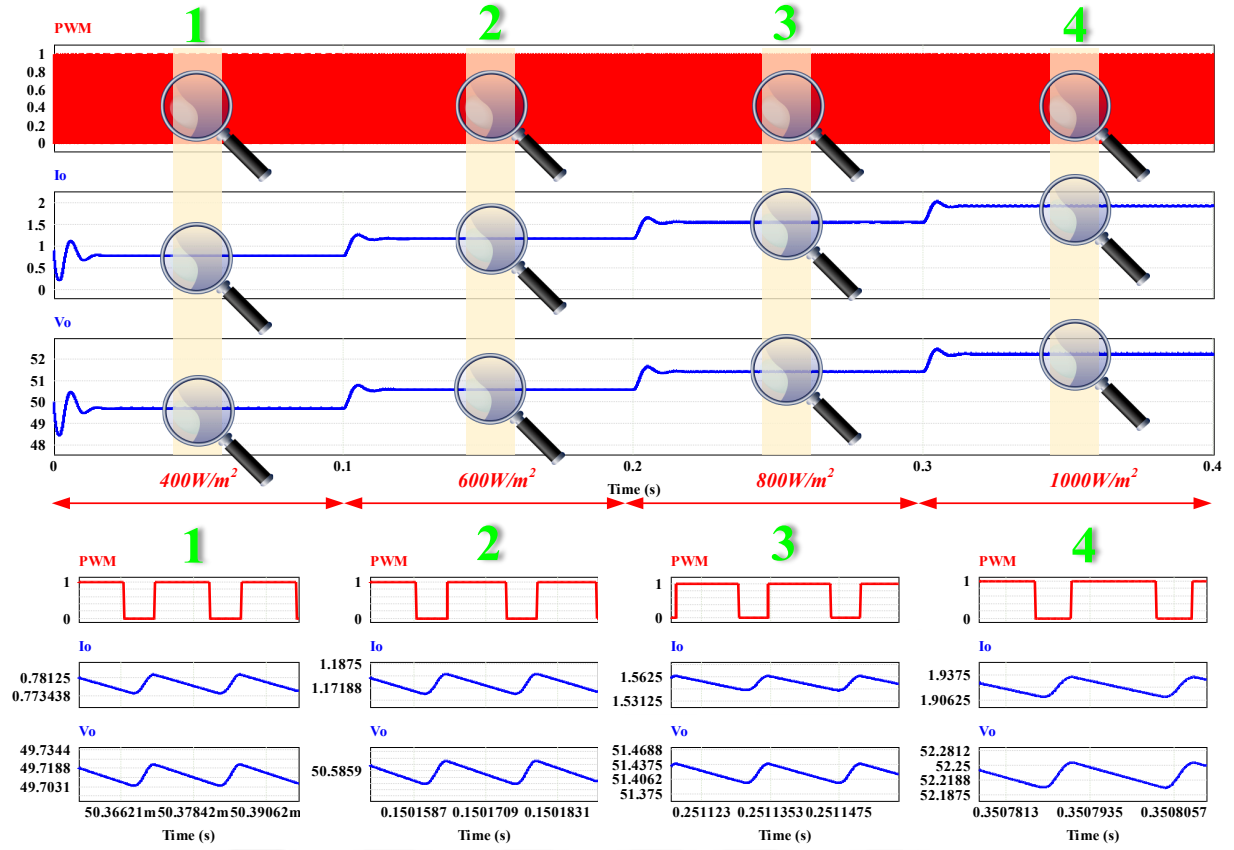
Şekil 5-14: IC MPPT yumuşak anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m² için güç takibi



Şekil 5-15: IC MPPT yumuşak anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m<sup>2</sup> için anahtar akımı ve gerilimi



Şekil 5-16: IC MPPT yumuşak anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m<sup>2</sup> için diyot akımı ve gerilimi



Şekil 5-17: IC MPPT yumuşak anahtarlama koşullarında 400-600-800-1000 W/m² için dönüştürücü çıkış akımı ve gerilimi

ZVS SEPIC dönüştürücüye ait yapılan benzetim çalışmasında sistem IC algoritması ve yumuşak anahtarlama yöntemi ile çalıştırıldığında maksimum güç takibine ait sonuçlar Tablo 5-4'te gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında ortalama %99,81 verimle maksimum güç takibinin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği görülmektedir. Yarı iletken anahtara ait akım-gerilim ve diyota ait akım-gerilim sonuçları incelendiğinde P&O algoritmasında olduğu gibi yumuşak anahtarlama koşullarında çalışmaya bağlı olarak ZVS ve ZCS koşullarının sağlandığı ve anahtarlama kayıplarının büyük ölçüde azaltıldığı ve dönüştürücü veriminin ortalama %98,99 olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 5-4, P&O ve IC algoritmalarının uygulandığı ve yumuşak anahtarlama koşullarında çalışan ZVS SEPIC dönüştürücü tasarımına ait sonuçları göstermektedir. Tablo incelendiğinde her iki MPPT algoritması için de MPPT verimi, yarı iletken anahtara ait akım ve gerilim değerleri, dönüştürücü çıkış akımı ve gerilimi değerleri, frekans, görev döngüsü değeri ve dönüştürücü verimine ait sonuçların birbirine yakın değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.

**Tablo 5-4:** Yumuşak anahtarlama koşullarına ait benzetim sonuçları

|                | <b>Güç<br/>(W)</b> | <b>MPPT<br/>Verimi<br/>(%)</b> | <b>I<sub>s(rms)</sub><br/>(A)</b> | <b>V<sub>ds(rms)</sub><br/>(V)</b> | <b>I<sub>o(rms)</sub><br/>(A)</b> | <b>V<sub>o(rms)</sub><br/>(V)</b> | <b>Görev<br/>Döngüsü<br/>(%)</b> | <b>Frekans<br/>(kHz)</b> | <b>Sistem<br/>Verimi<br/>(%)</b> |
|----------------|--------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| <b>P&amp;O</b> | 40                 | 99,23                          | 1,962                             | 68,95                              | 0,796                             | 49,75                             | 63                               | 69,09                    | 99,07                            |
|                | 50                 | 99,67                          | 2,257                             | 66,92                              | 0,989                             | 50,17                             | 64                               | 67,23                    | 99,03                            |
|                | 60                 | 99,87                          | 2,77                              | 70,37                              | 1,181                             | 50,59                             | 65                               | 65,10                    | 99,09                            |
|                | 70                 | 99,95                          | 3,053                             | 73,96                              | 1,362                             | 50,99                             | 66                               | 63,02                    | 99,02                            |
|                | 80                 | 99,99                          | 3,582                             | 77,43                              | 1,545                             | 51,39                             | 67                               | 60,92                    | 98,91                            |
|                | 90                 | 100                            | 3,935                             | 80,76                              | 1,721                             | 51,78                             | 68                               | 58,98                    | 98,94                            |
|                | 100                | 99,99                          | 4,212                             | 83,97                              | 1,905                             | 52,19                             | 69                               | 57,02                    | 98,96                            |
| <b>IC</b>      | 40                 | 99,24                          | 2,012                             | 63,31                              | 0,796                             | 49,75                             | 63                               | 69,09                    | 99,06                            |
|                | 50                 | 99,68                          | 2,251                             | 72,34                              | 0,989                             | 50,17                             | 64                               | 67,22                    | 99,01                            |
|                | 60                 | 99,87                          | 2,717                             | 70,35                              | 1,181                             | 50,59                             | 65                               | 65,10                    | 99,08                            |
|                | 70                 | 99,96                          | 3,102                             | 73,85                              | 1,362                             | 50,99                             | 66                               | 63,02                    | 99,02                            |
|                | 80                 | 99,99                          | 3,608                             | 75,8                               | 1,545                             | 51,39                             | 67                               | 60,91                    | 98,91                            |
|                | 90                 | 100                            | 4,027                             | 80,81                              | 1,72                              | 51,78                             | 68                               | 58,98                    | 98,89                            |
|                | 100                | 99,99                          | 4,361                             | 84,59                              | 1,905                             | 52,19                             | 69                               | 57,01                    | 98,96                            |

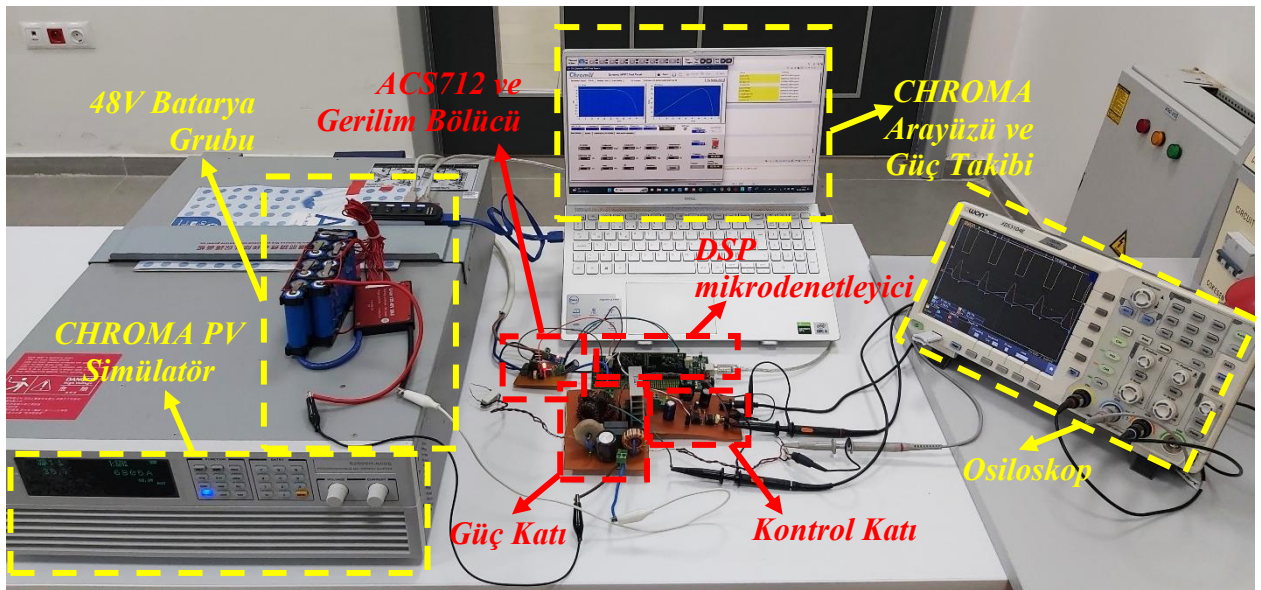
## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, benzetimi yapılan sistemin laboratuvar ortamında yapılan uygulaması ve deneysel çalışmalar anlatılmaktadır. Deneysel çalışmalara ait MPPT tabanlı batarya şarj sistemi tasarımı, kontrol ve güç katı tasarımı ve P&O algoritması için uygulama sonuçları gösterilmiştir.

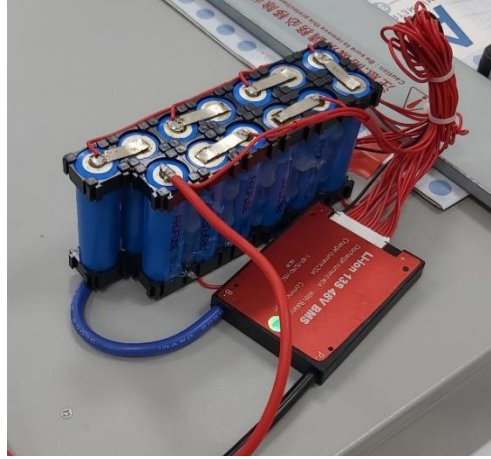
### 6.1. MPPT Tabanlı Batarya Şarj Sistemi Tasarımı

Tez çalışması kapsamında, Şekil 6-1 deney düzeneğinde gösterildiği üzere, EA batarya şarj sistemi uygulamasında 13 adet seri bağlı lityum-iyon pilden oluşan 48 V batarya kullanılmıştır. Batarya grubundaki her bir pilin şarj ve deşarj sırasında akım, gerilim ve sıcaklık ölçümlerinin denetiminin yapılabilmesi için 13S 48V 20A değerinde hazır batarya yönetim sistemi modülü (BMS) kullanılmıştır. BMS'nin batarya ile entegrasyonu Şekil 6-2'de gösterilmiştir.

Batarya şarjı için tercih edilen ZVS SEPIC DA-DA dönüştürücü kartının tasarımı yapılmıştır. Sistemin çalışması için gereken güç kaynağı FV panel olarak belirlenmiştir. Giriş kaynağı olarak CHROMA firmasının 62050H-600S (600V/8.5A/5kW) modeline sahip ve FV simülatörü kullanılmıştır. Bu güç kaynağından elde edilen verilerin ( $I_{pv}$  ve  $V_{pv}$ ) ölçülmesinde akım sinyali için ACS712 sensör modülü ve gerilim sinyali için gerilim bölücü devresi kullanılmıştır. Dönüştürücü tasarımında kullanılan yarı iletken anahtar için Fuji Electric tarafından üretilen FGW75XS65C Discrete IGBT kullanılmıştır.

