

**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KRİTİK ALT SİSTEMLERİN GÜÇ KAYNAĞI İÇİN GÜNEŞ ENERJİLİ İZOLE  
DC-DC FLYBACK KONVERTÖR TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Serhat ÖZKÜÇÜK**

**Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**OCAK 2019**



**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KRİTİK ALT SİSTEMLERİN GÜÇ KAYNAĞI İÇİN GÜNEŞ ENERJİLİ İZOLE  
DC-DC FLYBACK KONVERTÖR TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Serhat ÖZKÜÇÜK  
(171083509)**

**Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Songül AKBULUT ÖZEN**

**OCAK 2019**

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 171083509 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Serhat ÖZKÜÇÜK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "KRİTİK ALT SİSTEMLERİN GÜÇ KAYNAĞI İÇİN GÜNEŞ ENERJİLİ İZOLE DC-DC FLYBACK KONVERTÖR TASARIMI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Doç. Dr. Songül AKBULUT ÖZEN** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Dr. Öğr. Üyesi Turgut ÖZTÜRK** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi M. Tahir GÜNEŞER** .....  
Karabük Üniversitesi

**Savunma Tarihi :** 14 Ocak 2019

**FBE Müdürü :** **Doç. Dr. Murat ERTAŞ** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi ...../...../.....

## İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Serhat ÖZKÜÇÜK

İmzası :

X X X X X



*Aileme,*

## ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım süresince, başta altyapı olmak üzere sunduğu uygun çalışma ortamı ve imkanlardan dolayı bununla birlikte 172L08 numaralı bilimsel araştırma projesi kapsamında çalışmamızı desteklediği için personeli ve öğrencisi olduğum Bursa Teknik Üniversitesi'ne, bu süreçte desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Songül Akbulut Özen'e çok teşekkür ederim. Bu yorucu çalışma sürecinde manevi desteklerinden ötürü çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Ali Hüsnü Bademlioğlu ve Arş. Gör. Sevde Aydođdu'ya ayrıca teşekkür ederim.

Ocak 2019

Serhat Özküçük

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
KISALTMALAR .....	vii
SEMBOLLER .....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	ix
ŞEKİL LİSTESİ .....	x
ÖZET .....	xi
SUMMARY .....	xii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	3
1.2 Genel Bilgiler .....	5
1.2.1 Flyback konvertör .....	5
1.2.2 Yükseltici (boost) konvertör .....	6
<b>2. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>8</b>
2.1 Teorik Model .....	8
2.1.1 Flyback konvertör parametrelerinin teorik analizi .....	9
2.1.2 Hibrit elektrolit-süper kondansatör depolama birimi teorik analizi .....	12
2.1.3 Yükseltici konvertör parametrelerinin teorik analizi .....	14
2.2 Sistem (Simulasyon) Modeli .....	15
2.3 Elektronik Modül .....	17
<b>3. ÇIKTILAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>18</b>
3.1 Simulasyon Çıktıları .....	18
3.2 Deneysel Çıktılar .....	20
<b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>23</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>25</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>28</b>



## **KISALTMALAR**

<b>AC</b>	: Alternating Current
<b>AWG</b>	: American Wire Gauge
<b>DC</b>	: Direct Current
<b>EDLC</b>	: Electrical Double-Layer Capacitors
<b>LED</b>	: Light Emitting Diode
<b>MPPT</b>	: Maximum Power Point Tracking
<b>NTC</b>	: Negative Temperature Coefficient
<b>PI</b>	: Proportional-Integral
<b>PV</b>	: Photovoltaic
<b>RMS</b>	: Root Mean Square
<b>UPS</b>	: Uninterruptible Power Supply

## SEMBOLLER

<b>A<sub>e</sub></b>	: Kesit alanı
<b>aux</b>	: Transformatör yardımcı sargısı (auxiliary)
<b>B</b>	: Manyetik akı yoğunluğu
<b>C</b>	: Kondansatörünün kapasitansı
<b>cap</b>	: Kondansatör (capacitor)
<b>charge</b>	: Şarj
<b>cp</b>	: Anahtarlama periyodu (clock period)
<b>D</b>	: İşlem döngüsü (duty cycle)
<b>diode</b>	: Diyot
<b>E</b>	: Kondansatörün enerjisi
<b>elektrolit</b>	: Elektrolit kondansatör bloğu
<b>f</b>	: Frekans
<b>I</b>	: Akım
<b>in</b>	: Giriş
<b>L</b>	: İndüktans, indüktör
<b>load</b>	: Yük
<b>max</b>	: Maksimum
<b>min</b>	: Minimum
<b>N</b>	: Sargı sarım sayısı, anahtarlama periyot sayısı
<b>n</b>	: Sarım oranı
<b>out</b>	: Çıkış
<b>P</b>	: Güç
<b>pri</b>	: Transformatör giriş tarafı sargısı (primer)
<b>R</b>	: Direnç
<b>Rev</b>	: Ters
<b>ripple</b>	: Dalgalanma
<b>RMS</b>	: Ortalama
<b>sec</b>	: Transformatör çıkış tarafı sargısı (seconder)
<b>super</b>	: Süper kondansatör bloğu
<b>sw</b>	: Anahtarlama (switching)
<b>V</b>	: Gerilim
<b>VR</b>	: Yansıma gerilimi (Voltage Reflected)
<b>η</b>	: Verim
<b>ΔI</b>	: Dalgalanma akımı

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Sistem bileşenlerinin özellikleri.....	9
Çizelge 2.2 : Flyback konvertör için hesaplanan parametre değerleri.....	12
Çizelge 2.3 : Yükseltici konvertör için hesaplanan parametre değerleri.....	15



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Fotovoltaik üretim sistemleri:(a)Mevcut sistemler (b)Tasarlanan sistem..	4
Şekil 1.2 : Flyback konvertör yapısı ve parametreleri.....	5
Şekil 1.3 : Yükseltici konvertör yapısı ve parametreleri .....	7
Şekil 2.1 : Tasarlanan sistemin genel yapısı ve tüm sistem blok diyagramı .....	8
Şekil 2.2 : Hibrit elektrolit-süper kondansatör depolama birimi devre şeması .....	13
Şekil 2.3 : Sistemin LTspice simulatör elektronik devre şeması.....	16
Şekil 2.4 : Elektronik modül bileşenleri .....	17
Şekil 3.1 : 60W-75V fotovoltaik panel girişi, $C_{elektrolit}=38.2\text{mF}$ / $C_{1super}=1\text{F}$ / $C_{2super}=75\text{F}$ depolama, 12W-12V yük çıkışı koşullarında gerilim değerleri (LTspice).....	19
Şekil 3.2 : Elektronik modül termal performans görüntüsü .....	20
Şekil 3.3 : Flyback mosfet drain-source gerilimi (CH1) ve giriş gerilimi (CH2) .....	20
Şekil 3.4 : Depolama birimi şarj-deşarj ölçümleri (CH1:1F, CH2:75F). .....	21
Şekil 3.5 : Yükseltici mosfet drain-source gerilimi (CH1) ve giriş gerilimi (CH2)..	21

# KRİTİK ALT SİSTEMLERİN GÜÇ KAYNAĞI İÇİN GÜNEŞ ENERJİLİ İZOLE DC-DC FLYBACK KONVERTÖR TASARIMI

## ÖZET

Fotovoltaik güneş panelleri kullanılarak elektrik enerjisi üretimi yapılan birçok uygulamada sistemi yönetmek, güvenliği ve sürdürülebilirliği sağlamak ve veri depolamak gibi kritik öneme sahip işlevler için katma değeri yüksek elektronik sistemler kullanılmaktadır. Kritik altsistemler olarak adlandırabileceğimiz bu yapı, genel sistemde meydana gelebilecek hata durumlarından mümkün olduğunca az etkilenen, elektriksel olarak yalıtılmış, kararlı ve sürekli çalışabilen bir besleme ünitesine ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışma kapsamında güneş temelli fotovoltaik uygulamaların önemli ve pahalı altsistemleri için geniş giriş aralığında çalışabilen, izole edilmiş, güvenilir ve verimli DC-DC güneş temelli fotovoltaik bir besleme ünitesi tasarımı hedeflenmiştir. Bu ünite mikro denetleyici veya farklı amaçlar için pahalı kontrol ve depolama elemanları içeren kontrol sistemlerini 50W güç değerine kadar kararlı ve dengeli olarak besleyebilecek özelliktedir. Bu tasarım geniş çalışma alanı ve önemli altsistemlerin emniyetinden dolayı, yüksek verimli, izole flyback konvertör topolojisi ile birlikte tasarlanmıştır. Bununla birlikte tasarım güneş panellerinde oluşabilecek enerji kesintilerine ve arızalarına karşı kendi enerji depolama birimini ve çıkış geriliminin kararlılığını sağlaması için bir yükseltici konvertör de içermektedir. Bu amaç doğrultusunda, süper kondansatör ve elektrolit kondansatör depolama elemanları kullanılarak, hibrit kondansatör temelli, hiyerarşik düzende enerji akışına göre birbirini tetikleme mantığı ile çalışan sade ve kararlı bir depolama ünitesi tasarlanmıştır. Geniş giriş gerilimi aralığına uygun transformator ve flyback konvertör tasarımı hazırlanıp, hibrit kondansatör depolama ünitesi ile uyumlu hale getirilmiştir. Depolanan enerjinin kararlı ve verimli bir şekilde ünite çıkışına aktarılması için ayrı bir gerilim düzenleyicisi tasarlanarak üniteye dahil edilmiştir. Bu kapsamda oluşturulan sistem, bütünüyle fotovoltaik güneş enerjisi temelli sistemlere özgü izole yapıda tasarlandığı için bu sistemlere yönelik kendi depolama birimini içeren kesintisiz güç kaynağı modeli olarak literatürde yerini alacaktır. Tasarlanan ünite geniş girdi alanı, düşük maliyet ve daha az karmaşık yapıda olması dolayısıyla literatürde mevcut olan çalışmalardan daha avantajlıdır. Çalışma kapsamında tasarlanan sistem, özellikle enerji depolama ünitesi, farklı çevresel şartlar ve amaçlara uygun olarak geliştirilebilir olması nedeniyle ileriki çalışmalara ışık tutacak niteliktedir.