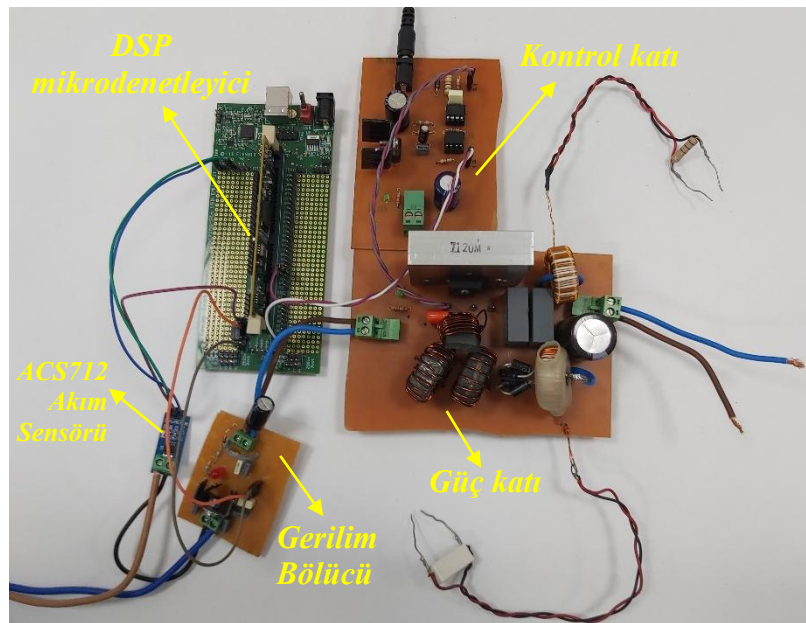


Şekil 6-1: Elektrikli araç batarya şarj sistemi deney düzeneği

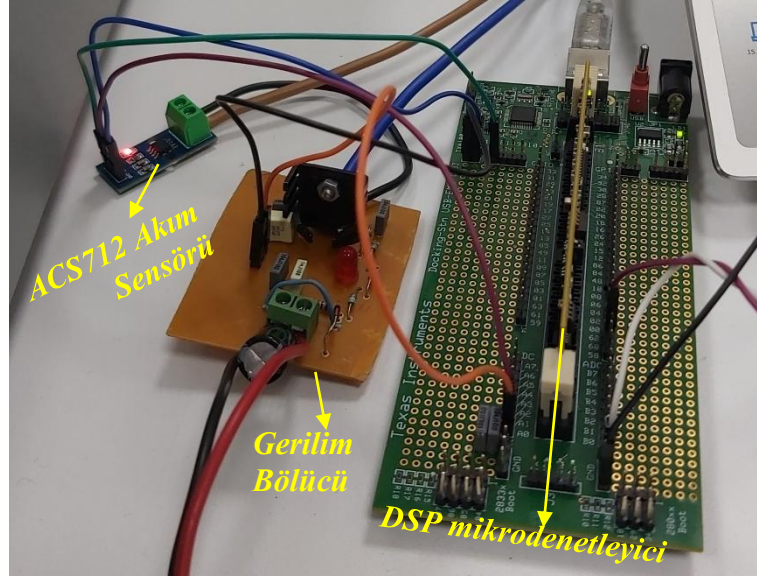


**Şekil 6-2:** 48V batarya grubu ve batarya yönetim sistemi (BMS)

Dönüştürücüye ait kart tasarımı devre elemanlarının aşırı akım ve yüksek gerilim durumlarında korunması amacıyla Şekil 6-3'te gösterildiği gibi kontrol ve güç katı şeklinde ayrı ayrı yapılmıştır. Sistemin kontrolü için kullanılan mikrodeneleyici kartı ise Texas Instruments firmasına ait TIC2000 ailesinden TMS320F28335 DSP olarak seçilmiştir. DSP'ler, birçok işlemi aynı anda yapabilme özelliğine sahip, gelişmiş matematiksel işlem yapabilen ve yüksek hızlı işlem yapma kabiliyetine sahip kartlardır. F28335 DSP'ye ait giriş/çıkış (I/O) ve analog sayısal dönüşüm (ADC) birimleri 3.3 V gerilim değeri ile çalışmaktadır. DSP'nin çalışmasında gereken saat frekansı değeri 30MHz olup bu değer yükseltilerek 150MHz'e kadar çıkarılabilmektedir. ACS712, gerilim bölücü devresi ve F28335 DSP kart Şekil 6-4'te gösterilmiştir.



**Şekil 6-3:** Batarya şarj sistemi için uygulama devresi



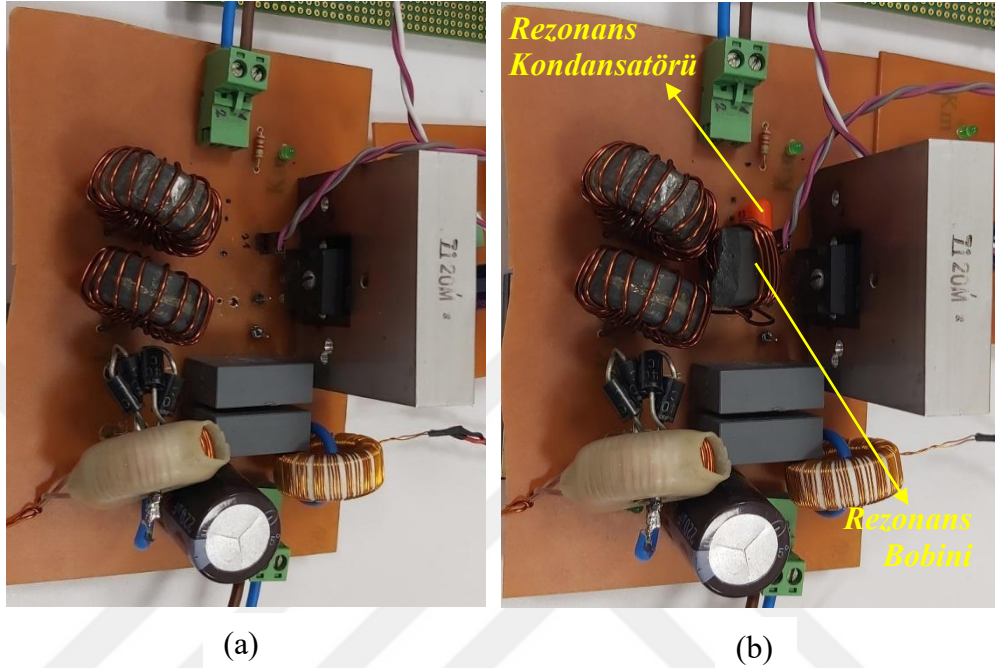
Şekil 6-4: ACS712 akım sensörü, gerilim bölücü ve DSP mikrodnetleyici

Geliştirilen kontrol algoritmaları gömülü koda dönüştürülerek DSP mikrodnetleyicisine aktarılmıştır. Böylece FV simülatöründeki akım ve gerilim değerlerine göre uygun PWM sinyalleri üretilerek yarı iletken anahtarın sürülmesi için kontrol katının girişine aktarılmıştır. Kontrol katının çıkışından alınan sinyalin güç katında yer alan yarı iletken anahtarın kapı (gate) ucuna uygulanması ile yarı iletken anahtarın sürülmesi sağlanmış ve dönüştürücü devresi ile batarya şarjı için uygun gerilim değeri ayarlanmıştır. Böylelikle dönüştürücü devresinin çıkışına yük olarak bağlanan 48 V EA bataryasının yüksek verimle şarj edilebildiği gözlemlenmiştir.

Deneysel çalışmalar yapılırken sistem girişinde kullanılan FV simülatöre ait güneş ışınımı değeri  $1000 \text{ W/m}^2$ , gerilim değeri ( $V_{pv}$ ) 36 V ve 40 – 50 – 60 – 70 – 80 – 90 – 100 W güç değerleri için uygulama yapılmıştır. Panel gücü değerinin artmasıyla FV simülatörün akım ( $I_{pv}$ ) değerinin ve dolayısıyla sistem veriminin arttığı gözlemlenmiştir.

FV simülatörden maksimum verimin alınabilmesi için P&O algoritması PI denetleyici ile kullanılmış ve maksimum güç noktası takibi CHROMA arayüzü aracılığı ile yapılmıştır. Arayüz üzerinde bulunan MPPT testi sayesinde MPPT'nin verim değeri yüzde (%) cinsinden gözlemlenmiştir. FV simülatör ile uygulanan tüm güç değerleri için MPPT'nin başarı ile gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Sistemde tercih edilen ZVS SEPIC dönüştürücünün geleneksel SEPIC dönüştürücü ile farkının gözlemlenmesi amacıyla iki farklı topoloji ile uygulama yapılmıştır.

Şekil 6-5'te gösterildiği gibi sert anahtarlama tekniğinin uygulandığı geleneksel SEPIC dönüştürücüye rezonans devresi eklenerek yumuşak anahtarlama tekniklerinden ZVS tekniği uygulanmış ve iki devre ayrı ayrı çalıştırılarak yarı iletken anahtarın akım ve gerilim dalga biçimleri incelenmiştir.



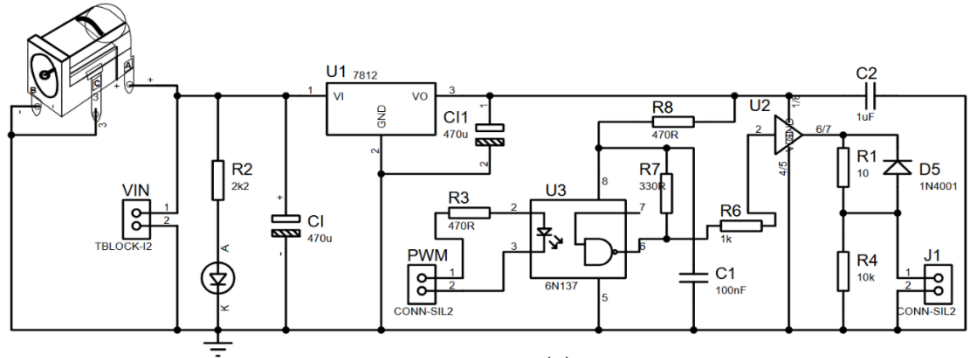
Şekil 6-5: (a) Geleneksel SEPIC dönüştürücü ve (b) ZVS SEPIC dönüştürücü

Osiloskop yardımıyla incelenen bu dalga biçimlerine bakılarak alınan sonuçlar gösterilmiştir. Geleneksel SEPIC dönüştürücüde anahtarlama kayıpları oluşurken ZVS SEPIC dönüştürücüde rezonans devresi sayesinde bu kayıpların azaldığı gözlemlenmiştir.

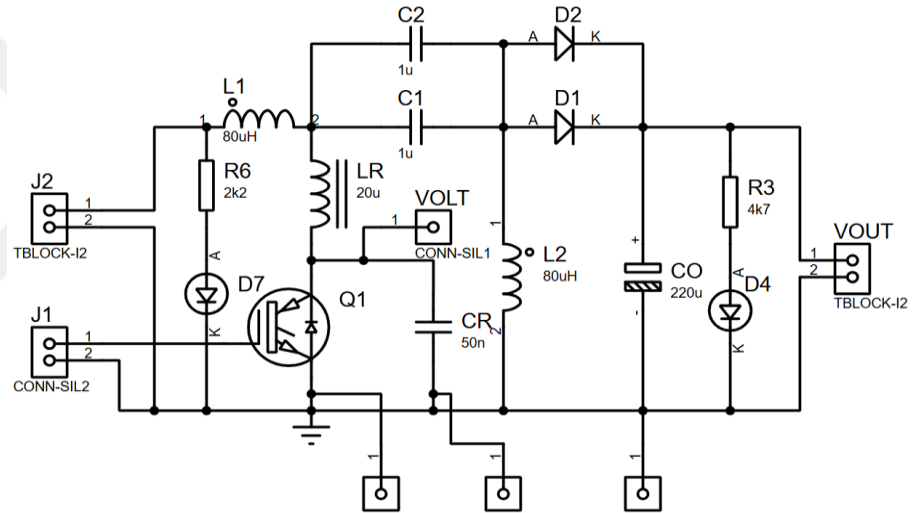
## 6.2. Kontrol ve Güç Katı Tasarımı

Kontrol katı ve güç katı tasarımları PROTEUS programı kullanılarak yapılmıştır. Kartların PCB tasarımları yapılmış ve baskı devre yöntemi ile hazırlanmıştır. Kontrol ve güç katına ait devre tasarımları Şekil 6-6'da gösterilmiştir. Bu tasarımlara bağlı olarak kartların PCB tasarımları yapılmıştır. Kontrol ve güç katına ait PCB tasarımları ise Şekil 6-7 ve Şekil 6-8'de gösterilmiştir. Şekil 6-6 (a)'da gösterilen kontrol katının tasarımında sisteme giriş geriliminin uygulanması bir jack girişi veya bir klemens yardımıyla yapılmaktadır. Kontrol katına uygulanan giriş gerilimi jack giriş kullanılarak 220 V AA şebeke geriliminin bir 12V/1A adaptör ile 12 V DA gerilime dönüştürülmesiyle elde edilmiştir.

Kart girişinde giriş geriliminin uygulandığının anlaşılabilmesi için LED ve LED'e uygun gerilimin ayarlanabilmesi için 2,2 k $\Omega$  direnç bağlanmıştır. Gerilimin sınırlandırılması amacıyla girişte 470  $\mu$ F bir kondansatör eklenmiştir.



(a)



(b)

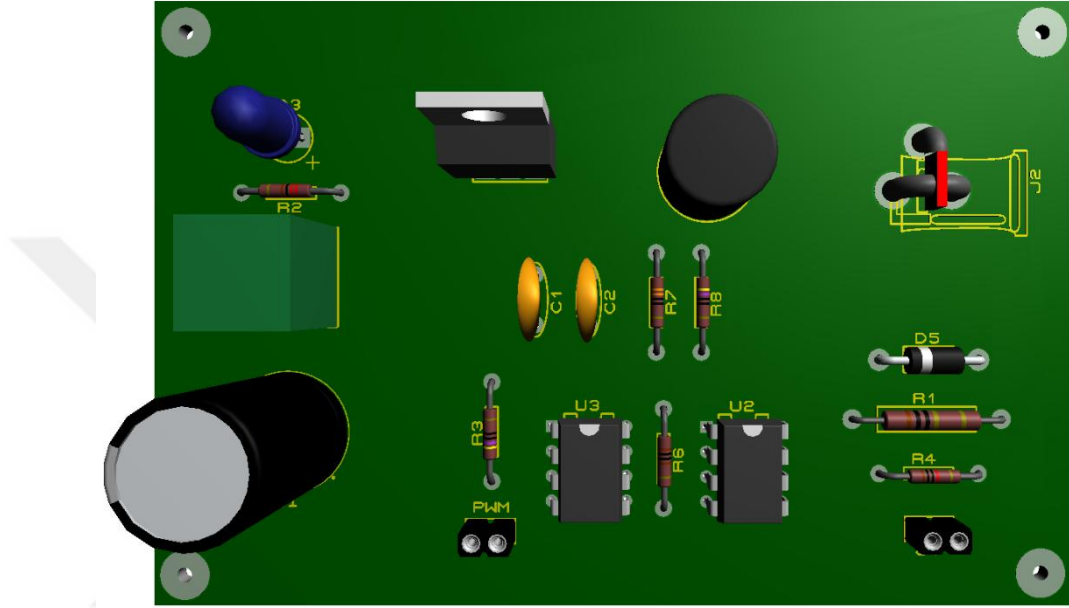
Şekil 6-6: Kart tasarımları (a) Kontrol katı, (b) Güç katı

Mikrodenetleyici devresini korumak amacıyla 6N137 entegresi kullanılmıştır. Bu entegre optokuplör kategorisinde olup dijital çıkışlı bir entegredir. Optokuplörün görevi iki devreyi birbirinden fiziksel olarak ayırmak yani elektriksel olarak yalıtmaktır. Optokuplörün 2 ve 3 numaralı pinlerinden tetikleme sinyali (PWM) uygulanır ve fotodiyot yanarak NAND kapısını aktif eder. Tetikleme sinyalinin uygulandığı bacağı seri direnç bağlanmalıdır. 8 numaralı pinden besleme gerilimi ( $V_{CC}$ ) uygulanarak optokuplörün çalışması sağlanır.