**Anahtar kelimeler:** Güneş Enerjisi, Flyback Konvertör, Kesintisiz Güç Kaynağı, Anahtarlama Güç Kaynağı, Enerji Depolama

# ISOLATED SOLAR DC-DC FLYBACK CONVERTER DESIGN FOR POWER SUPPLY OF CRITICAL SUBSYSTEMS

## SUMMARY

In many applications that produce electrical energy using photovoltaic solar panels, high-value electronic systems are used for critical functions such as managing the system, ensuring security, sustainability, and storing data. This structure, which can be defined as critical subsystems, requires a supply unit that is electrically isolated, stable and continuously operable also, that is low effected as possible as from the fault conditions that may occur in the general system. The aim of this study is to design an isolated, reliable and efficient DC-DC solar based photovoltaic supplier unit capable of operating in a wide range of inputs for the major and expensive subsystems of solar-based photovoltaic applications. This unit is capable of supplying control systems, including micro-controllers or expensive control and storage elements for different purposes, up to 50W instantaneous power level. This design has been designed in conjunction with a highly efficient, isolated flyback converter topology, due to the large work area and the safety of important subsystems. However, the design also includes a boost converter to ensure its energy storage unit and output voltage stability against power failures and faults in solar panels. For this purpose, using a super capacitor and electrolyte capacitor storage elements, a simple and stable storage unit has been designed according to the energy flow in the hierarchical order, which is based on the hybrid capacitor, with the logic of triggering each other. Transformer and flyback converter design according to wide input voltage range has been prepared and harmonized with hybrid capacitor storage unit. A separate voltage regulator is designed and included in the unit to transfer the stored energy to the unit output in a stable and efficient manner. Since the system created in this context is designed in an isolated structure unique to photovoltaic solar based systems, it will take its place in the literature as an uninterruptible power supply model containing its own storage unit for these systems. The designed unit is more advantageous than in the literature works because of its large input area, low cost and less complex structure. The system designed in the context of the study, especially the energy storage unit, can be developed in accordance with different environmental conditions and aims to shed light on future studies.

**Keywords:** Solar Power, Flyback Converter, Uninterruptible Power Supply, Switched Mode Power Supply, Energy Storage.

## 1. GİRİŞ

Fotovoltaik enerji üretimi güneş kaynaklı foton enerjisinin soğurularak elektrik enerjisine dönüştürüldüğü önemli bir yenilenebilir enerji üretim metodudur. Enerji dönüşümü yarıiletken temelli fotovoltaik hücrelerin birbirlerine elektriksel olarak bağlanması ile oluşturulan fotovoltaik güneş panelleri ile sağlanır. Fotovoltaik güneş enerjisi tabanlı sistemler, kaynak olarak güneş paneli, gücü yönetmek için elektronik maksimum güç noktası takipçisi (MPPT) algoritmaları içeren elektronik konvertör bloğu, uygulamanın amacına yönelik çıktıları ve tüm sistemi yönetmek için ise elektronik denetleyici birimler içerir. Bu sistemlerde üretilen elektrik enerjisinin gerilim seviyesi, güneşten gelen ışık şiddetine, ışığın geliş açısına ve fotovoltaik hücrelerin (güneş panellerinin) sıcaklığına bağlıdır. Bahsedilen etkilere bağlı olarak ışık şiddeti fazla, güneş panel sıcaklığının düşük olduğu (ör: sabah güneşin doğduğu saatler) durumda anlık üretilen elektrik enerjisinin gerilim seviyesi yüksek, güneş panel sıcaklığı arttıkça (ör: öğle saatleri) üretilen elektrik enerjisinin gerilim seviyesi daha düşüktür [1]. Bununla birlikte öngörülmeyen bulut geçişleri, hava kararsızlıkları gibi dış etkiler, üretilen elektrik enerjisinin tüketilmesi için gerekli gerilim ve akım kararlılığı, sürekliliği ve güvenilirliği gibi özellikleri olumsuz yönde etkilediği için üretilen elektrik enerjisi doğrudan kullanılamaz. Bu aşamada üretilen elektrik enerjisini kullanılabilir duruma getirebilen, gün içi zaman aralıklarında elde edilen farklı güç değerlerinin maksimum olduğu anları tespit ederek ve şarj algoritması kullanarak sistemlerin gereksinimlerine yönelik tasarlanabilen birçok elektronik MPPT konvertör topolojisi mevcuttur.

Doğru akım (DC-DC) elektronik konvertör tasarımı fotovoltaik güç sistemleri için elektrik enerjisinin kontrolü açısından en temel yapıtaşlarından biridir. Bu konvertörler ile fotovoltaik güneş paneli kaynaklı elektrik enerjisi regülasyonu ve depolanması, güvenilir ve verimli fotovoltaik enerji üretiminin kilit noktasıdır. Literatürde farklı amaçlar doğrultusunda gerçekleştirilmiş birçok çalışma bulunmaktadır. Bu kapsamda, elektronik sistemlerin temel amacı elektrik enerjisini fotovoltaik güneş panellerinden çekmek, düzenlemek, depolamak ve ilgili yükü

beslemektir. Geleneksel flyback konvertör topolojisi bu temel amaç kapsamında birçok fotovoltaiik temelli çalışmada yaygın olarak kullanılmaktadır [1–3]. En çok bilinen uygulamalar ise fotovoltaiik güneş hücrelerinden alınan enerjinin bir batarya ya da pilde, bir şarj kontrol algoritması yardımıyla depolanmasıdır [4,5]. Ayrıca, flyback konvertör topolojisi, elektriksel yalıtılmış veya yalıtımsız, şebeke beslemeli kesintisiz güç kaynaklarında (UPS) kullanılmak üzere batarya ve ya pil gibi elektriksel depolama ünitelerini şarj etmek içinde kullanılır [6,7]. Bununla birlikte, DC mikro-şebeke tasarımları [8], DC yük besleme uygulamaları [9] ve farklı güç kademelerinde çalışabilen ışık yayan diyot (LED) aydınlatma sistemlerinde sıkça karşımıza çıkmaktadır [10,11]. Literatürde flyback topolojisi kullanılarak geliştirilen fotovoltaiik şarj uygulamalarını incelediğimizde, Huang ve diğ. 2016 yılındaki çalışmasında şarj gerilimi ve akımı geribeslemeleri ile kontrol edilen, ilgili şarj verilerini geçici bir kayıt alanına (buffer) kaydeden bir kurşun asit pili şarj ünitesi tasarımının pil şarj sistemlerinde kararlılık ve sürdürülebilirliğe katkı sağladığını görüyoruz [12]. Bir başka çalışmada ise hem alternatif akım (AC) hem DC çıkış üretebilen ve enerjinin bir batarya kontrolcüsü yardımı ile depolandığı bir fotovoltaiik kaynak beslemeli flyback konvertörün muadilleri forward ve full bridge konvertörlere karşı performans ve maliyet analizlerinin avantajlı olduğunu görüyoruz [13]. Farklı ışık şiddetleri ve fotovoltaiik panel sıcaklıkları altında flyback konvertörün bir oransal-integral (PI) kontrolcü ile batarya şarj performansının artırılması yapılmış diğeri bir önemli çalışmadır [14]. Batarya şarj ve deşarj performansını artırmaya yönelik benzer başka bir çalışma ise flyback konvertör bünyesinde maksimum güç noktası takibi temelli bir IncCond metodu kullanılarak yapılmıştır [15]. Flyback konvertör temelli bir çalışmada ise cep telefonu ve dizüstü bilgisayar gibi taşınabilir bataryaya sahip cihazların şarj verimini artırmaya yönelik doğrusal açık devre voltajı, değişkenli adım büyüklüğü, artımlı iletkenlik stratejisi temelli bir hibrit MPPT algoritması önerilmektedir [16]. Tez çalışmamızda geliştirdiğimiz hiyerarşik modüler şarj yapısı ile ilgili başka bir çalışma ise batarya şarjı üzerine yapılmıştır. Bu çalışmada flyback konvertör kullanılan bir fotovoltaiik şarj sisteminde modüler yapı ile oluşturulmuş üç bataryanın MPPT algoritması yardımıyla darbe şekilli elektrik akımı ile enerji tasarruflu şarj edilmesi anlatılmıştır [17]. Flyback konvertör ile enerjinin kondansatörde depolanması (kondansatör şarjı) 1990'lardan günümüze kondansatör teknolojisinin ilerlemesi ile devam etmektedir. Bu konuda en eski çalışmalardan biri ise Sokal ve Redl tarafından gerçekleştirilen