Optokuplör devresini korumak için gerilim regülatörü kullanılmalıdır. Dolayısıyla kontrol katı devresinde LM7812 gerilim regülatörü kullanılmıştır.

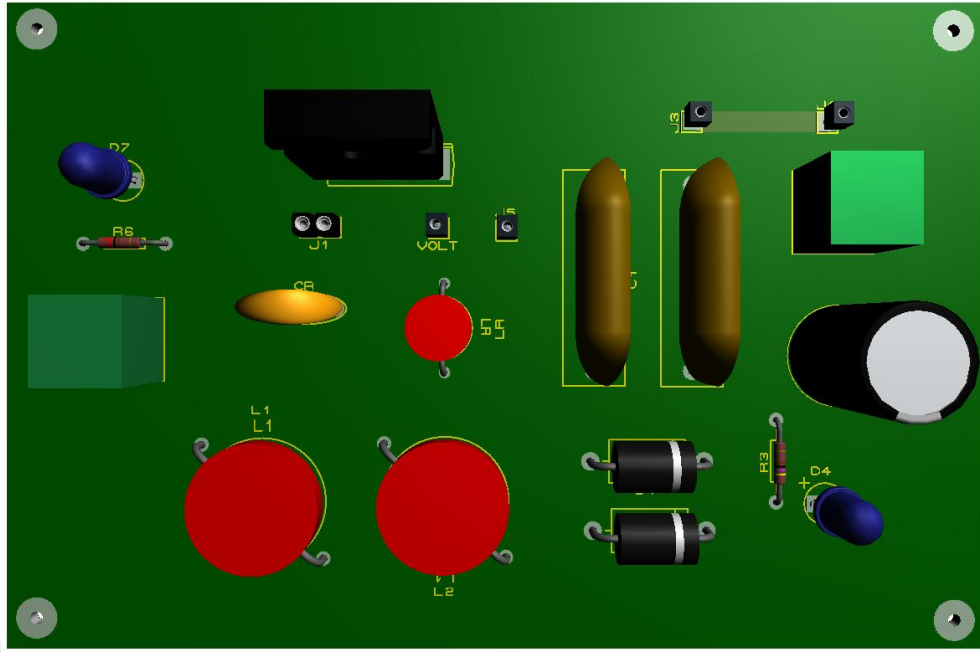
Kontrol katında yarı iletken anahtarın sürülmesi için TC4429 entegresi kullanılmıştır. TC4429, tek çıkışlı bir MOSFET sürücü devresidir. Aynı sınıfta olan TC4420 evirmeyen sürücü entegre çeşidi iken TC4429 eviren çıkış veren bir entegredir.

Entegrenin 2 numaralı pinine 6N137 optokuplör devresinin çıkışından alınan PWM sinyali uygulanır ve sürücü entegrenin 6 numaralı çıkış pininden güç katında bulunan yarı iletken anahtarın kapı (gate) ucuna bağlantı yapılarak yarı iletken anahtar sürülmüş olur.



Şekil 6-7: Kontrol katına ait PCB tasarımı

Tasarlanan sistemde güç katı ZVS SEPIC dönüştürücü devresidir. Güç katında giriş ve çıkışta sinyallerin olduğunun anlaşılabilmesi için LED bağlantısı yapılmıştır. Akım sensörü ve gerilim bölücü devresinden alınan çıkışlar ile güç katı devresinin beslemesi yapılmaktadır. Sıfır gerilimde anahtarlama işleminin sağlanabilmesi için güç katı devresinde “Rezonans Devresi” bulunur. Böylelikle dönüştürücüye uygulanan gerilim sinyalinin sinüzoidal formda olmasına zorlanarak anahtarlama sinyalinin sıfır gerilim anında uygulanıp anahtarlama kayıplarının önlenmesi ve EA batarya şarjının yüksek verimle yapılması sağlanmaktadır.



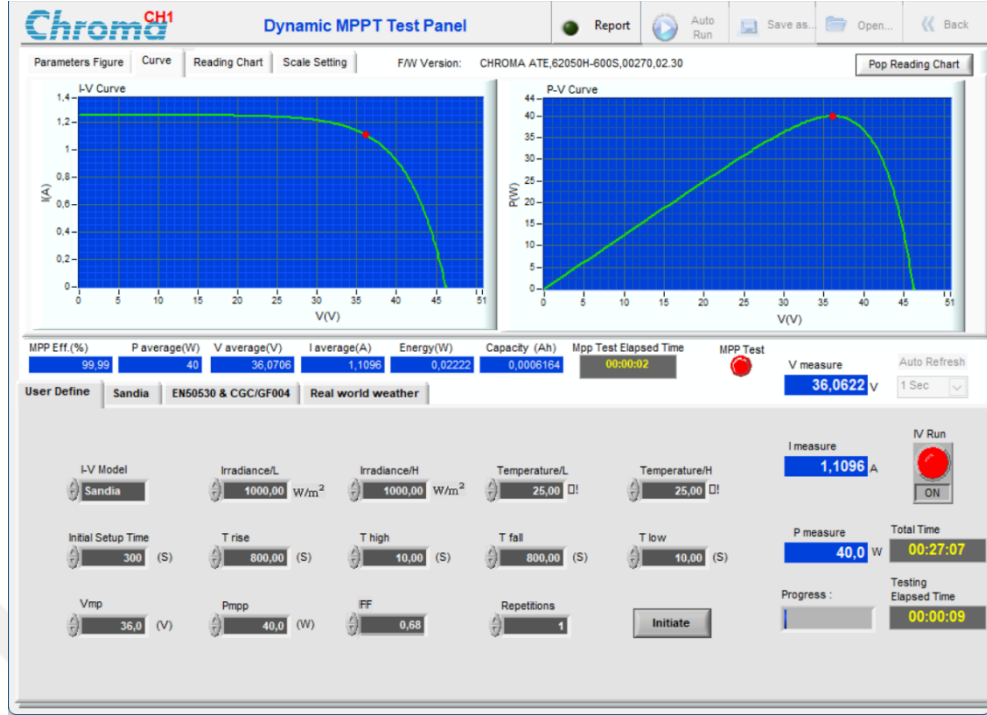
Şekil 6-8: Güç katına ait PCB tasarımı

### 6.3. MPPT Tabanlı Batarya Şarj Sistemi Uygulama Çalışmaları

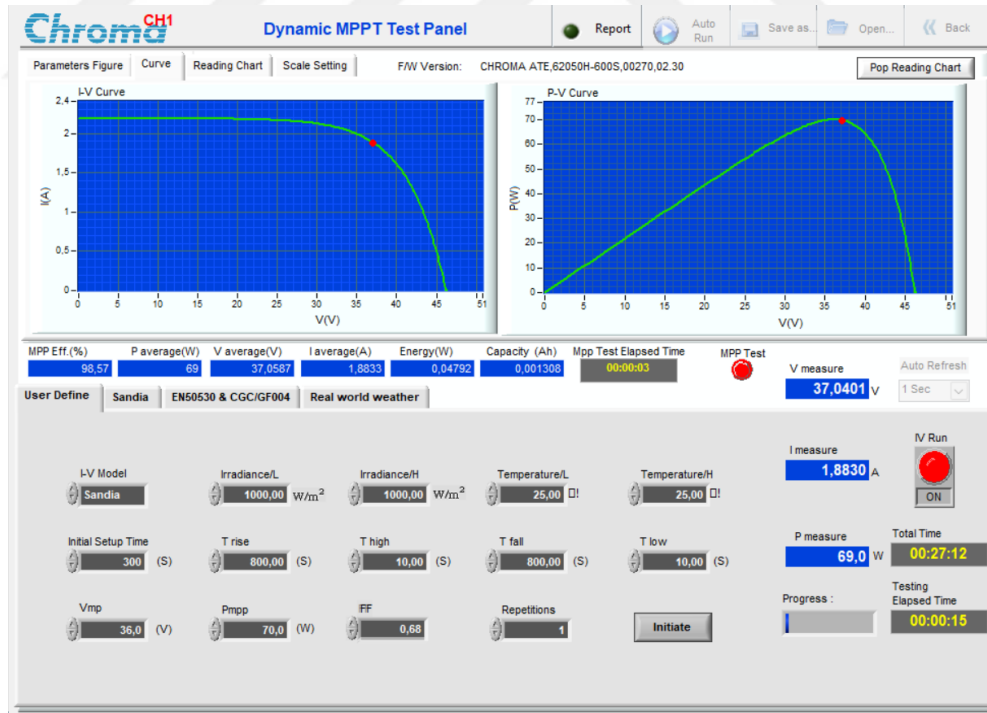
Bu bölümde EA batarya şarj sistemine ait uygulama sonuçları gösterilmiştir. Sistemin güç kontrolünde kullanılan MPPT algoritmalarından P&O algoritmasına ait kodlar hazırlanıp sisteme uygulanmıştır. Sistem geleneksel SEPIC dönüştürücü ile sert anahtarlama tekniğinin uygulandığı ve ZVS SEPIC dönüştürücü ile yumuşak anahtarlama tekniğinin uygulandığı iki aşamada çalıştırılmış ve sonuçlar gösterilmiştir.

#### 6.3.1. P&O MPPT ve Sert Anahtarlama Uygulama Sonuçları

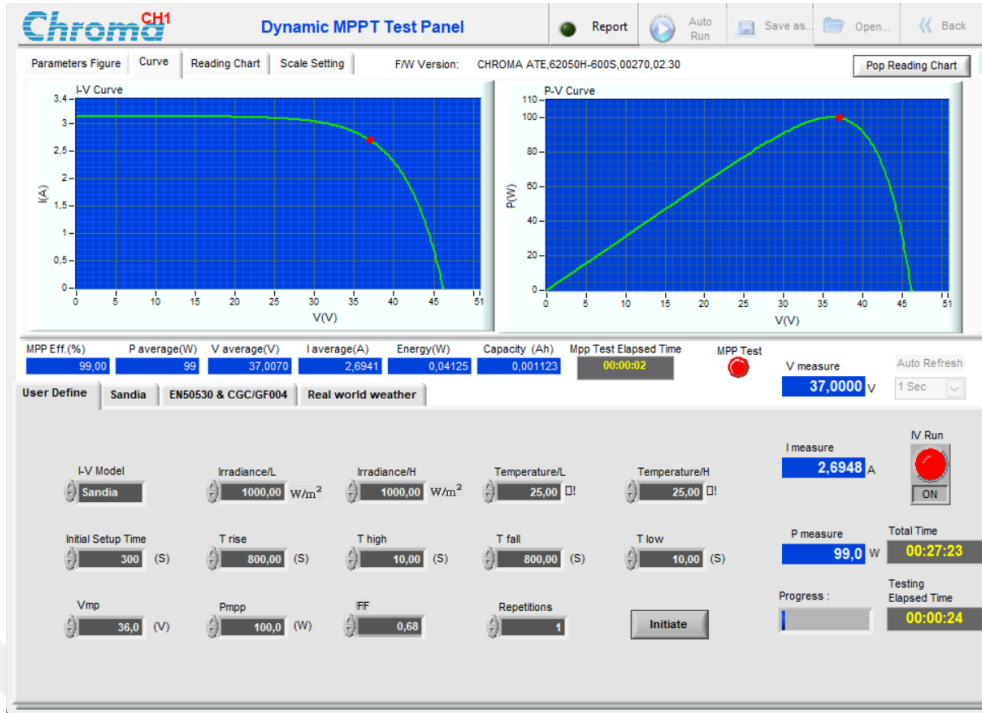
Tasarlanan ve uygulaması gerçekleştirilen sistem ilk olarak geleneksel SEPIC dönüştürücü topolojisinde ve sert anahtarlama tekniği ile çalıştırılmıştır. MPPT'nin sağlanabilmesi için ise PI denetleyici ile P&O birlikte kullanılmıştır. FV simülatöre ait CHROMA arayüzü ile sisteme giriş olarak  $1000 \text{ W/m}^2$  güneş ışınımı, sıcaklık değeri olarak  $25^\circ\text{C}$  ve maksimum güç noktasındaki gerilim değeri ( $V_{MPP}$ ) 36 V olarak uygulanmıştır. 40 – 50 – 60 – 70 – 80 – 90 – 100 W olacak şekilde farklı güç değerleri sırasıyla sisteme uygulanmıştır. 40 – 70 – 100 W değerleri için MPPT verimi, anahtarın akım ve gerilim dalga formları ve sistem verimine ait sonuçlar verilmiştir. Şekil 6-9, Şekil 6-10 ve Şekil 6-11'de MPPT testlerine ait CHROMA arayüzü sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 6-9: P&O MPPT ve sert anahtarlama koşullarında 40W için güç takibi