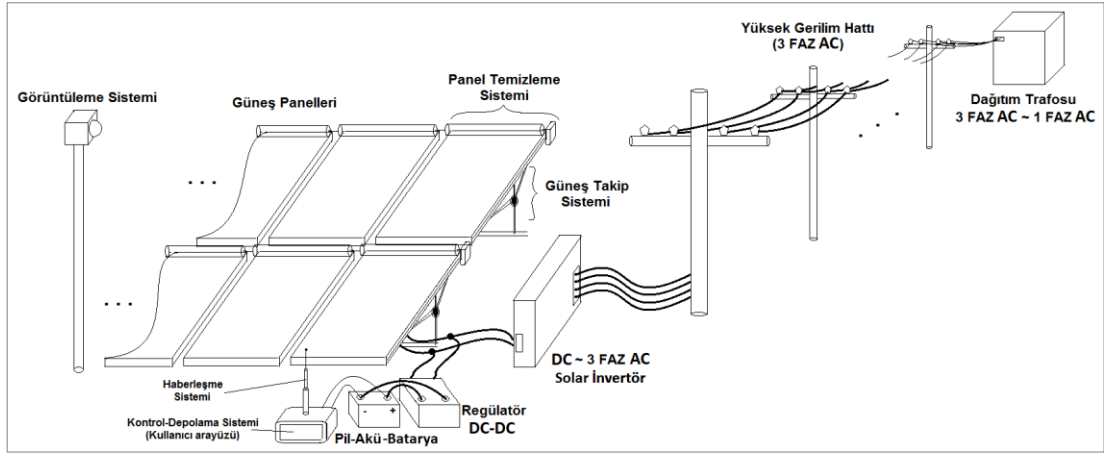
flyback transformatörünün akımları ve çıkış gerilimi geribeslemeli, düşük gerilim seviyeli bir DC kaynak ile bir kondansatörün yüksek gerilim seviyesine şarj edilmesidir [18]. Daha sonra, operasyon modu kontrollü, iki yönlü çalışabilen flyback konvertör ile elektrikli çift katmanlı kondansatör (EDLC) şarj çalışmaları devam etmiş [19], farklı sığa değerlerindeki kondansatörlerin şarj sürelerinin tahmin edilmesi çalışmaları yapılmıştır [20].

Kondansatör teknolojilerinin gelişmesi ile batarya ve pil gibi kimyasal temelli enerji depolama elemanlarına alternatif fiziksel temelli enerji depolama elemanları EDLC kondansatörler önem kazanmaktadır. Tez çalışmamızda sunduğumuz fotovoltaik enerji temelli, flyback konvertör kontrollü, hiyerarşik süper kondansatör depolama birimi içeren güç kaynağı tasarımı mevcut literatüre yenilik katacak niteliktedir.

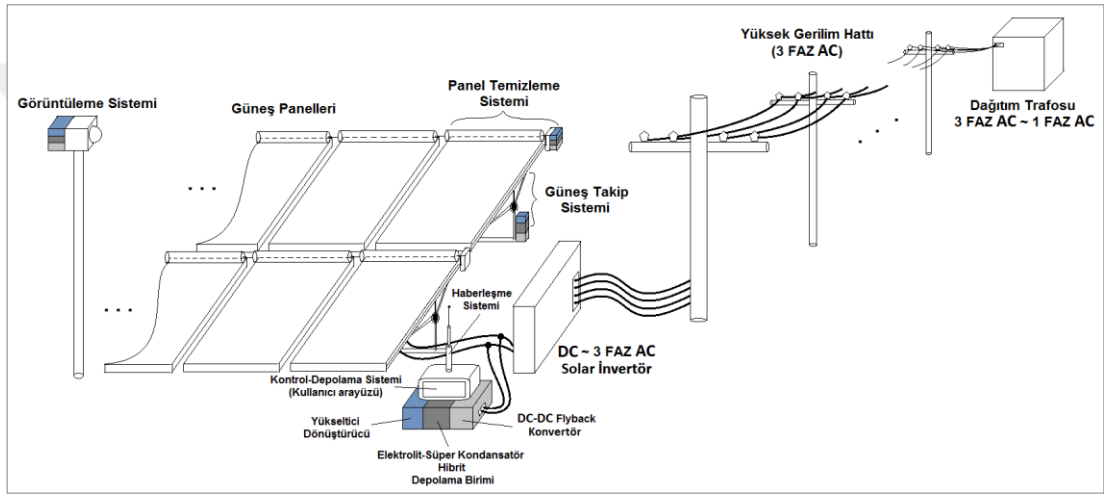
### **1.1 Tezin Amacı**

Bu tez çalışması ile güneş temelli fotovoltaik uygulamaların önemli ve pahalı altsistemleri için geniş giriş aralığında çalışabilen, elektriksel izole edilmiş, güvenilir ve verimli güneş enerjisi kaynaklı besleme ünitesi tasarımı hedeflenmiştir. Bu ünite, farklı amaçlar için pahalı kontrol elemanları içeren kontrol sistemlerini anlık maksimum 50W güç seviyesine kadar kararlı olarak besleyebilecek özelliكتedir. Bu tasarım geniş çalışma alanı ve önemli altsistemlerin emniyetinden dolayı, yalıtılmış flyback topolojisi ile birlikte tasarlanmıştır. Ayrıca, tasarım güneş panellerinde kesintilere ve arızalara karşı kendi enerji depolama birimini de içermektedir.

Genel elektronik modül tasarımlarında, panellerden gelen DC formundaki elektrik enerjisi elektronik konvertör ile kararlı ve sürekli DC formuna çevrilir. Kullanım amacına göre tasarlanan modül şebekeye bağlanılacaksa, bir invertör ile AC, ya da bir konvertör ile DC tipinde sürülecek yükün ihtiyaç duyduğu seviyeye dönüştürülür (Şekil 1.1.a). Bu tasarımlar gelişen ve ilerleyen teknoloji ile birlikte karmaşık ve nitelikli sistemler haline dönüşmektedir. Sistemin izlenmesi, güç akışlarının ve hata durumlarının kayıt altına alınması, sürdürülebilirliğin sağlanması gibi sistemin daha gelişmiş teknoloji ile sağlıklı çalışabilmesi için kritik öneme sahip altsistemler ile donatılması üretimin daha kontrollü, güvenli ve düşük risk seviyesinde gerçekleşmesini sağlar (Şekil 1.1.b). Bahsedilen düşük risk altında çalışma için kritik altsistemlerin güç kaynağının kararlı, sürekli ve elektriksel olarak güvenli olması gerekmektedir.



(a)



(b)

**Şekil 1.1:** Fotovoltaik üretim sistemleri: (a) Mevcut sistemler (b) Tasarlanan sistem

Şekil 1.1.a'da gösterilen genel sistemin pil-akü-batarya depolama biriminde bir hata meydana geldiğinde, bahsedilen kritik kontrol birimleri (anakart, bellek, sürücüler vb.) etkilenebilir ve sistem hasar görebilir. Bu dezavantajları önlemek ve sistemdeki hayati unsurları korumak için, yönetici sistemleri, kontrol üniteleri, kullanıcı tarafından temas edilebilen DC yükleri, sensörler ve hafıza ünitelerini beslemek için alternatif bir izole güç kaynağı tasarlanarak ana sistem arızalandığında yönetici ve hafıza ünitelerinin bir süre daha çalışması sağlanır. Bu durumda, ana sistem çökse bile kritik kontrol ve bellek birimleri etkilenmez, kullanıcı sisteme müdahale edebilir ve sistem hatalarının nedenlerine kolayca erişebilir.

Bu tez çalışmasında tasarlanan sistem topolojisi doğrudan güneş paneli beslemeli ve elektriksel izoledir. Kendi depolama birimini içermekle birlikte kararlı sabit DC çıkış üretebildiği için, AC şebeke bağımsız beyaz eşya anakartı güç bloğu olarak

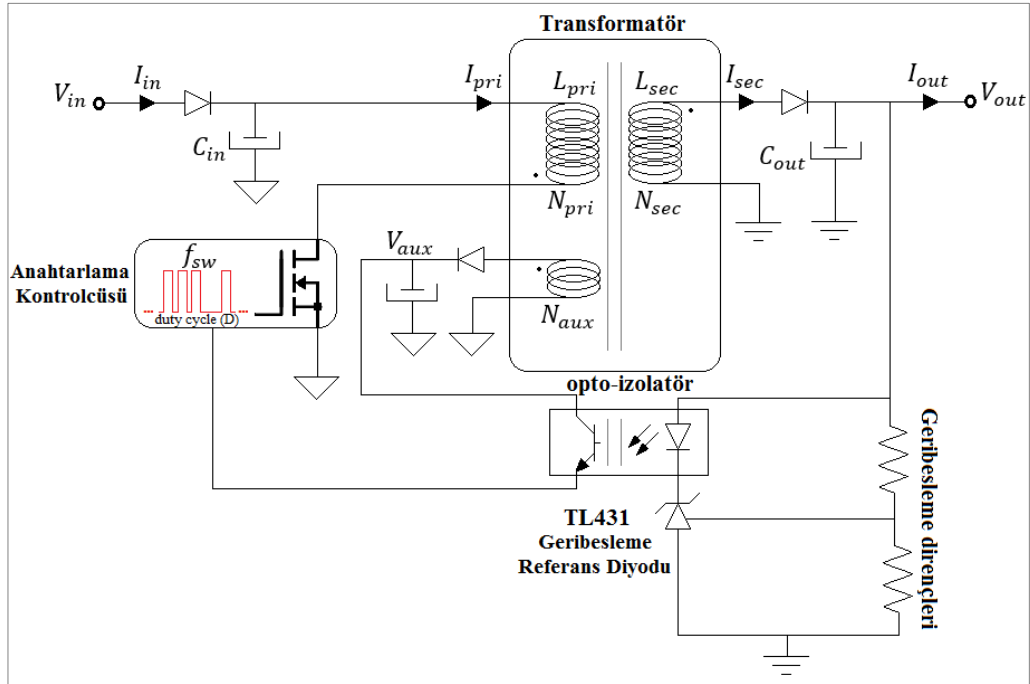
yapılandırılabilir. Bu bağlamda yakın gelecekte, tasarlanan topolojiye ek mikroişlemci ve giriş – çıkış sürücülerini eklenerek buzdolabı, çamaşır makinesi, bulaşık makinesi vb. gibi ev eşyalarında, doğrudan güneş paneli tarafından beslenen (şebekeden bağımsız) ürünlerin anakartı olarak kullanılabilir. Ayrıca şebekeden bağımsız, ani veya kısa süreli yüksek güç gerektiren uygulamalarda (örnek: güneş enerjisi ile çalışan otomobiller) pil ve akü gibi sistemlerin ani ve yüksek akım - gerilim hareketlerinde kararlılığı ve güvenliği sağlayamaması durumunda, geliştirilen yapı, besleme ünitesi olarak kullanılabilir.

## 1.2 Genel Bilgiler

Tez çalışmamızda kullanılan literatürde mevcut yapıların tanımlamaları, parametreleri ve çalışma prensipleri aşağıda özetlenmiştir.

### 1.2.1 Flyback konvertör

DC formunda giriş gerilimi seviyesini değiştirerek yine DC formunda çıkış gerilimine çeviren, bu işlemi çıkış tarafından geribesleme ile anahtarlama kontrolü yaparak gerçekleştiren, elektriksel izole bir DC-DC konvertördür. Flyback konvertör genel yapısı ve ilgili parametreleri Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2: Flyback konvertör yapısı ve parametreleri

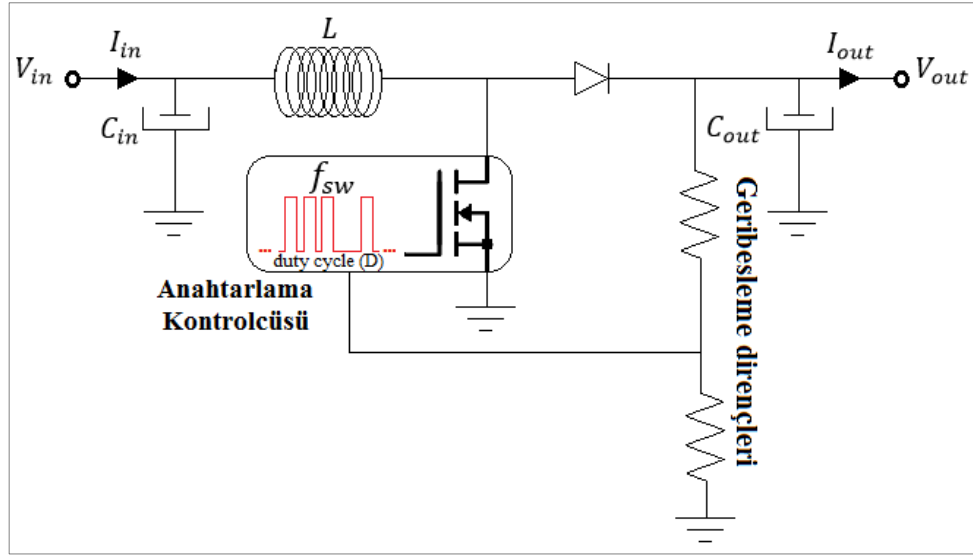
Şekil 1.2’de gösterilen parametrelerin tanımları:  $V_{in}$ ; DC giriş gerilimi,  $V_{out}$ ; DC çıkış gerilimi,  $I_{in}$ ; DC giriş akımı,  $I_{out}$ ; DC çıkış akımı,  $C_{in}$ ; Giriş kondansatörünün kapasitansı,  $C_{out}$ ; Çıkış kondansatörünün kapasitansı,  $L_{pri}$ ; Transformatorün giriş tarafındaki sargının indüktansı,  $L_{sec}$ ; Transformatorün çıkış tarafındaki sargının indüktansı,  $N_{pri}$ ; Transformatorün giriş tarafındaki sarım sayısı,  $N_{sec}$ ; Transformatorün çıkış tarafındaki sarım sayısı,  $I_{pri}$ ; Transformatorün giriş tarafındaki sargının akımı,  $I_{sec}$ ; Transformatorün çıkış tarafındaki sargının akımı,  $V_{aux}$ ; Anahtarlama kontrolcüsünü beslemek için yardımcı sargı gerilimi,  $N_{aux}$ ; Yardımcı sarım sayısı ve  $f_{sw}$ ; Anahtarlama frekansı şeklinde adlandırılır.

Flyback konvertörün çalışma prensibi enerjinin manyetik olarak depolanması ve elektrik olarak aktarılması mantığına dayanır. Bu işlem yüksek frekanslı (70-500kHz) anahtarlama sayesinde gerçekleşir. Anahtarın iletimde olduğu durumda, transformatorün giriş tarafındaki  $L_{pri}$  mıknatıslama indüktansı üzerinden akım akarak manyetik enerji depolanır. Bu durumda transformatorün çıkış tarafında herhangi bir akım görülmez. Yük bir önceki çevrimde (anahtarın iletimde olmadığı) çıkış kondansatöründe depolanmış enerji ile çalışmasına devam eder. Anahtarın iletimde olmadığı durumda manyetik olarak depolanmış enerji çıkış tarafına aktarılarak çıkış kondansatörünün yüke harcadığı enerji tekrar depolanır ve aynı anda yük beslenir. Bu çevrim yüksek anahtarlama frekansında, geribesleme devresi üzerinden çıkış geriliminin seviyesini izleyerek devam eder. Çıkış geriliminin seviyesi ise anahtarın işlem döngüsü (duty cycle) kontrolü ile yapılır. Konvertörde gerçekleşen tüm kontroller anahtarlama kontrolcüsüne entegre mantık devreleri ile gerçekleşir. Flyback konvertör transfer fonksiyonu denklem 1.1’de verilmiştir [21].

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_{sec}}{N_{pri}} \times \frac{D}{1 - D} \quad (1.1)$$

### 1.2.2 Yükseltici (boost) konvertör

DC formunda giriş gerilimi seviyesini yükselterek yine DC formunda çıkış gerilimine çeviren, bu işlemi çıkış tarafından geribesleme ile anahtarlama kontrolü yaparak gerçekleştiren bir DC-DC konvertördür. Yükseltici konvertör genel yapısı ve ilgili parametreleri şekil 1.3’te verilmiştir.



**Şekil 1.3:** Yükseltici konvertör yapısı ve parametreleri

Şekil 1.3'te gösterilen parametrelerin tanımları:  $V_{in}$ ; DC giriş gerilimi,  $V_{out}$ ; DC çıkış gerilimi,  $I_{in}$ ; DC giriş akımı,  $I_{out}$ ; DC çıkış akımı,  $C_{in}$ ; Giriş kondansatörünün kapasitansı,  $C_{out}$ ; Çıkış kondansatörünün kapasitansı,  $L$ ; Yükseltici konvertör indüktörünün indüktansı,  $f_{sw}$ ; Anahtarlama frekansı şeklinde adlandırılır.

Yükseltici konvertörün çalışma prensibi enerjinin manyetik olarak depolanması ve artırılarak aktarılması mantığına dayanır. Bu işlem yüksek frekanslı (70-500kHz) anahtarlama sayesinde gerçekleşir. Anahtarın iletimde olduğu durumda, yükseltici konvertör indüktörünün indüktansı üzerinden akım akarak manyetik enerji indüktör üzerinde depolanır. Bu durumda yük bir önceki çevrimde doldurulmuş çıkış kondansatörü tarafından beslenir. Anahtarın iletimde olmadığı durumda,  $L$  üzerinden akım akarak hem indüktör üzerinde ki depolanmış manyetik enerji hem de giriş besleme enerjisi birbirine eklenerek çıkış kondansatörüne ve yüke aktarılır. Bu çevrim yüksek anahtarlama frekansında, geribesleme devresi üzerinden çıkış geriliminin seviyesini izleyerek devam eder. Çıkış geriliminin seviyesi ise anahtarın bir periyot boyunca iletimde olma süresi, işlem döngüsü kontrolü ile yapılır. Konvertörde gerçekleşen tüm kontroller anahtarlama kontrolcüsüne entegre mantık devreleri ile gerçekleşir. Yükseltici konvertör transfer fonksiyonu denklem 1.2'de verilmiştir [21].

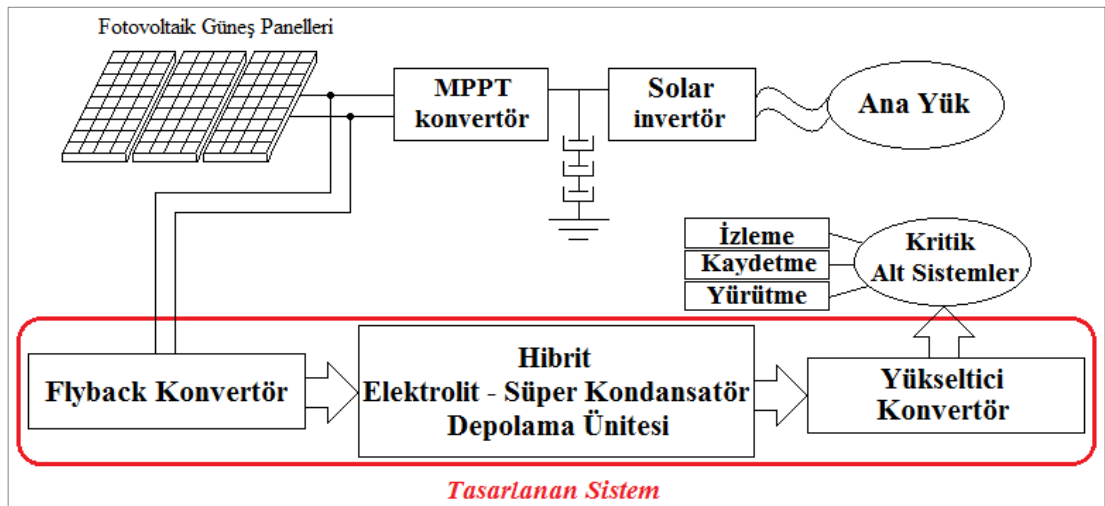
$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D} \quad (1.2)$$

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Sistem için gerekli özelliklere (giriş-çıkış gerilim değerleri, maksimum güç, verim) karar verildikten sonra (Çizelge 2.1) teorik hesaplamalar ile sistem parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen parametreler ile LTspice (LTspiceXVII, Linear Technology Corporation, US Pacific) programı aracılığı ile simulasyon modeli oluşturulmuş ve tüm sistemin çalışma karakteristiği bilgisayar ortamında test edilmiştir. Sistemin gerçekleştirilmesi için gerekli malzemeler tedarik edilerek elektronik modül oluşturulmuş ve ölçümleri yapılmıştır.