Şekil 6-10: P&O MPPT ve sert anahtarlama koşullarında 70W için güç takibi



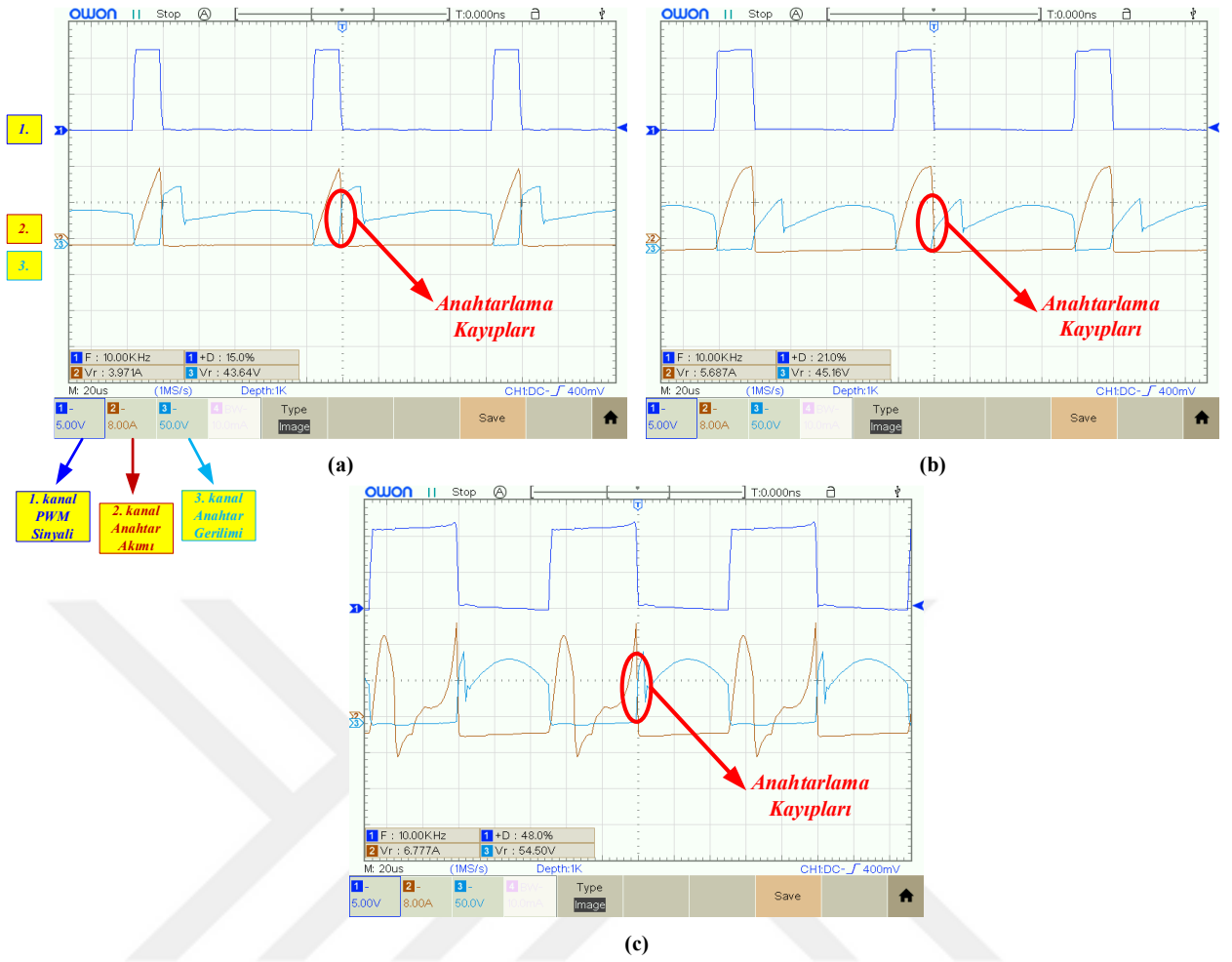
Şekil 6-11. P&O MPPT ve sert anahtarlama koşullarında 100W için güç takibi

CHROMA arayüzüne ait şekillerde akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) eğrileri üzerinde bulunan kırmızı nokta ile anlık güç seviyesi izlenmekte ve noktanın eğrinin üzerinde bulunduğu yere göre anlık güç hesaplanmaktadır. Şekiller incelendiğinde, sisteme uygulanan güç değeri arttıkça panele ait akım değerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Geleneksel SEPIC dönüştürücünün sert anahtarlama koşullarında P&O MPPT algoritması tabanlı çalıştırıldığında devredeki yarı iletken anahtara ait akım ve gerilim değerleri osiloskop yardımıyla ölçülmüştür. Sonuçlar 40 – 70 – 100 W için Şekil 6-12’de gösterilmiştir.

Anahtara ait akım ve gerilim sonuçları incelendiğinde sert anahtarlama tekniğinin uygulandığı geleneksel SEPIC dönüştürücüde anahtarlama kayıplarının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum sistem verimini düşürerek FV simülatör ile elde edilen maksimum gücün istenilen güç ve verim değerinde EA bataryasına aktarılamamasına neden olmaktadır.

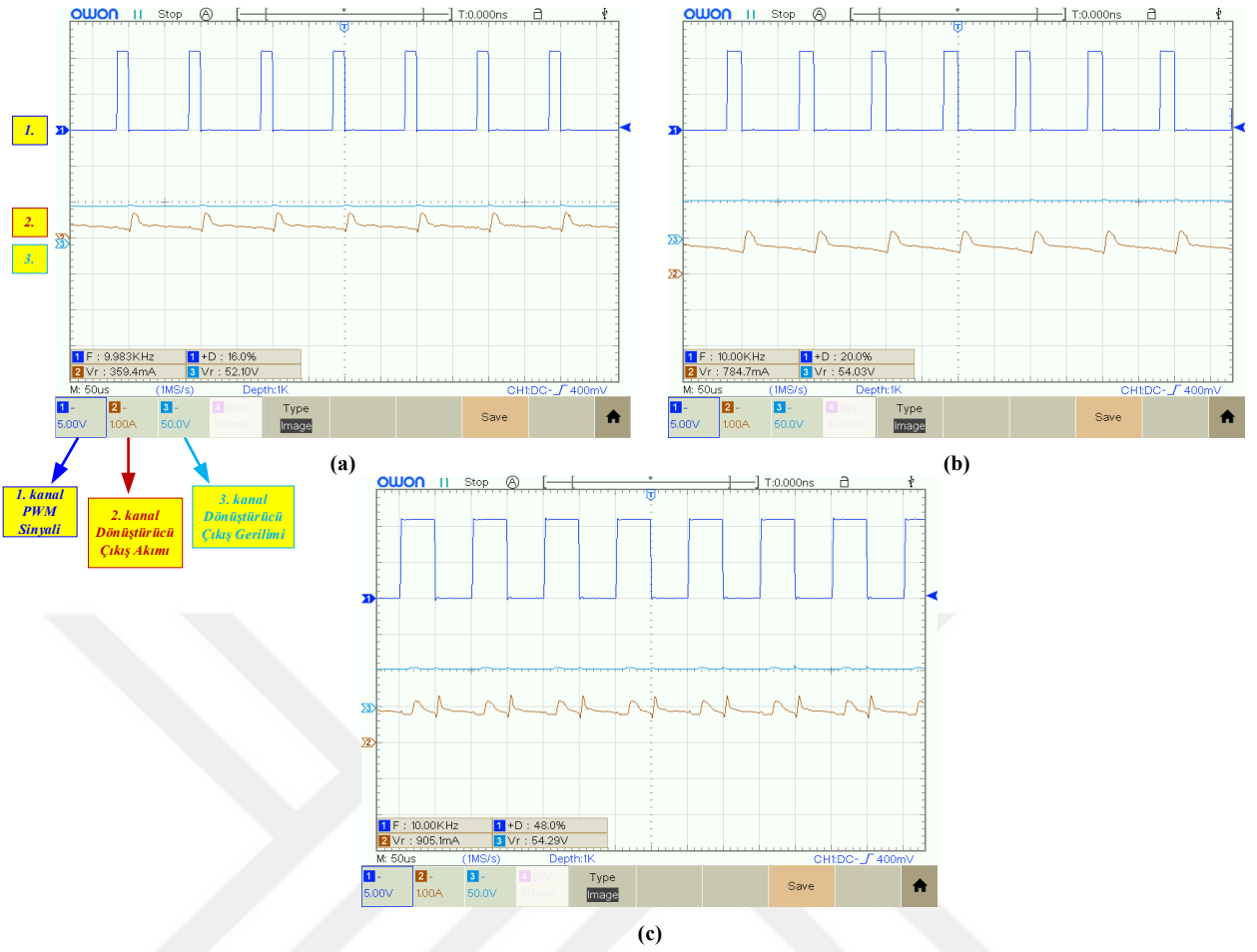
Sert anahtarlama tekniğinin uygulandığı geleneksel SEPIC dönüştürücünün çıkış akım ve gerilim değerlerine bakılarak çıkış gücü hesaplanmış ve FV simülatörden elde edilen maksimum giriş gücü değeriyle oranlanarak verim hesabı yapılmıştır. Dönüştürücüye ait çıkış akım ve gerilim osiloskop yardımıyla ölçülmüştür. Sonuçlar 40 – 70 – 100 W için Şekil 6-13’te gösterilmiştir



Şekil 6-12. P&O MPPT ve sert anahtarlama koşullarında (a) 40W, (b) 70W ve (c) 100W için anahtar akım ve gerilimi

Tablo 6-1: Sert anahtarlama koşullarına ait uygulama sonuçları

| Güç<br>(W) | MPPT<br>Verimi<br>(%) | $I_{s(rms)}$<br>(A) | $V_{ds(rms)}$<br>(V) | $I_{o(rms)}$<br>(A) | $V_{o(rms)}$<br>(V) | Görev<br>Döngüsü<br>(%) | Frekans<br>(kHz) | Sistem<br>Verimi<br>(%) |
|------------|-----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|
| 40         | 99,99                 | 3,971               | 43,64                | 0,359               | 52,10               | 15                      | 10               | 46,75                   |
| 50         | 98,80                 | 4,635               | 44,13                | 0,517               | 52,23               | 17                      | 10               | 54,00                   |
| 60         | 99,99                 | 5,220               | 44,72                | 0,665               | 53,41               | 18                      | 10               | 59,19                   |
| P&O 70     | 98,57                 | 5,687               | 45,16                | 0,784               | 54,03               | 21                      | 10               | 60,51                   |
| 80         | 98,75                 | 5,683               | 53,41                | 0,883               | 54,19               | 39                      | 10               | 59,81                   |
| 90         | 98,89                 | 6,111               | 54,10                | 0,852               | 54,29               | 45                      | 10               | 51,39                   |
| 100        | 99,00                 | 6,777               | 54,50                | 0,905               | 54,29               | 48                      | 10               | 49,13                   |



Şekil 6-13. P&O MPPT ve sert anahtarlama koşullarında (a) 40W, (b) 70W ve (c) 100W için dönüştürücü çıkış akımı ve gerilimi

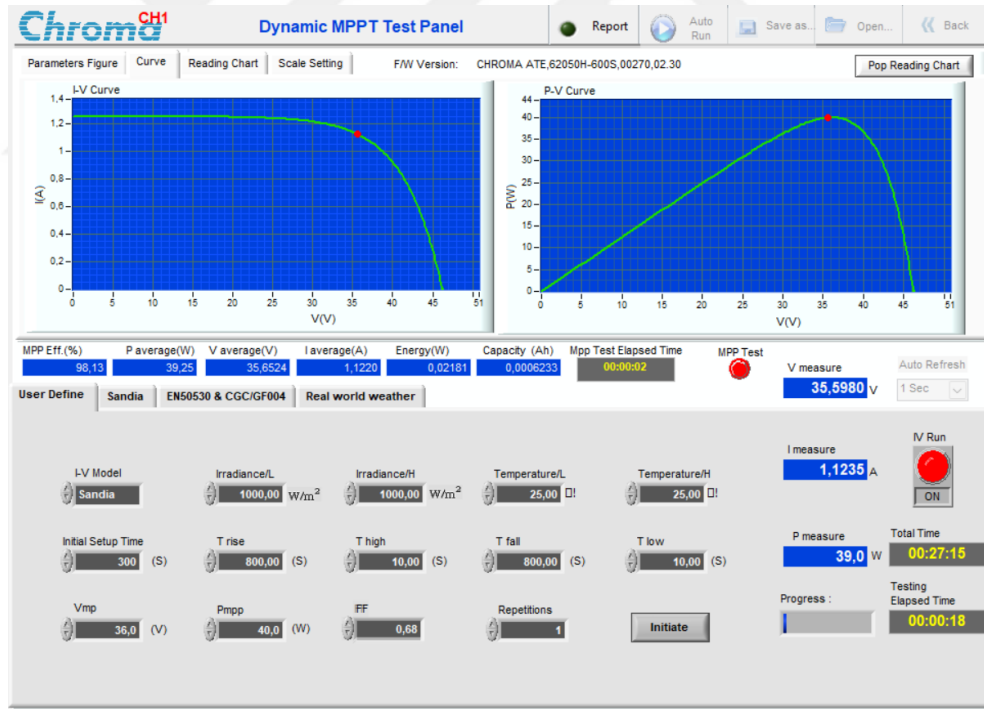
Geleneksel SEPIC dönüştürücünün P&O algoritması uygulanarak sert anahtarlama koşullarında uygulama çalışmasına ait sonuçlar Tablo 6-1’de verilmiştir. Osiloskoptan alınan sonuçlar incelendiğinde sert anahtarlama koşullarında anahtarlama kayıplarının olduğu gözlemlenmiştir. Anahtarlama kayıpları dönüştürücü verimini düşürmektedir.

Alınan sonuçlar P&O MPPT ve sert anahtarlama benzetim sonuçları ile karşılaştırıldığında MPPT verimi açısından uygulama çalışmasında da başarı sağlandığı ve maksimum gücün %99,14 verimle başarılı şekilde takip edildiği gözlemlenmiştir. Anahtar akım-gerilimi ve dönüştürücü çıkış akımı-gerilimi değerleri benzetim çalışmalarında alınan sonuçlar ile yakın değerlerdedir.