### 2.1 Teorik Model

Şekil 2.1’de bahsedilen sistem flyback konvertör, hibrit elektrolit-süper kondansatör depolama ünitesi ve yükseltici konvertörden oluşmaktadır. Sistem doğrudan fotovoltaik güneş paneli beslemeli olup tek başına kullanılacağı gibi güç tüketimi yüksek ana yükü besleyen daha büyük sistemlere de entegre edilebilir. Sistemi oluşturan bu üç ana yapının tasarım aşamasında belirlenen çalışma koşulları çizelge 2.1’de belirtilmiştir.



Şekil 2.1: Tasarlanan sistemin genel yapısı ve tüm sistem blok diyagramı

**Çizelge 2.1:** Sistem bileşenlerinin özellikleri.

<b>Flyback konvertör</b> (70kHz anahtarlama frekansı)	<b>Hibrit elektrolit-süper kondansatör depolama birimi</b>	<b>Yükseltici konvertör</b> (70kHz anahtarlama frekansı)
Maksimum çıkış gücü: 50W	Maksimum anlık güç: 50W	Maksimum çıkış gücü: 50W
Maksimum giriş gerilimi: 100V	Giriş gerilimi: 12±0.5V	Maksimum giriş gerilimi:12V
Minimum giriş gerilimi: 48V	Maksimum çıkış gerilimi:12V	Minimum giriş gerilimi:3V
Çıkış gerilimi: 12±0.5V	Minimum çıkış gerilimi: 3V	Çıkış gerilimi: 12±0.5V
Verim: 0.9	Verim: 0.9	Verim: 0.9

### 2.1.1 Flyback konvertör parametrelerinin teorik analizi

Çizelge 2.1’de belirlenen tasarım özelliklerine göre flyback konvertör için gerekli giriş gücü ve giriş kondansatörü değeri denklem 2.1 ve 2.2’ye göre hesaplanır. Geleneksel flyback tasarımlarında giriş gerilimi genellikle AC şeklinde olduğu için flyback girişinde DC doğrultma yapılırken her 1W çıkış güç değeri için genellikle; 85~265V AC girişler için 1.5~3µF, 195~265V AC girişler için 1µF kondansatör değeri kullanılır [21]. Bu değer 50-60 Hz AC hat ile beslenen sistemlerde flyback giriş geriliminin kararlılığını koruması adına pasif doğrultma işlemi için belirlenmiştir. Tez çalışmamızda kaynak olarak doğrudan DC şeklinde fotovoltaik güneş paneli kullandığımız için genel AC kaynaklı tasarımlarda önerilen 1W→2µF değeri çalışmamızda yeterli olacaktır.

$$P_{in_{max}} = \frac{P_{out}}{\eta} \quad (2.1)$$

$$C_{in} = \frac{2\mu F}{1W} \times P_{in} \quad (2.2)$$

Flyback konvertörlerde güç kontrolü, işlem döngüsü değiştirilerek yapılır. Bu oran konvertörün transformatör ve mevcut anahtarlama elemanları üzerindeki çalışma stresinde etkili olduğu için maksimum bir değer belirlenmesi gerekir. Maksimum değer hesaplanmadan önce transformatörde oluşacak maksimum yansıma gerilimi (VR) değeri belirlenmelidir. VR anahtarlama elemanının açık olduğu durumda transformatörün çıkış tarafındaki gerilimin transformatör sargı oranıyla çarpılıp girişteki anahtarlama elemanı üzerine düşen bölümüdür [21]. Çıkış gerilimi 12±0.5V

sargı oranı yaklaşık 6/1 kabul edersek (sargı oranı giriş/çıkış gerilim oranı ile ilintilidir),  $VR$  gerilim değerini  $\sim 72V$  olarak kabul edebiliriz. Bu durumda maksimum işlem döngüsü oranı denklem 2.3 ile hesaplanır.

$$D_{max} = \frac{VR}{VR + V_{in_{min}}} \quad (2.3)$$

Maksimum işlem döngüsü hesaplandıktan sonra flyback konvertör transformatörün giriş akımı ve indüktans değeri denklem 2.4 ve 2.5 ile elde edilir [21].

$$I_{pri_{max}} = \frac{2 \times P_{in_{max}}}{V_{in_{min}} \times D_{max}} \quad (2.4)$$

$$L_{pri_{min}} = \frac{V_{in_{min}} \times D_{max}}{I_{pri_{max}} \times f_{sw}} \quad (2.5)$$

Bu aşamadan sonra transformatör sarım sayılarının hesaplanması için kolay tedarik edilebilen ETD 29/16/10 nüvesi seçilerek hesaplamalara devam edilmiştir. Üretici firma ETD 29/16/10 nüvesi için kesit alanını  $A_e = 76mm^2$  ve maksimum manyetik akı yoğunluğunu 0.2T olarak vermiştir [22]. Transformatörün minimum giriş sarım sayısı, buna bağlı çıkış ve yardımcı sarım sayıları denklem 2.6, 2.7 ve 2.8 ile elde edilmiştir. Yardımcı sarım, konvertördeki anahtarlama elemanını kontrol eden, kontrolcüyü beslemek için sarılır.

$$N_{pri} = \frac{L_{pri_{min}} \times I_{pri_{max}}}{B_{max} \times A_e} \quad (2.6)$$

$$n = \frac{VR}{V_{out}} \rightarrow N_{sec} = \frac{N_{pri}}{n} \quad (2.7)$$

$$N_{aux} = \frac{V_{aux}}{V_{out}} \times N_{sec} \quad (2.8)$$

Transformatör sarım sayıları hesaplandıktan sonra giriş ve çıkış sarımları üzerinden geçen maksimum ve ortalama (RMS) akım değerleri, denklem 2.9, 2.10 ve 2.11 ile bulunur (Maksimum giriş akımı denklem 2.4'te elde edildi).

$$I_{pri_{RMS}} = I_{pri_{max}} \times \sqrt{\frac{D_{max}}{3}} \quad (2.9)$$



$$I_{sec_{max}} = I_{pri_{max}} \times \frac{N_{pri}}{N_{sec}} \quad (2.10)$$

$$I_{sec_{RMS}} = I_{sec_{max}} \times \sqrt{\frac{1 - D_{max}}{3}} \quad (2.11)$$

Giriş ve çıkış sarımları üzerinden geçen maksimum ve ortalama akım değerleri transformatör sarımlarında kullanılan bakır iletkenlerin çapını belirler. Amerikan Kablo Ölçü Tablosuna (AWG: American Wire Gauge) [23], elde ettiğimiz akım kapasitelerine, transformatör sargı sayıları ve boyutlarına göre giriş için AWG22, çıkış için AWG18 ve yardımcı sargı için AWG33 kullanılması uygundur.

Flyback konvertörün son aşamasında çıkış tarafında kullanılan diyot (ters diyot gerilimi) ve kondansatör (kapasitans ve ortalama akım) için gerekli minimum değerler denklem 2.12 ve 2.13'te verilmiştir.

$$V_{Rev_{diode}} = V_{out} + V_{in_{max}} \times \frac{N_{sec}}{N_{pri}} \quad (2.12)$$

$$C_{out_{min}} = \frac{I_{out_{max}} \times N_{cp}}{f_{sw} \times V_{out_{ripple}}}, \quad I_{cap_{RMS}} = \sqrt{I_{sec_{RMS}}^2 - I_{out_{max}}^2} \quad (2.13)$$

Çıkış kondansatörünün minimum kapasitans değeri  $C_{out_{min}}$  hesaplanırken maksimum gücün çekildiği durum dikkate alınarak hesaplanır ( $I_{out_{max}} = P_{out_{max}}/V_{out_{max}}$ ).  $N_{cp}$ , flyback kontrolcüsünün işlem döngüsü değerini maksimumdan minimum değere düşürmek için kontrol döngüsünün ihtiyaç duyduğu dahili anahtarlama periyodu (clock period) sayısıdır. Bu işlem genellikle 10-20 anahtarlama periyodu süresince gerçekleşir [24]. Flyback konvertör için gerekli kritik parametrelerin hesaplanan değerleri çizelge 2.2'de verilmiştir. Belirtilen kritik parametreler dışında geribesleme dirençleri, filtreleme elemanları, kaçak kesici diyotlar, sınırlayıcı (snubber) devre elemanları ve geribesleme referans diyodu uygulamada kullanılan Power Integrations firmasının TOP249YN kontrolcüsü için yayınladığı bilgi dökümanında bulunan önerilere göre seçilmiştir [25].