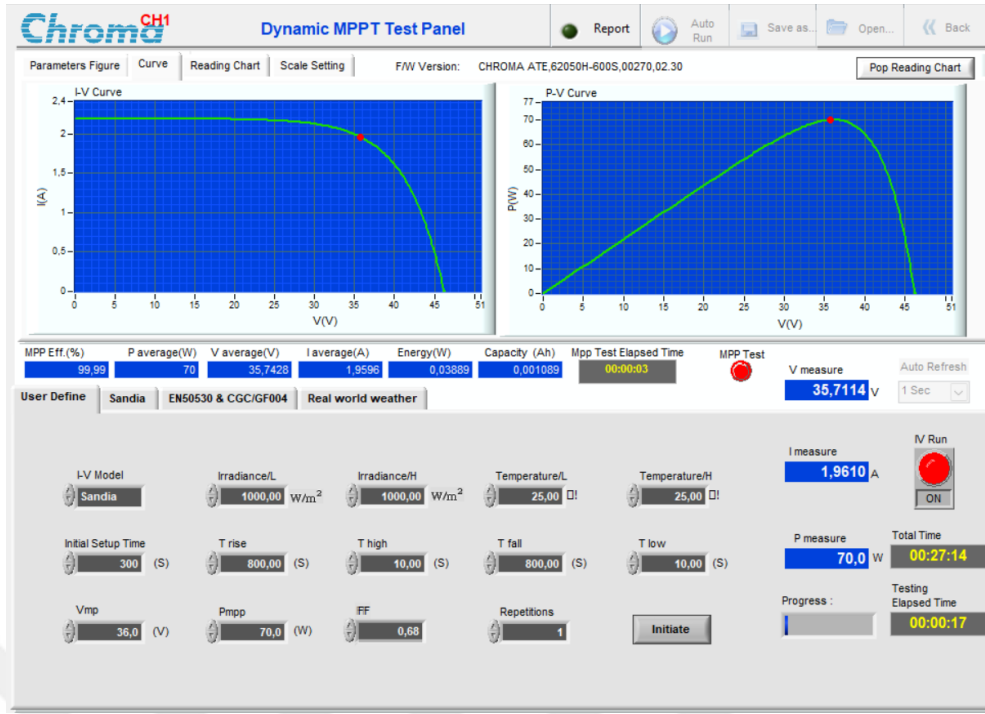
Dönüştürücü verimi benzetim çalışmaları ile kıyaslandığında ise uygulama aşamasında devre elemanlarının ideal olmamasına bağlı olarak benzetim sonuçlarına göre çok düşük değere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Uygulama çalışmalarında sert anahtarlama koşulları için dönüştürücü verimi ortalama %54,11’dir.

### 6.3.2. P&O MPPT ve Yumuşak Anahtarlama Uygulama Sonuçları

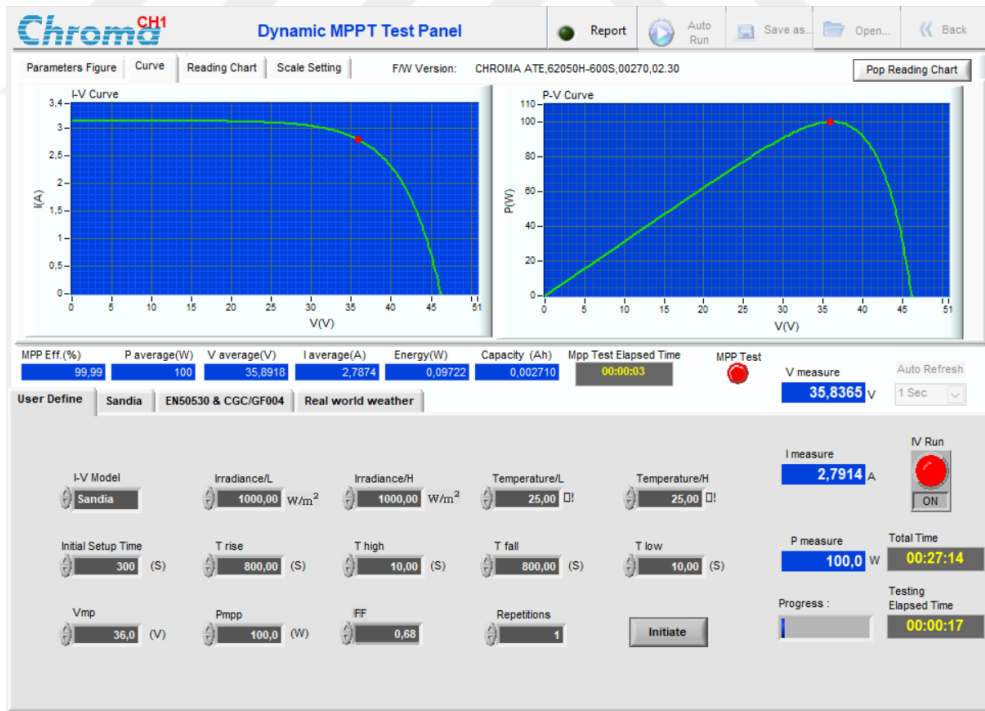
Tasarlanan ve uygulaması gerçekleştirilen sistemde ikinci aşamada geleneksel SEPIC dönüştürücü topolojisine rezonans devresi (rezonans bobini ve kondansatörü) eklenerek ZVS SEPIC dönüştürücü oluşturulmuştur ve yumuşak anahtarlama tekniği ile çalışma gerçekleştirilmiştir. MPPT'nin sağlanabilmesi için ise PI denetleyici ile P&O birlikte kullanılmıştır. MPPT tabanlı batarya şarj işleminin yumuşak anahtarlama koşullarında gerçekleştirilebilmesi için gereken program kodları hazırlanıp sisteme uygulanmıştır. Sert anahtarlama olduğu gibi FV simülatöre ait güneş ışınımı değeri  $1000 \text{ W/m}^2$ , sıcaklık değeri  $25^\circ\text{C}$  ve maksimum güç noktasındaki gerilim değeri ( $V_{MPP}$ )  $36 \text{ V}$ 'tur.  $40 - 50 - 60 - 70 - 80 - 90 - 100 \text{ W}$  olacak şekilde farklı güç değerleri sırasıyla sisteme uygulanmıştır.  $40 - 70 - 100 \text{ W}$  güç değerleri için MPPT verimi, anahtarın akım ve gerilim dalga formları, diyot akım ve gerilim dalga formları ve sistem verimine ait sonuçlar verilmiştir. Şekil 6-14, Şekil 6-15 ve Şekil 6-16'da MPPT testlerine ait CHROMA arayüzü sonuçlarını gösterilmektedir.



Şekil 6-14: P&O MPPT ve yumuşak anahtarlama koşullarında 40W için güç takibi



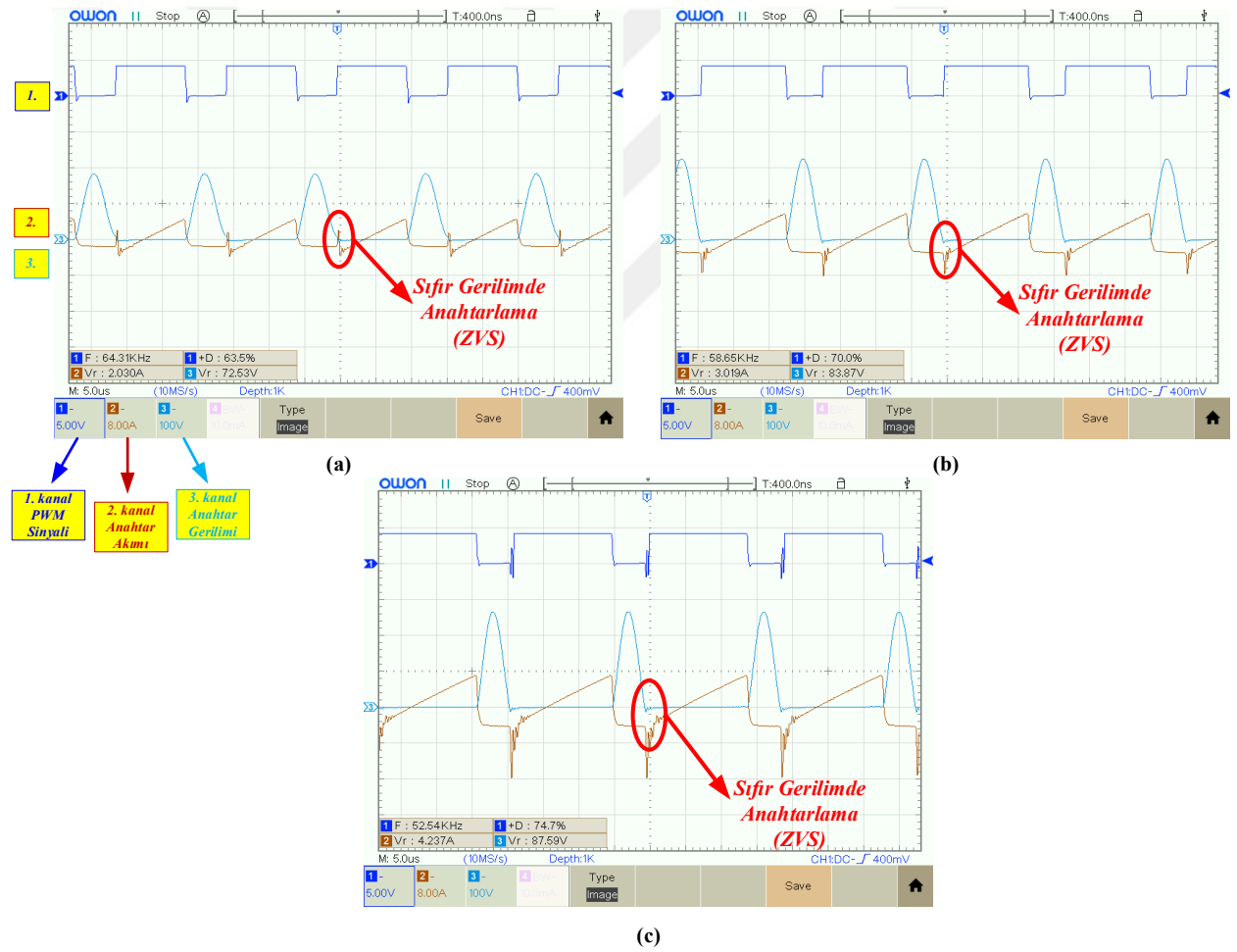
Şekil 6-15: P&O MPPT ve yumuşak anahtarlama koşullarında 70W için güç takibi



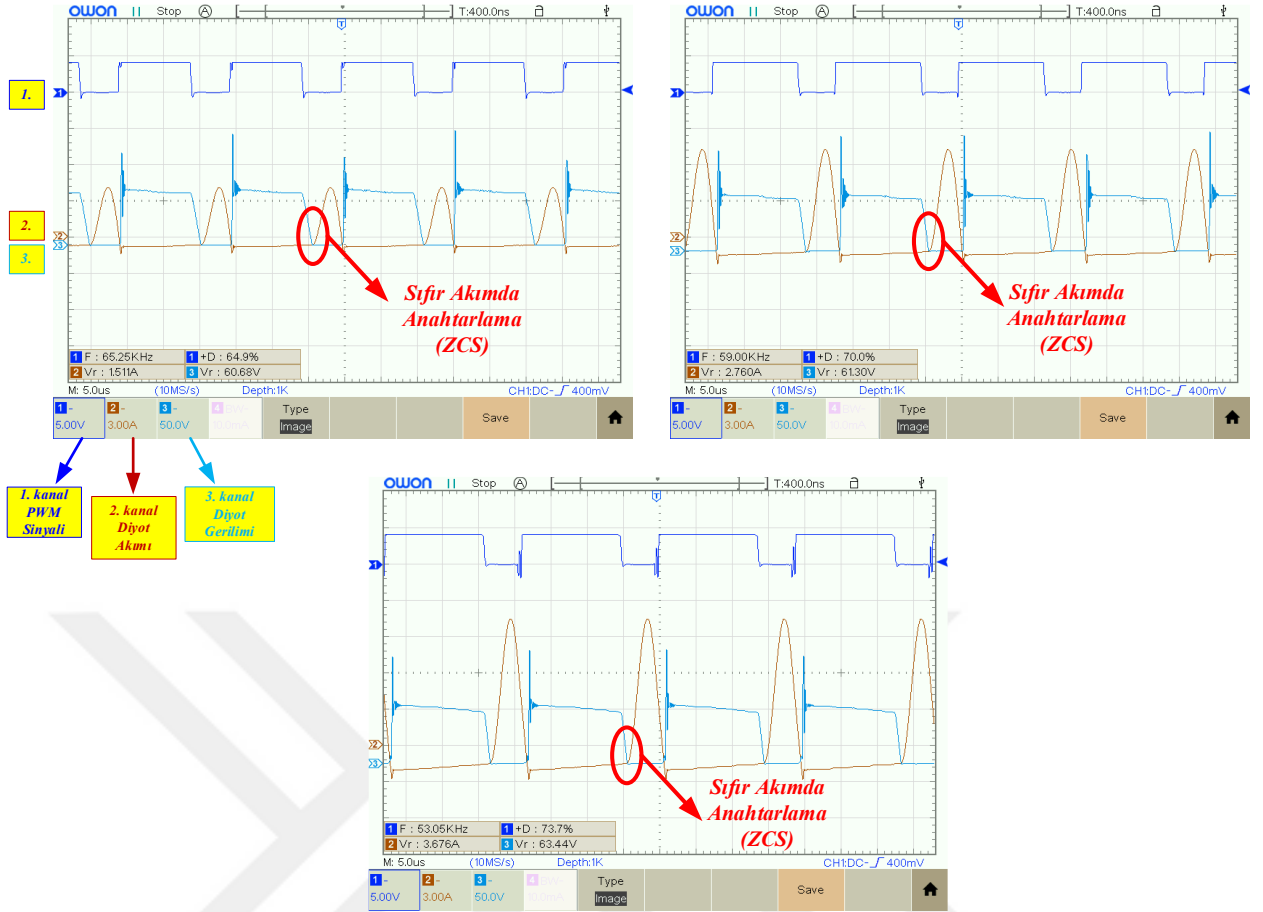
Şekil 6-16: P&O MPPT ve yumuşak anahtarlama koşullarında 100W için güç takibi

Yumuşak anahtarlama tekniği ile çalışmada CHROMA arayüzüne ait şekiller incelendiğinde, sisteme uygulanan güç değeri arttıkça panele ait akım değerinin de arttığı ve sistemin ortalama %99,65 verimle maksimum güç noktasını takip ettiği gözlemlenmiştir.

ZVS SEPIC dönüştürücünün yumuşak anahtarlama koşullarında P&O MPPT algoritması tabanlı çalışmasında devrede kullanılan yarı iletken anahtara ait akım ve gerilim değerleri osiloskop yardımıyla ölçülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS) şartının sağlandığı gözlemlenmiştir ve 40 – 70 – 100 W değerleri için osiloskop görüntüleri Şekil 6-17’de gösterilmiştir. Diyota ait akım ve gerilim ölçümleri de yapılarak sıfır akımda anahtarlama (ZCS) şartının da sağlandığı gözlemlenmiştir ve 40 – 70 – 100 W güç değerleri için osiloskop görüntüleri Şekil 6-18’de gösterilmiştir.



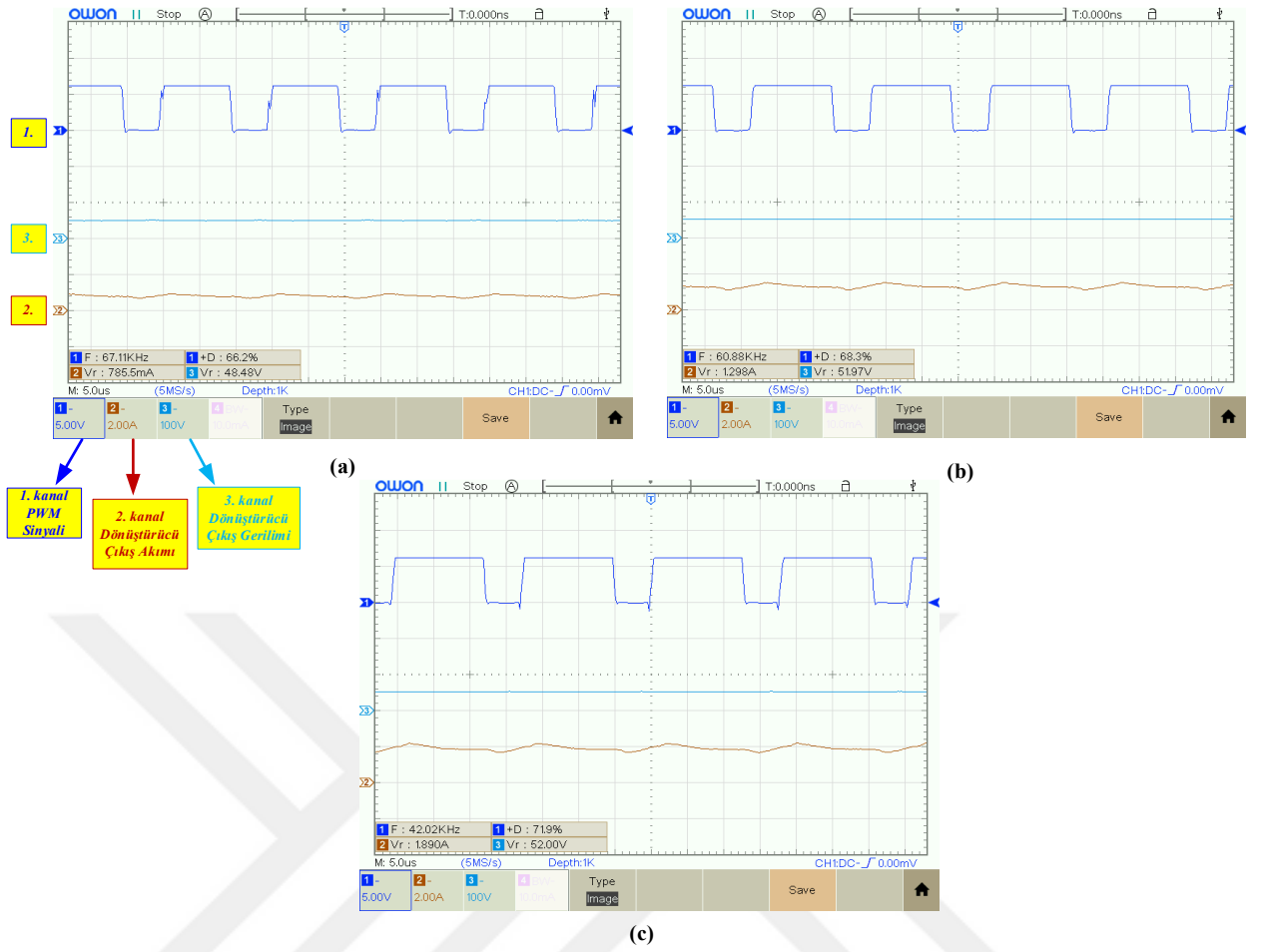
Şekil 6-17: P&O MPPT ve yumuşak anahtarlama koşullarında (a) 40W, (b) 70W ve (c) 100W için anahtar akım ve gerilimi



Şekil 6-18: P&O MPPT ve yumuşak anahtarlama koşullarında (a) 40W, (b) 70W ve (c) 100W için diyot akım ve gerilimi

Anahtara ait akım ve gerilim sonuçları incelendiğinde yumuşak anahtarlama tekniği ile ZVS işleminin gerçekleştirildiği ve dolayısıyla anahtarlama kayıplarının büyük ölçüde azaltıldığı gözlemlenmiştir. Bu durumda sistem verimi incelenerek FV simülatör ile elde edilen maksimum gücün istenilen değer ve verimde bataryaya aktarılması sağlanmıştır.

Yumuşak anahtarlama tekniğinin uygulandığı ZVS SEPIC dönüştürücünün çıkış akım ve gerilim değerlerine bakılarak çıkış gücü hesaplanmış ve FV simülatörden elde edilen maksimum giriş gücü değeriyle oranlanarak verim hesabı yapılmıştır. Dönüştürücüye ait çıkış akım ve gerilim ölçümleri 40 – 70 – 100 W değerleri için Şekil 6-19’da gösterilmiştir. Uygulama çalışmalarında yumuşak anahtarlama koşulları için dönüştürücü verimi ortalama %96,41’dir.

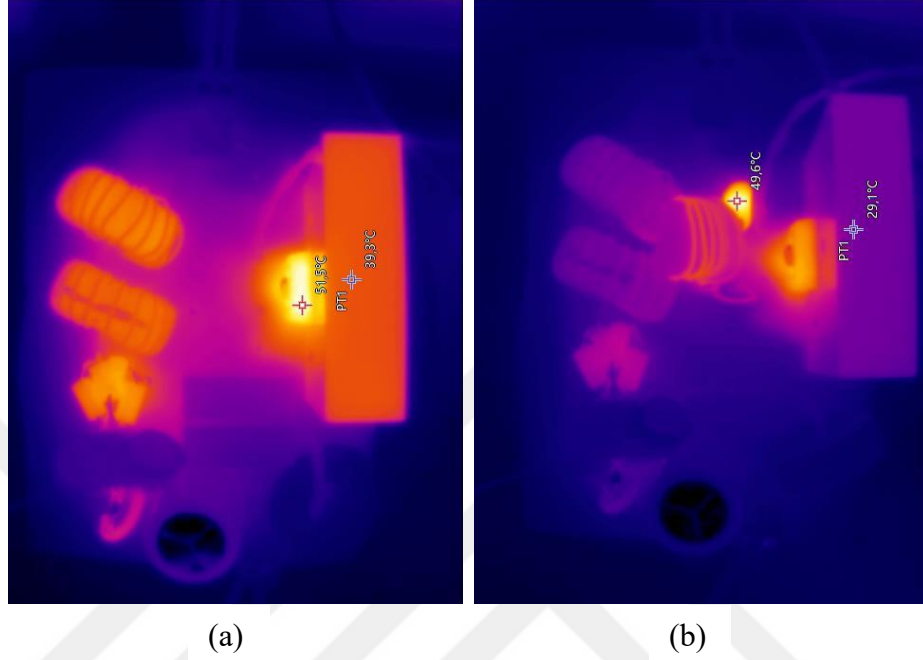


**Tablo 6-2:** Yumuşak anahtarlama koşullarına ait uygulama sonuçları

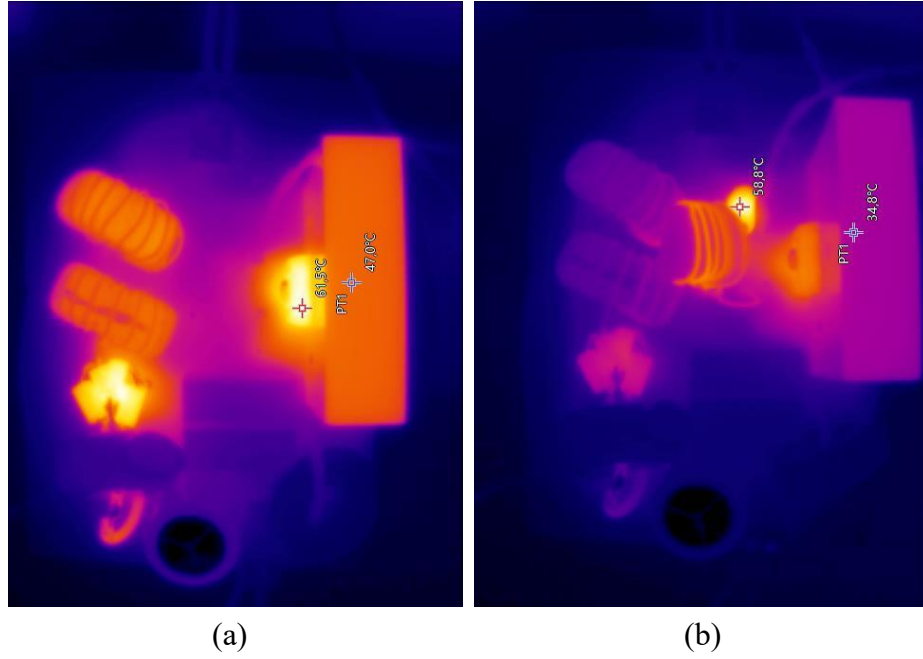
|                | Güç<br>(W) | MPPT<br>Verimi<br>(%) | $I_{s(rms)}$<br>(A) | $V_{ds(rms)}$<br>(V) | $I_{o(rms)}$<br>(A) | $V_{o(rms)}$<br>(V) | Görev<br>Döngüsü<br>(%) | Frekans<br>(kHz) | Sistem<br>Verimi<br>(%) |
|----------------|------------|-----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|
| <b>P&amp;O</b> | 40         | 98,13                 | 2,030               | 72,53                | 0,785               | 48,48               | 63,50                   | 64,31            | 95,14                   |
|                | 50         | 99,50                 | 2,283               | 76,77                | 0,962               | 49,35               | 63,70                   | 62,79            | 94,94                   |
|                | 60         | 99,99                 | 2,629               | 80,79                | 1,099               | 51,29               | 69,10                   | 60,70            | 93,94                   |
|                | 70         | 99,99                 | 3,019               | 83,87                | 1,298               | 51,97               | 70,00                   | 58,65            | 96,36                   |
|                | 80         | 99,99                 | 3,492               | 83,09                | 1,505               | 52,00               | 71,20                   | 56,66            | 97,82                   |
|                | 90         | 99,99                 | 3,898               | 83,92                | 1,710               | 52,00               | 72,10                   | 54,64            | 98,80                   |
|                | 100        | 99,99                 | 4,237               | 87,59                | 1,890               | 52,00               | 74,70                   | 52,54            | 98,28                   |



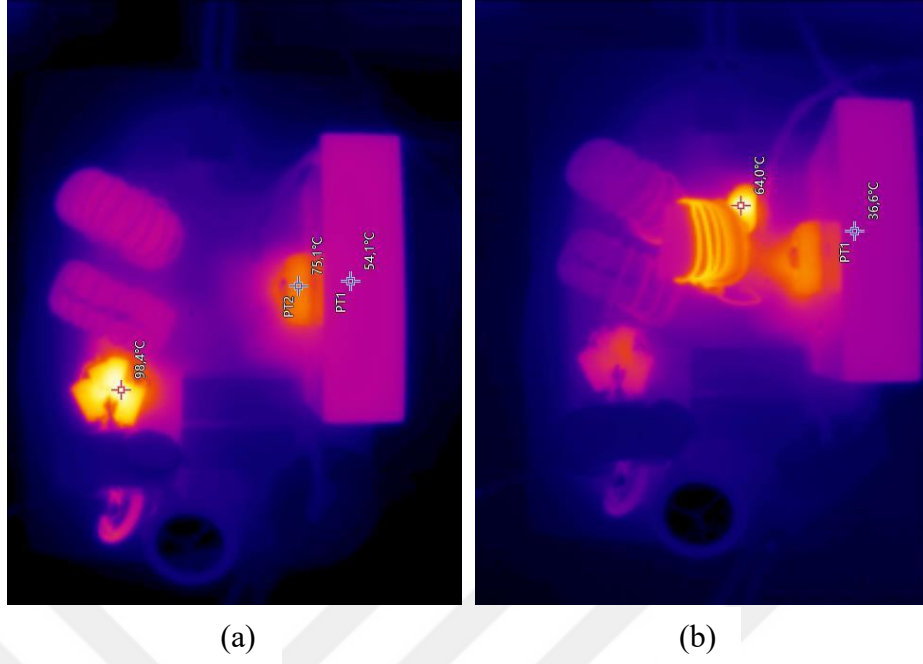
Termal analizör ile alınan sonuçlar 40 – 70 – 100 W güç değerleri için sırasıyla ve bu değerlerde sert anahtarlama ve yumuşak anahtarlama görüntüleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Termal analizöre ait sonuçlar Şekil 6-21, Şekil 6-22 ve Şekil 6-23'te gösterilmiştir.