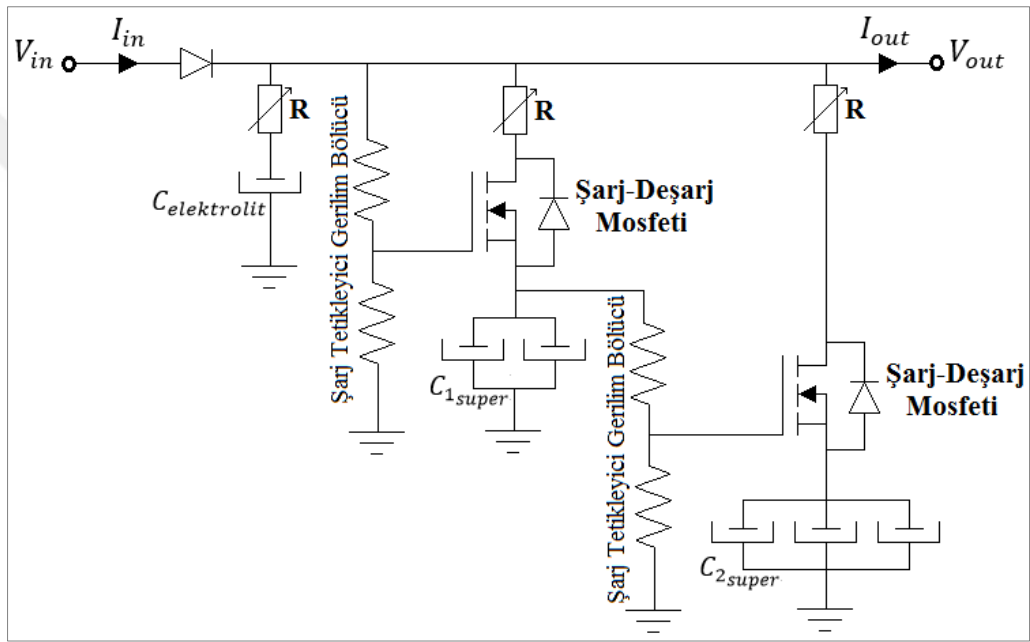
**Çizelge 2.2:** Flyback konvertör için hesaplanan parametre değerleri.

Parametre adı	Parametre Sembolü	Teorik değeri
Maksimum giriş gücü	$P_{in_{max}}$	55.50W
Giriş kapasitansı	$C_{in}$	111.11 $\mu$ F
Maksimum işlem döngüsü	$D_{max}$	0.60
Maksimum transformatör giriş akımı	$I_{pri_{max}}$	3.85A
Minimum transformatör giriş indüktansı	$L_{pri_{min}}$	106.86 $\mu$ H
Transformatör giriş sargı sayısı	$N_{pri}$	27.06 $\approx$ 28 turns
Transformatör çıkış sargı sayısı	$N_{sec}$	4.51 $\approx$ 5 turns
Transformatör yardımcı sargı sayısı	$N_{aux}$	5.63 $\approx$ 6 turns
Transformatör ortalama giriş akımı	$I_{pri_{RMS}}$	1.72A
Transformatör maksimum çıkış akımı	$I_{sec_{max}}$	23.10A
Transformatör ortalama çıkış akımı	$I_{sec_{RMS}}$	8.43A
Ters çıkış diyodu gerilimi	$V_{Rev_{diode}}$	28.66V
Minimum çıkış kapasitansı	$C_{out_{min}}$	1.78mF
Çıkış kondansatörü ortalama akımı	$I_{cap_{RMS}}$	7.33A

### 2.1.2 Hibrit elektrolit-süper kondansatör depolama birimi teorik analizi

Elektrik enerjisinin küçük kapasitans değerine sahip kondansatörden başlayıp büyüğe doğru hiyerarşik bir düzende, modüler olarak depolandığı hibrit elektrolit-süper kondansatörlerden oluşan depolama biriminin devre şeması şekil 2.2’de verilmiştir. Literatürde benzeri olmayan bu yapının çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir: Güneş panelleri tarafından üretilen yükün ihtiyaç duymadığı fazla enerji ilk olarak küçük kapasiteli kondansatör bloğunda ( $C_{elektrolit}$ ) depolanmaya başlar. Bu blok elektrolit kondansatörlerden oluşup, dolduktan sonra orta kapasiteli kondansatör bloğunun ( $C_{1_{super}}$ ) şarj anahtarı tetiklenerek depolama işlemi devam eder. Orta kapasiteli kondansatör bloğu şarjını tamamladığında büyük kapasiteli depolama bloğunun ( $C_{2_{super}}$ ) şarj anahtarı tetiklenerek enerjinin depolanması işlemi sürdürülür. Her kondansatör bloğunun yükü doğrudan besleyebilmesi için ortak deşarj hattı

bulunur. Bu yapı ve konvertörler sayesinde yük tarafında tüketilen ve güneş panellerinin ürettiği enerji değişikliğine bağlı kalmaksızın depolama işlemi kesintisiz devam eder. Depolama biriminin, herhangi bir şarj kontrolcüsüne ve mikroişlemciye ihtiyaç duymaması, ani ve değişken akım değerlerine bağışık olması ve kesintisiz depolama yapabilmesi lityum iyon benzeri pillere göre başlıca avantajlarıdır. Hiyerarşik düzende çalışması ve modüler yapısı gereği minimum dolma boşalma sayısı sağladığı için lityum iyon benzeri kimyasal temelli pillerden daha uzun ömürlüdür. Ünite de bulunan hiyerarşik kondansatör bloğu sayıları değerleri uygulama türüne ve yük ihtiyacına göre artırılabilir.



**Şekil 2.2:** Hibrit elektrolit-süper kondansatör depolama birimi devre şeması

Depolama biriminin maksimum depolayabileceği enerji denklem 2.14'te, güneş panellerinden gelen enerjinin kesilmesi durumunda yükün normal çalışmasına devam etme süresine bağlı kapasitans değeri denklem 2.15'te verilmiştir. Şarj ve deşarj süreleri sistemin güç değişkenliğine bağlı olduğu için özel durumlar için her bir kondansatör bloğunun şarj akımları denklem 2.16 ile hesaplanabilir.

$$E_{cap} = \frac{1}{2} CV_{load}^2 = P_{load} \times t \quad (2.14)$$

$$C(t) = \frac{2 \times P_{load} \times t}{V_{load}^2} \quad (2.15)$$

$$I_{charge} = \frac{V_{in}}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2.16)$$

### 2.1.3 Yükseltici konvertör parametrelerinin teorik analizi

Yükseltici konvertör, flyback konvertör tarafından şarj edilen hibrit elektrolit-süper kondansatör depolama biriminin gerilim değerinin yük tarafına kararlı bir şekilde iletilmesini sağlar. Güneş panellerinin ürettiği enerjinin herhangi bir nedenle kesilmesi durumunda, flyback konvertör pasif duruma geçer ve yük, depolama biriminin sağladığı enerji ile çalışmasına devam eder. Bu durumda depolama biriminin gerilim değeri düşmeye başlar. Düşmeye başlayan gerilim seviyesini yükün kullanabileceği seviyelerde kararlı olarak tutabilmek için DC-DC gerilim yükseltici görevi yapan bir yükseltici konvertör sistemin üçüncü bileşeni olarak tasarlanmıştır. Çizelge 2.1’de belirlenen tasarım özelliklerine göre yükseltici konvertör için gerekli maksimum işlem döngüsü, indüktör dalgalanma akımı, minimum indüktans değeri, maksimum anahtarlama akımı ve minimum çıkış kapasitans değeri sırasıyla denklem 2.16, 2.17, 2.18, 2.19 ve 2.20 ile hesaplanır.

$$D_{max} = 1 - \frac{V_{in_{min}} \times \eta}{V_{out}} \quad (2.16)$$

$$\Delta I_L = \frac{V_{in_{min}} \times D_{max}}{f_{sw} \times L} = 0.3 \times I_{out} \times \frac{V_{out}}{V_{in_{min}}} \quad (2.17)$$

$$L_{min} = \frac{V_{in_{min}} \times (V_{out} - V_{in_{min}})}{\Delta I_L \times f_{sw} \times V_{out}} \quad (2.18)$$

$$I_{sw_{max}} = \frac{\Delta I_L}{2} + \frac{I_{out}}{1 - D_{max}} \quad (2.19)$$

$$C_{out_{min}} = \frac{I_{out} \times D_{max}}{f_{sw} \times \Delta V_{out}} \quad (2.20)$$