Şekil 6-21: 40W için termal analizör sonuçları (a) Sert anahtarlama ve (b) yumuşak anahtarlama



Şekil 6-22: 70W için termal analizör sonuçları (a) Sert anahtarlama ve (b) yumuşak anahtarlama



**Şekil 6-23:** 100W için termal analizör sonuçları (a) Sert anahtarlama ve (b) yumuşak anahtarlama

**Tablo 6-3:** Sert anahtarlama ve yumuşak anahtarlama için termal analizör sonuçları

| Anahtarlama Elemanı Sıcaklığı |                  |                     |
|-------------------------------|------------------|---------------------|
|                               | Sert Anahtarlama | Yumuşak Anahtarlama |
| Güç (W)                       | Sıcaklık (°C)    | Sıcaklık (°C)       |
| 40                            | 39,3             | 29,1                |
| 50                            | 41,5             | 30,4                |
| 60                            | 44,1             | 34,4                |
| 70                            | 47,0             | 34,8                |
| 80                            | 48,7             | 35,1                |
| 90                            | 50,0             | 35,8                |
| 100                           | 54,1             | 36,6                |
| Ortalama                      | 46,37            | 33,74               |

## 7. SONUÇLAR

Günümüzde dünya üzerinde enerji ihtiyacının büyük bir çoğunluğu fosil yakıt kaynakları tarafından karşılanmaktadır. Bu kaynakların çevreye vermiş olduğu zararlar ve sınırlı miktarda oldukları düşünüldüğünde farklı enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. YEK'ler çevreci ve sınırsız olmaları yönüyle fosil yakıt kaynaklarına en iyi alternatiftir. Güneş enerjisi yaygın olarak kullanılan YEK'ler arasındadır. Güneş enerjisinin kullanıldığı sistemlere elektrikli araçlar, tarımda sulama sistemleri ve ısıtma sistemleri örnek verilebilir.

Bu tez çalışmasında, MPPT tabanlı hafif elektrikli araç batarya şarj sistemi tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. İlk olarak sistemin doğruluğunu test etmek için PSIM programı ile benzetimi yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında 36 hücreli iki adet seri bağlı FV panel giriş kaynağı olarak oluşturulmuştur. Sisteme FV panel ile uygulanan maksimum güç değeri 100 W'tır. FV panel gerilimi 34 V'tur ve FV panel akımı güç değerine göre değişmektedir. FV panel ile elde edilen maksimum gücün sürekliliğinin sağlanması için P&O ve IC MPPT algoritmaları PI denetleyici ile kullanılmıştır.

Panelden elde edilen maksimum gücün EA bataryasına aktarılabilmesi için ise SEPIC DA-DA dönüştürücü topolojisi tercih edilmiştir. SEPIC dönüştürücü topolojisi ilk olarak geleneksel şekliyle tasarlanmış ve sert anahtarlama koşullarında çalıştırılmıştır. Dönüştürücü girişine FV panel ile  $400 - 500 - 600 - 700 - 800 - 900 - 1000 \text{ W/m}^2$  değerlerinde güneş ışınımı uygulanmıştır. Geleneksel topolojiye ait sonuçlar  $400 - 600 - 800 - 1000 \text{ W/m}^2$  değerleri için MPPT verimi, yarı iletken akım-gerilimi ve dönüştürücü çıkış akım-gerilimi şeklinde gösterilmiştir.

Sonuçlara bakıldığında P&O algoritması için MPPT veriminin ortalama %99,73 ve IC algoritması için MPPT veriminin %99,75 olduğu gözlemlenmiştir. Sert anahtarlama koşullarında her iki algoritma MPPT'yi başarılı şekilde gerçekleştirmiştir. Geleneksel SEPIC dönüştürücüye ait verim ise P&O algoritması için ortalama %98,91 ve IC algoritması için ortalama %98,88'dir. Benzetim çalışmalarında devre elemanları ideal kabul edildiğinden dönüştürücü verimi yüksek çıkmıştır. Benzetimi yapılan sistem için gerçek koşullar altında laboratuvar ortamında da çalışma gerçekleştirilmiştir ve ideal olmayan şartlar için dönüştürücü veriminin sert anahtarlama koşullarında oluşan anahtarlama kayıpları ve dönüştürücüdeki kayıplara bağlı olarak düştüğü gözlemlenmiştir.

Benzetim çalışmalarının ikinci aşamasında geleneksel SEPIC dönüştürücü devresine rezonans bobini ve kondansatöründen oluşan rezonans devresi eklenerek ZVS SEPIC dönüştürücü

devresi tasarlanmıştır. Geleneksel SEPIC topolojisinde olduğu gibi bu defa yumuşak anahtarlama koşullarında P&O ve IC MPPT algoritmaları için çalışma yapılmıştır. Dönüştürücü girişine aynı şekilde FV panel ile  $400 - 500 - 600 - 700 - 800 - 900 - 1000 \text{ W/m}^2$  değerlerinde güç uygulanmıştır. ZVS SEPIC topolojisine ait sonuçlar  $400 - 600 - 800 - 100 \text{ W/m}^2$  değerleri için MPPT verimi, yarı iletken akım-gerilimi ve dönüştürücü çıkış akım-gerilimi şeklinde gösterilmiştir. Yumuşak anahtarlama koşullarında çalışmaya ait yarı iletken anahtar akım ve gerilim dalga formları incelendiğinde ZVS şartlarının oluşturulduğu ve anahtar geriliminin sinüzoidal formda olması sağlanarak anahtarın kesimde olduğu sürede çalışma gerçekleştirilmiştir. Böylelikle anahtarlama kayıpları büyük ölçüde azaltılmıştır.

Sonuçlara bakıldığında yumuşak anahtarlama koşulları için P&O ve IC algoritmalarının her ikisi için de MPPT verimi %99,81 olarak gözlemlenmiştir. Her iki algoritma ile de MPPT başarıyla gerçekleştirilmiştir. ZVS SEPIC dönüştürücü verimi P&O algoritması için ortalama %99 ve IC algoritması için ortalama %98,99'dur. Benzetim sonuçları ile elde edilen bu değerin doğruluğu uygulama çalışması ile test edilmiştir.

Deneysel çalışmalarda, benzetim çalışmalarında olduğu gibi ilk olarak geleneksel SEPIC dönüştürücü topolojisi ile sert anahtarlama koşullarında çalışma yapılmıştır. Ardından devreye rezonans elemanları eklenerek yumuşak anahtarlama koşullarında uygulama yapılmıştır. Her iki anahtarlama yöntemi için de P&O MPPT algoritması PI denetleyici ile uygulanarak sonuçlar alınmıştır.

Dönüştürücü giriş kaynağı olarak FV simülatör kullanılmıştır. FV simülatör ile devreye  $40 - 50 - 60 - 70 - 80 - 90 - 100 \text{ W}$  değerlerinde güç uygulanmıştır. FV simülatörden alınan akım sinyali akım sensörü ve gerilim sinyali gerilim bölücü devresi ile ölçülerek P&O algoritması için giriş değeri olarak kullanılmıştır. Algoritmaya ait program kodu hazırlanmıştır ve DSP mikrodenetleyici kullanılarak PWM sinyali oluşturulmuştur. PWM sinyali yarı iletken anahtarın sürülmesini sağlamak üzere kontrol katındaki sürücü entegreye uygulanmış ve entegrenin çıkışından güç katında bulunan anahtarın kapı (gate) ucuna verilmiştir. Böylelikle dönüştürücü devresi çalıştırılmış ve 48 V EA bataryası şarj edilmiştir.

Deneysel çalışmalara ait sonuçlar  $40 - 70 - 100 \text{ W}$  güç değerleri için gösterilmiştir. Sert anahtarlama koşullarında sonuçlar MPPT verimi, yarı iletken anahtar akım-gerilimi ve dönüştürücü çıkış akımı-gerilimi için alınmıştır. Sonuçlar incelendiğinde sert anahtarlama koşulları için MPPT veriminin ortalama %99,14 ve dönüştürücü veriminin ortalama %54,11 olduğu gözlemlenmiştir.

Yumuşak anahtarlama koşullarından sonuçlar MPPT verimi, yarı iletken anahtar akım-gerilimi, diyot akımı-gerilimi ve dönüştürücü çıkış akımı-gerilimi için alınmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde MPPT veriminin ortalama %99,65 ve dönüştürücü veriminin ortalama %96,41 olduğu gözlemlenmiştir.

Deneysel çalışmalara ait osiloskop görüntüleri incelendiğinde sert anahtarlama koşullarında anahtarlama kayıplarının olduğu ve bu duruma bağlı olarak dönüştürücü veriminin düştüğü gözlemlenmiştir.

Yumuşak anahtarlama koşullarında anahtar akım-gerilimi incelendiğinde ZVS'nin ve diyot akım-gerilimi incelendiğinde ise ZCS'nin sağlandığı gözlemlenmiştir. Böylelikle anahtarlama kayıplarının büyük ölçüde azaltıldığı ve dönüştürücü veriminin artırılarak güneş enerjisinden elde edilen maksimum gücün yüksek verimle EA araç bataryasına aktarılması sağlanmıştır.

Deneysel çalışmalara ek olarak, anahtarlama kayıplarının yarı iletken anahtar üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek adına termal analizör yardımıyla sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Alınan sonuçlara göre sert anahtarlama koşullarında anahtar üzerindeki sıcaklığın ortalama 46,37 °C iken yumuşak anahtarlama koşullarında ortalama 33,74 °C olduğu gözlemlenmiştir. Termal analizör ile alınan sonuçlara incelendiğinde yarı iletken anahtar hariç diğer devre elemanlarında da ısınma meydana geldiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu elemanlar üzerinde de kayıplar meydana geleceğinden sistem verimini düşüren etkenler arasında sayılmaktadır. Bunun yanında sıcaklık ölçümü yalnızca yarı iletken anahtar için alınmıştır ve karşılaştırma iki anahtarlama yöntemi için de yarı iletken anahtar açısından yapılmıştır. Sonuçta anahtarlama kayıplarının anahtar üzerinde ısınmaya sebep olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında, hafif EA batarya şarj sistemi için bir dönüştürücü tasarımı yapılmıştır. Benzetim ve uygulama çalışmalarına ait sonuçlar karşılaştırıldığında maksimum güç noktası takibinin benzetim çalışmalarında olduğu gibi uygulama çalışmalarında da başarıyla gerçekleştirildiği ve dolayısıyla tasarımın doğrulandığı gözlemlenmiştir.

Sonuçlara ait tablolar incelendiğinde ise uygulama çalışmalarında elde edilen anahtar akım-gerilim ve dönüştürücü çıkış akımı-gerilimi değerlerinin benzetim çalışmalarında alınan değerlere yakın olduğu ve tasarlanan sistemin uygulanabilirliği tespit edilmiştir.

## 8. KAYNAKLAR

- [1] F. Sick and T. Erge, "Photovoltaics in buildings - a design handbook for architects and engineers," p. 280, 1996.
- [2] Z. Özen, L. Arslan, and H. Özbay, "Elektrikli Araçlar için Yenilenebilir Enerji Destekli Akıllı Şarj Sistemleri ve Mobilite," in 3RD International Conference On Intelligent Transportation Systems, Balıkesir, Bandırma, Nov. 2023.
- [3] G. N. Kozhemyakin, Y. N. Bendryshev, and A. V. Churilov, "Photovoltaic effect in metal foils and crystals of topological insulators," *CrystEngComm*, vol. 25, no. 1507, Jan. 2023.
- [4] O. O. Yolcan and R. Köse, "Türkiye'nin Güneş Enerjisi Durumu ve Güneş Enerjisi Santrali Kurulumunda Önemli Parametreler," *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 6, no. 2, pp. 196–215, Dec. 2020, doi: 10.34186/klujes.793471.
- [5] M. Öztürk, B. Çırak, and N. Özek, "Evsel Fotovoltaik Sistemlerin Ömür Boyu Maliyet Analizi," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 18, no. 1, pp. 1–11, Oct. 2012.
- [6] U. BADAĞ and A. B. YILDIZ, "Maksimum Güç Noktası İzleyici Algoritmalarının Verim, Salınım Miktarı ve Yakınsama Süresi Açısından Karşılaştırılması," *European Journal of Science and Technology*, Jan. 2021, doi: 10.31590/ejosat.822975.
- [7] Y. Şahin, İ. Aksoy, and N. Süleyman Tinç, "DC-DC Dönüştürücülerde Kullanılan Yumuşak Anahtarlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması," in *Eleco 2014 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, 2014, pp. 235–238.
- [8] A. Çalışkan, S. Ünal, and A. Orhan, "Buck-Boost Dönüştürücü Tasarımı, Modellenmesi ve Kontrolü," *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 29, no. 2, pp. 265–268, 2017.
- [9] M. Kenar, "Güneş Enerjisi Üretim Sistemleri için DC/DC ve DC/AC Güç Dönüştürücülerinin Tasarımı ve Fuzzy-PI ile Kontrolü," *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 2019.
- [10] H. G. Güleç, "Fotovoltaik Uygulamalarda Arduino Kontrollü Batarya Şarj Uygulaması," *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi, Karabük, 2017.
- [11] D. W. Hart, *Power Electronics*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011.

- [12] M. R. Khalid, I. A. Khan, S. Hameed, M. S. J. Asghar, and J. S. Ro, “A Comprehensive Review on Structural Topologies, Power Levels, Energy Storage Systems, and Standards for Electric Vehicle Charging Stations and Their Impacts on Grid,” 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3112189.
- [13] M. Kumar, K. P. Panda, R. T. Naayagi, R. Thakur, and G. Panda, “Comprehensive Review of Electric Vehicle Technology and Its Impacts: Detailed Investigation of Charging Infrastructure, Power Management, and Control Techniques,” *Applied Sciences* (Switzerland), vol. 13, no. 15, Aug. 2023, doi: 10.3390/app13158919.
- [14] Z. Özen and T. Engin, “İklim Krizini Önlemede Çevreci Ulaşım Planlaması: Yeşil Ulaşım Uygulamaları,” in 3rd International Conference on Intelligent Transportation Systems, M. Tektaş, Ed., Balıkesir, Nov. 2023, pp. 72–86.
- [15] R. Ayaz and H. Akça, “Fotovoltaik Sistem Entegreli Elektrikli Araç Şarj Sistemlerinde Optimum Kapasitenin Belirlenmesi,” *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, vol. 12, no. 3, pp. 476–487, Sep. 2024, doi: 10.21923/jesd.1448108.
- [16] S. Pareek, S. A. S. Ratra, and R. Kumar, “Electric Vehicle Charging Station Challenges and Opportunities: A Future Perspective,” *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 2020.
- [17] Ş. Küçük, “Batarya Şarj Sistemleri için Güç Dönüştürücüsü Analizi, Tasarımı ve Simülasyonu,” Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2023.
- [18] E. A. Dantondji, “Elektrikli Araçlar için Yüksek Güç Yoğunluklu ve Yüksek Verimli İzole Edilmiş Yerleşik Batarya Şarj Cihazı Tasarım ve Uygulaması,” Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2021.
- [19] T. Duman, “Fotovoltaik Sistemler için Modüler Yumuşak Anahtarlama SEPIC DC-DC Dönüştürücü Analizi ve Tasarımı,” Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2019.
- [20] F. Aslan, “Fotovoltaik Panel Destekli Batarya Şarj/Deşarj Devresi Tasarımı ve Simülasyonu,” Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, 2019.
- [21] O. Alkul, “Yüksek Frekans Transformatörlü Çift Yönlü DA/DA Dönüştürücü Yardımı ile Batarya Şarj Sistemi Tasarımı,” Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2019.
- [22] E. P. Kesik, “Design and Implementation of a SEPIC Battery Charger for Automotive PV Applications,” M.Sc. Thesis, Istanbul Technical University, Graduate School of Science Engineering and Technology, İstanbul, 2018.