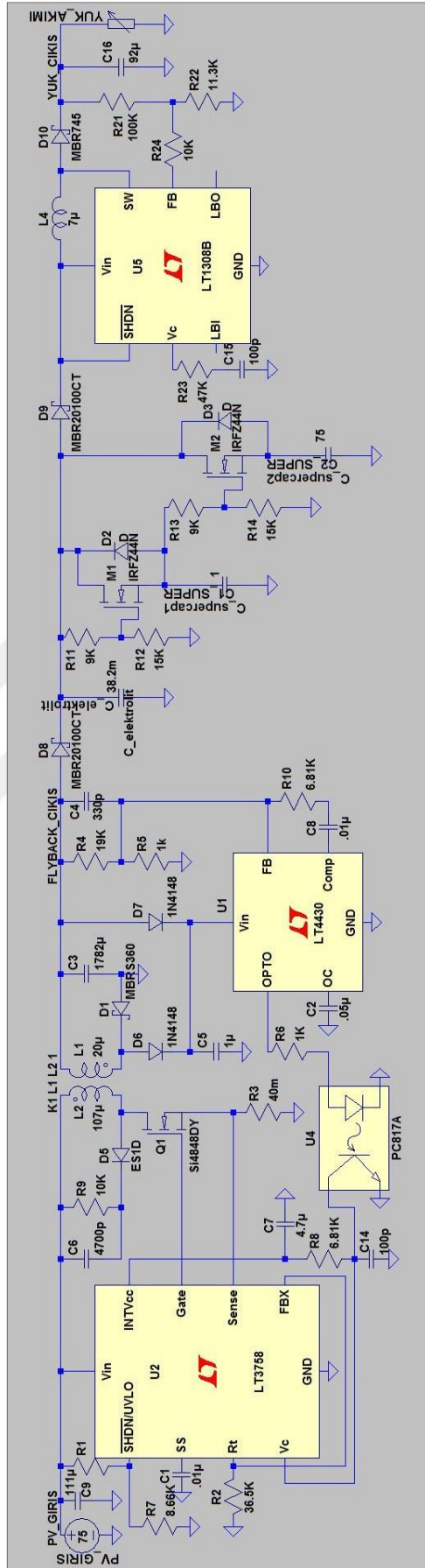
Denklem 2.17’de verilen indüktör dalgalanma akımı, ilk etapta yükseltici konvertör indüktans değeri ( $L$ ) bilinmediği için ikinci eşitliğe göre en zorlayıcı koşullar altında çıkış akımının %30’u alınarak ve çıkış/giriş gerilim oranı ile çarpılarak hesaplanır. Bu hesaplanan değer daha sonra denklem 2.18’de kullanılarak minimum indüktans değeri elde edilir. Ardından, denklem 2.17’de verilen ilk eşitliğe göre dalgalanma akımı ( $\Delta I_L$ ), denklem 2.18’de elde edilen minimum indüktans ( $L_{min}$ ) değeri artırılarak tasarım elemanlarının özelliklerine uygun seviyelere düşürülebilir. Yükseltici konvertörün teorik parametre değerleri çizelge 2.3’te verilmiştir.

**Çizelge 2.3:** Yükseltici konvertör için hesaplanan parametre değerleri.

Parametre adı	Parametre Sembolü	Teorik değeri
Maksimum işlem döngüsü	$D_{max}$	0.77
Yükseltici konvertör indüktörü dalgalanma akımı	$\Delta I_L$	4.99A
Yükseltici konvertör indüktansı	$L_{min}$	6.44 $\mu$ H
Maksimum anahtar akımı	$I_{sw_{max}}$	20.58A
Minimum çıkış kapasitansı	$C_{out_{min}}$	91.52 $\mu$ F

## 2.2 Sistem (Simulasyon) Modeli

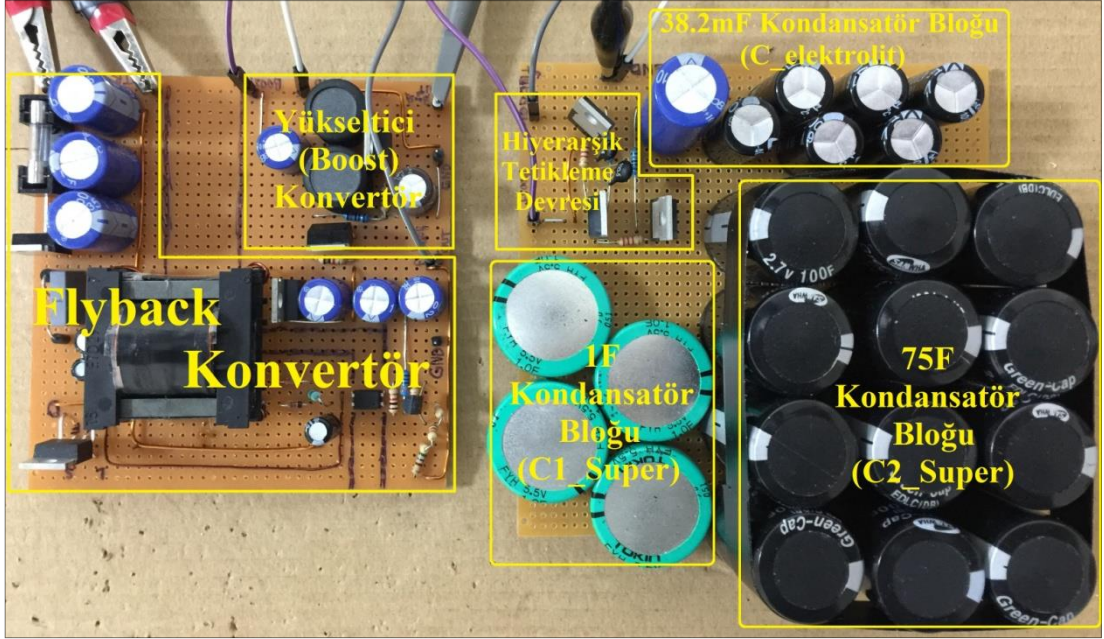
Sistemin bilgisayar ortamında benzetim çalışmaları LTspice programı kullanılarak yapılmıştır. Anahtarlama kontrolcülerini LTspice programında tanımlı olan, elektronik modül tasarımında kullandığımız, sistem özelliklerini karşılayan kontrolcülerin muadilleri olarak seçilmiştir. Simulasyon ve elektronik modül doğrulanmasında muadil kontrolcülerin kullanılmasının amaçları, LTspice programının LT markalı kontrolcülerde daha doğru sonuçlar vererek sorunsuz simule etmesi, elektronik modülde kullanılan elemanların tedarikinin hızlı olması ve kurduğumuz topolojinin marka/model bağımsız doğru çalıştığını göstermektir. Elektronik modülde doğrulanan ve teorik model bölümünde anlatılan yapının, birebir muadil bileşenler kullanılarak oluşturulan simülasyon devre şeması şekil 2.3'te verilmiştir. Sistem üç ana yapının (flyback konvertör - hibrit elektrolit-süper kondansatör depolama birimi - Yükseltici konvertör) sırasıyla birbirine seri olarak bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Flyback kontrolcüsü için LT3758, flyback geribesleme referans diyodu olarak LT4430 ve yükseltici konvertör kontrolcüsü için LT1308B entegre devreleri kullanılarak simulasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simulasyon senaryosunda 12V gerilimde ortalama 12W güç tüketimine sahip bir yükün 75V gerilimde minimum 60W güç üretebilen fotovoltaik panel ile sürülmesi test edilmiştir. Bu senaryo kapsamında elektronik modülde test amaçlı kullanılan depolama birimi kapasitans değerleri aynı zamanda ( $C_{elektrolit}=38.2\text{mF}$ ,  $C_{1super}=1\text{F}$  ve  $C_{2super}=75\text{F}$ ) LTspice programı benzetim çalışmalarında kullanılmıştır.



Şekil 2.3: Sistemin LTspice simatör elektronik devre şeması

### 2.3 Elektronik Modül

Sistemin tüm teorik analizleri ve simulasyon modeli sonrasında piyasada bulunan elektronik bileşenler tedarik edilerek elektronik modül oluşturulmuştur (Şekil 2.4). Oluşturulan elektronik modülde flyback konvertör için Power Integrations firmasının TOP249YN ve yükseltici konvertör için XLSEMI firmasının XL6009 kodlu kontrolcülere kullanılmıştır. Doğrulan sistem Şekil 2.4'te bloklar halinde işaretlenerek gösterilmiştir. Elektronik modülümüzde kurduğumuz depolama birimi  $C_{elektrolit} = 38.2\text{mF}$ ,  $C_{1super} = 1\text{F}$  ve  $C_{2super} = 75\text{F}$  kapasitans değerlerinde kondansatör blokları kullanılmıştır. Flyback transformatör nüveleri için uygun hava boşluğu farklı yükler altında denemeler yapılarak belirlenmiştir. Seri şarj direnci olarak negatif termal katsayılı dirençler (NTC) kullanılarak şarj süreleri ve ısı kayıpları en aza indirilmiştir. Anahtarlama kontrolcülere dışında tüm devre bileşenleri (Mosfet, diyot, opto-izolatör vb.) simulasyon modelinde kullanılan bileşenler ile aynıdır.



Şekil 2.4: Elektronik modül bileşenleri

Sistemin tüm bileşenleri, hem simulasyon modelinde hem elektronik modülde, teorik analiz bölümünde hesaplanan değerler temel alınarak ve bileşenlerin toleransları ve tasarım kalitesi düşünülerek hesaplanan minimum değerlerden daha yüksek kapasiteli olarak seçilmiştir (Transformatör sargı sayıları  $\times 1.5$  diyotlar  $\times 3$ , Mosfetler  $\times 2$  katı alınarak, filtre için kullanılan kondansatör ve direnç değerleri ise kontrolcülerin bilgi dökümanında önerilen değerleri alınarak kullanılmıştır).