- [23] Ü. C. Özçelik, “Tam Köprü DC-DC Dönüştürücü ile Batarya Şarj Sistemi,” Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2018.
- [24] A. Singh, J. Gupta, and B. Singh, “Design and Control of Two Stage Battery Charger for Low Voltage Electric Vehicles Using High Gain Buck-Boost PFC AC-DC Converter,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 59, no. 5, p. 6125, doi: 10.1109/Se.
- [25] S. Narthana and J. Gnanavadeivel, “Power Quality Analysis of Interleaved Cuk Configuration-Based Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller for Battery Charging in Electric Vehicles,” *Arab J Sci Eng*, vol. 49, no. 5, pp. 6259–6273, May 2024, doi: 10.1007/s13369-023-08189-7.
- [26] C. C. Chan, “The rise & Fall of electric vehicles in 1828-1930: Lessons learned,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 1, pp. 206–212, 2013, doi: 10.1109/JPROC.2012.2228370.
- [27] J. Y. Yong, V. K. Ramachandaramurthy, K. M. Tan, and N. Mithulananthan, “A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 365–385, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.130.
- [28] R. Adany, D. Aurbach, and S. Kraus, “Switching algorithms for extending battery life in Electric Vehicles,” *J Power Sources*, vol. 231, pp. 50–59, 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.12.075.
- [29] R. Menak, T. Karadağ, M. Altuğ, and N. Tan, “Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemleri Üzerine Bir Derleme Çalışması A Review Study On Battery Management Systems In Electric Vehicles,” *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, vol. 8, no. 2, pp. 234–275, 2021, [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujisa/issue/63143/886738>
- [30] H. Özbay, C. Közkurt, A. Dalcalı, and M. Tektaş, “Geleceğin ulaşım tercihi: Elektrikli araçlar,” *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, vol. 3, no. 1, pp. 34–50, Apr. 2020.
- [31] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, and J. M. Marquez-Barja, “A review on electric vehicles: Technologies and challenges,” *Smart Cities*, vol. 4, no. 1, pp. 372–404, Mar. 2021, doi: 10.3390/smartcities4010022.
- [32] M. Y. Kaba, O. Kalkan, and A. Celen, “Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryalar ve Termal Yönetim Sistemlerinin İncelenmesi,” *Konya Journal of Engineering Sciences*, vol. 9, no. 4, pp. 1119–1136, Dec. 2021, doi: 10.36306/konjes.945819.

- [33] Ş. Efe and Z. A. Güngör, “Geçmişten Günümüze Batarya Teknolojisi,” *European Journal of Science and Technology*, Jan. 2022, doi: 10.31590/ejosat.1048673.
- [34] E. Can Güven and K. Gedik, “Ömrünü Tamamlamış Elektrikli Araç Bataryalarının Çevresel Yönetimi,” *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 9, no. 2, pp. 726–737, Jun. 2019, doi: 10.21597/jist.446170.
- [35] E. Balci, G. Gündüz, S. Altundağ, and S. Altın, “Elektrikli Araç Teknolojisinde Kullanılan Kurşun Asit ve Li-iyon Bataryaların Galvanostatik Test Sonuçlarının Karşılaştırılması,” *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 35, no. 2, pp. 691–697, Sep. 2023, doi: 10.35234/fumbd.1306028.
- [36] F. Mohammadi and M. Saif, “A comprehensive overview of electric vehicle batteries market,” *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 3, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.prime.2023.100127.
- [37] A. J. Alrubaie, M. Salem, K. Yahya, M. Mohamed, and M. Kamarol, “A Comprehensive Review of Electric Vehicle Charging Stations with Solar Photovoltaic System Considering Market, Technical Requirements, Network Implications, and Future Challenges,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 10, May 2023, doi: 10.3390/su15108122.
- [38] A. Kerem and H. Gürbak, “Elektrikli Araçlar için Hızlı Şarj İstasyonu Teknolojileri,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 8, no. 3, pp. 644–661, Sep. 2020, doi: 10.29109/gujsc.713085.
- [39] H. Özbay, “Şebeke Etkileşimli Yenilenebilir Enerji Destekli Hızlı Batarya Şarj Sisteminin Gerçekleştirilmesi,” *Doktora Tezi*, Karabük Üniversitesi, Karabük, 2017.
- [40] A. Kılıç, “Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Havalandırılması,” *TÜYAK Yangın Mühendisliği Dergisi*, pp. 28–34, 2017.
- [41] F. Karapınar and F. Dalbalan, “Elektrikli Araçların Şarj Yöntemleri ve Şarj İstasyon Tipleri,” *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 38, no. 3, pp. 549–556, Dec. 2022.
- [42] M. Khalid, F. Ahmad, B. K. Panigrahi, and L. Al-Fagih, “A comprehensive review on advanced charging topologies and methodologies for electric vehicle battery,” *J Energy Storage*, vol. 53, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105084.
- [43] B. Zoroğlu, A. T. Yapıcı, and G. Kurt, “Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Standartları ve Türkiye’deki Elektrikli Araç Durumu,” *Kocaeli*, Dec. 2020. [Online]. Available: [www.imascon.com](http://www.imascon.com)
- [44] M. Karamanav, “Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri,” *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 2007.

- [45] O. Kırıcıoğlu, “Fotovoltaik Sistemlerde Maksimum Güç Noktası İzleyebilen İki Fazlı SEPIC Dönüştürücü Tasarımı ve Uygulaması,” Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 2017.
- [46] S. Özçelik, “Fotovoltaik (PV) Teknolojileri,” Gazi Üniversitesi, Ankara. [Online]. Available: [www.fotonik.gazi.edu.tr](http://www.fotonik.gazi.edu.tr)
- [47] M. Yıldırım, “İlk Güneş Gözesi,” Bilim ve Teknik Dergisi - Tübitak, Ankara, pp. 82–83, 2013.
- [48] K. Ranabhat, L. Patrikeev, A. A. evna Revina, K. Andrianov, V. Lapshinsky, and E. Sofronova, “An introduction to solar cell technology,” Journal of Applied Engineering Science, vol. 14, no. 4, pp. 481–491, 2016, doi: 10.5937/jaes14-10879.
- [49] R. A. Messenger and J. Ventre, Photovoltaic Systems Engineering, 2nd ed. 2004.
- [50] A. Mohammad Bagher, “Types of Solar Cells and Application,” American Journal of Optics and Photonics, vol. 3, no. 5, p. 94, 2015, doi: 10.11648/j.ajop.20150305.17.
- [51] N. Rathore, N. L. Panwar, F. Yettou, and A. Gama, “A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications,” International Journal of Ambient Energy, vol. 42, no. 10, pp. 1200–1217, 2021, doi: 10.1080/01430750.2019.1592774.
- [52] G. Richhariya, A. Kumar, and Samsheer, Eds., Photovoltaic Solar Energy Conversion Technologies, Applications and Environmental Impacts, 1st ed. Academic Press, 2020.
- [53] S. Özçelik, “Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik (CPV) Teknolojisi,” in IV. Ulusal Güneş ve Hidrojen Teknolojileri Kongresi, Eskişehir: Gazi Üniversitesi, May 2014, pp. 13–13.
- [54] S. Duman and M. Alçı, “Yarım ve tam fotovoltaik hücreleri ile tasarlanan güneş enerjisi panellerinin toplam verimliliğini etkileyen parametrelerinin incelenmesi,” Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci, vol. 11, no. 3, pp. 592–600, 2022, doi: 10.28948/ngmuh.1073976.
- [55] L. Arslan and H. Özbay, “Elektrikli araçlar için MPPT tabanlı yüksek verimli batarya şarj sistemi tasarımı,” Journal of Innovative Engineering and Natural Science, vol. 4, no. 1, pp. 11–31, Aug. 2024, doi: 10.61112/jiens.1327688.
- [56] E. İşen and Ö. Koçhan, “Fotovoltaik Panelin Tek Diyotlu Modellenmesi,” Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi, vol. 2, no. 1, pp. 1–10, Nov. 2020.
- [57] R. B. Bollipo, S. Mikkili, and P. K. Bonthagorla, “Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A review,” CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 7, no. 1, pp. 9–33, Jan. 2021, doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.02720.

- [58] E. Kurak, V. Erdemir, and B. Dursun, "PV Sistemin İçin Maksimum Güç Noktası İzleyicisi Tasarımı ve Uygulaması," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 4, no. Doğadan Esinlenen Optimizasyon Algoritmaları ve Optimizasyon Algoritmalarının Optimizasyonu, pp. 293–304, 2016.
- [59] İ. Arhan and Z. Bilgin, "Yenilenebilir Sistemlerde Maksimum Güç Noktası Takibi ve Enerji Yönetimiyle Enerji Verimliliği," *OKU Journal of The Institute of Science and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 75–91, 2022, [Online]. Available: <https://orcid.org/0000-0003-3971-4230>
- [60] N. Onat and S. Ersöz, "Fotovoltaik Sistemlerde Maksimum Güç Noktası İzleyici Algoritmalarının Karşılaştırılması," *V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, pp. 50–56, 2009.
- [61] H. S. Lee and J. J. Yun, "Advanced MPPT algorithm for distributed photovoltaic systems," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 18, Sep. 2019, doi: 10.3390/en12183576.
- [62] N. Altıntaş, A. Yılmaz, A. Demirci, and S. M. Tercan, "Bataryalı PV Sistemlerde Maksimum Güç Noktası Takip Yöntemlerinin Karşılaştırılması," *European Journal of Science and Technology*, Jan. 2021, doi: 10.31590/ejosat.702393.
- [63] Y. E. Keskin, M. E. Başoğlu, İ. G. Tekdemir, and B. Çakır, "Fotovoltaik Sistemlerde Değiştir Gözle ve Artan İletkenlik Algoritmalarının Karşılaştırılması," in *Eleco 2014 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Nov. 2014, pp. 91–95.
- [64] S. Nacar, "PV Sistemler için Yumuşak Anahtarlama Maksimum Güç Noktası İzleyici Tasarımı ve Uygulaması," *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi, Karabük, 2014.
- [65] M. Barrenetxea Iñarra, I. Baraia Zubiaurre, I. Larrazabal Bengoetxea, and I. Zubimendi Azaceta, *Power Electronic Converter Design Handbook*. 2018.
- [66] M. E. Kalçık, "SEPIC Dönüştürücünün Analizi ve Farklı Kontrol Yöntemleri ile Çıkış Geriliminin Denetlenmesi," *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [67] N. Sujitha and S. Krithiga, "Off-board electric vehicle battery charger using PV array," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 10, no. 3, pp. 291–300, 2020, doi: 10.1049/iet-est.2019.0035.
- [68] Muhammad H. Rashid, *Güç Elektroniği*, 4th ed. Nobel Akademik Yayıncılık, 2019.
- [69] E. Çetin et al., "Fotovoltaik Enerji Dönüşüm Sistemlerinde Kullanılabilecek Bir Seri Rezonans İnvörtör Devresinin İncelenmesi," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 10, no. 3, pp. 339–146, 2004.

- [70] Y. Xiong, S. Sun, H. Jia, P. Shea, and Z. John Shen, "New physical insights on power MOSFET switching losses," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 24, no. 2, pp. 525–531, 2009, doi: 10.1109/TPEL.2008.2006567.
- [71] K. H. Liu and F. C. Lee, "Resonant Switches - A Unified Approach To Improve Performance of Switching Converters," in *INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings)*, IEEE, 1984, pp. 344–351. doi: 10.1109/intlec.1984.4794149.
- [72] K. H. Liu, R. Oruganti, and F. C. Y. Lee, "Quasi-Resonant Converters—Topologies and Characteristics," *IEEE Trans Power Electron*, vol. PE-2, no. 1, pp. 62–71, 1987, doi: 10.1109/TPEL.1987.4766333.
- [73] C. P. Henze, H. C. Martin, and D. W. Paraley, "Zero-Voltage Switching in High Frequency Power Converters Using Pulse Width Modulation," in *APEC '88 Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, New Orleans, 1988, pp. 33–40.
- [74] A. Raj, S. R. Arya, and J. Gupta, "Solar PV array-based DC–DC converter with MPPT for low power applications," *Renewable Energy Focus*, vol. 34, pp. 109–119, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.ref.2020.05.003.
- [75] O. Akalp, H. Ozbay, and S. B. Efe, "Design and analysis of high-efficient driver model for led luminaires," *Light and Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 96–106, 2021, doi: 10.33383/2021-012.

## ÖZGEÇMİŞ

| Kişisel Bilgiler |  |
|------------------|--|
| Adı Soyadı       |  |
| Doğum Yeri       |  |
| Doğum Tarihi     |  |
| Uyruğu           |  |
| Telefon          |  |
| E-Posta Adresi   |  |
| Web Adresi       |  |

|                | Eğitim Bilgileri |
|----------------|------------------|
|                | Lisans           |
| Üniversite     |                  |
| Fakülte        |                  |
| Bölümü         |                  |
| Mezuniyet Yılı |                  |

| Yüksek Lisans |  |
|---------------|--|
| Üniversite    |  |
| Enstitü Adı   |  |
| Anabilim Dalı |  |
| Programı      |  |

| Makale ve Bildiriler |
|----------------------|
|                      |