### 3. ÇIKTILAR VE TARTIŞMA

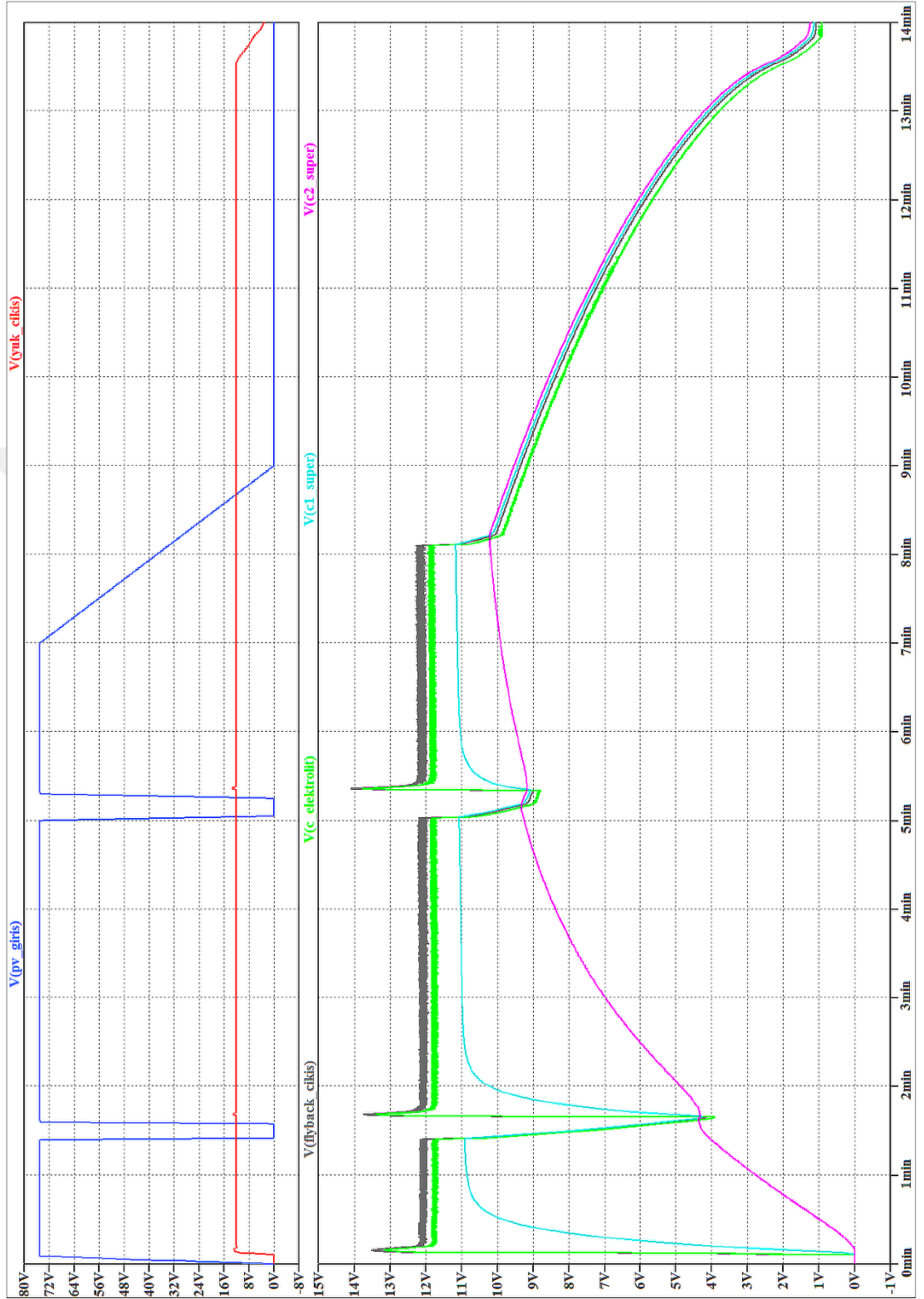
Bu bölümde tasarlanan sistemin simulasyon çıktıları ve elektronik modül testlerinin ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Sistemin model elektronik devre şeması LTspice simulasyon programında doğrulandıktan sonra, elektronik modül testleri başlatılmıştır. Elektronik modül sıcaklık ölçümleri ve kritik osiloskop ölçüm sinyalleri detaylıca verilmiştir.

#### 3.1 Simulasyon Çıktıları

2. Bölüm, 2.2. Sistem (Simulasyon) Modeli başlığı altında bahsedilen simulasyon senaryosu doğrultusunda depolama biriminin şarj süresi yaklaşık 8 dakika, yine aynı yük altında fotovoltaik giriş enerjisinin kesilmesi durumunda deşarj süresi 6 dakika olarak simule edilmiştir (Şekil 3.1). Sisteme 1. ve 5. dakikalardan sonra fotovoltaik giriş enerjisinde 10 ve 15 saniye süreli kesintiler verilmiş, depolama birimi yaşanan kısa süreli kesintilerde yük tarafını kesintiye uğratmadan beslemeye devam etmiştir.

Şekil 3.1’de elde edilen simulasyon sonucuna göre fotovoltaik güneş panellerinden gelen enerjinin ( $V_{pv\_giris}$ ) yeterli olduğu durumda flyback konvertör çıkışı ( $V_{flyback\_cikis}$ ), yükü ( $V_{yuk\_cikis}$ ) ve depolama birimi kondansatörlerini ( $V_{c\_elektrolit}$ ,  $V_{c1\_super}$  ve  $V_{c2\_super}$ ) beslemektedir. Yükseltici konvertör bu çalışma modunda pasif durumdadır. Fotovoltaik güneş panellerinden gelen enerjinin ( $V_{pv\_giris}$ ) kesilmesi durumunda flyback konvertör pasif duruma geçer. Yük depolama biriminin kondansatörlerinde ( $V_{c\_elektrolit}$ ,  $V_{c1\_super}$  ve  $V_{c2\_super}$ ) depolanan enerjiden tüketmeye başlar. Bu durumda yükün enerjisini sağlayan depolama birimi iken, yükün ihtiyaç duyduğu gerilim seviyesine yükseltilen ise yükseltici konvertördür. Şarj süresi zaman sabitine (RC) bağlı olduğu için düşük kapasitans değerine sahip kondansatör bloğu ( $V_{c\_elektrolit}$ ) kısa sürede şarj olurken, yüksek kapasitans değerine sahip kondansatör bloğu ( $V_{c2\_super}$ ) daha uzun şarj süresine sahiptir. Deşarj ise ortak hat üzerinden gerçekleştiği için tüm kondansatör blokları en büyük zaman sabitine sahip kondansatör bloğunu takip eder.

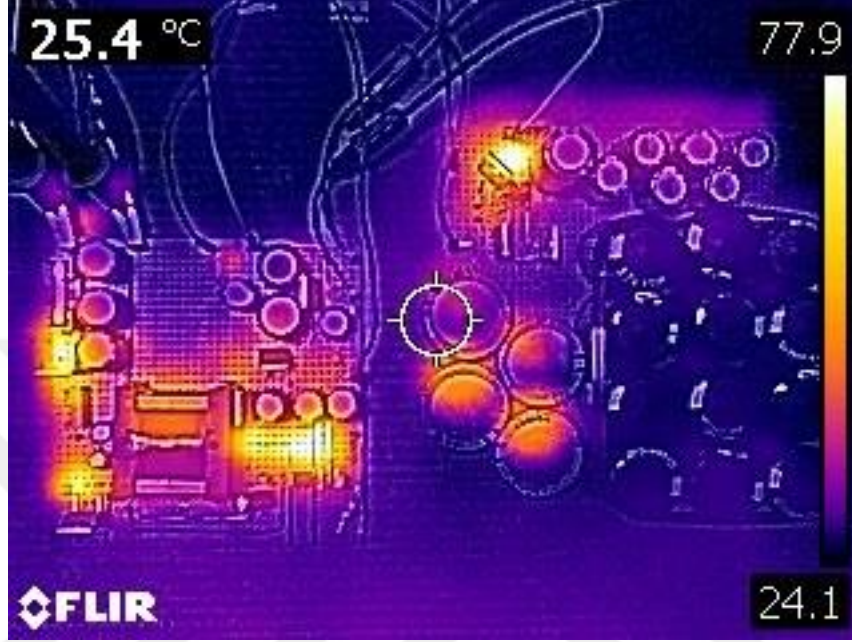




**Şekil 3.1:** 60W-75V fotovoltaik panel girişi,  $C_{elektrolit}=38.2\text{mF}$  /  $C_{1super}=1\text{F}$  /  $C_{2super}=75\text{F}$  depolama, 12W-12V yük çıkışı koşullarında gerilim değerleri (LTspice)

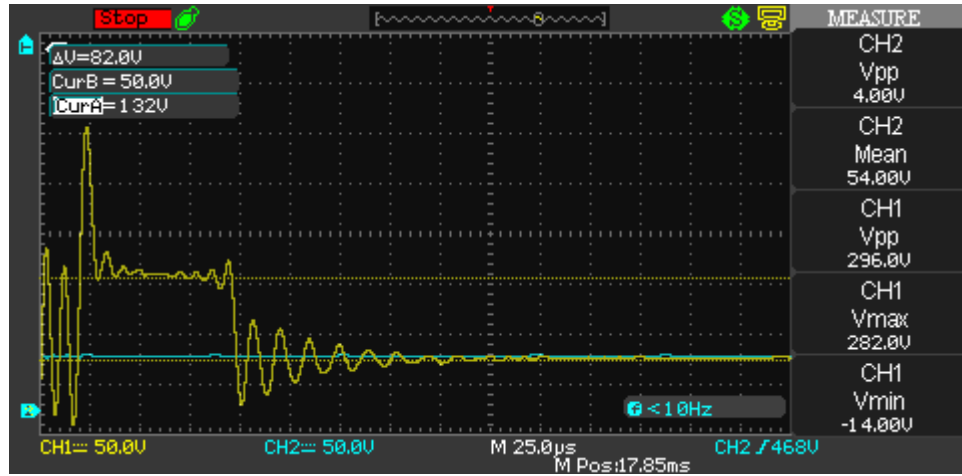
### 3.2 Deneysel Çıktılar

Bir önceki bölümde benzetim çıktıları elde edilen elektronik modülün 2. Bölüm, 2.2. Sistem (Simulasyon) Modeli başlığı altında bahsedilen simülasyon senaryosu koşullarında termal performans görüntüsü şekil 3.2’de verilmiştir.



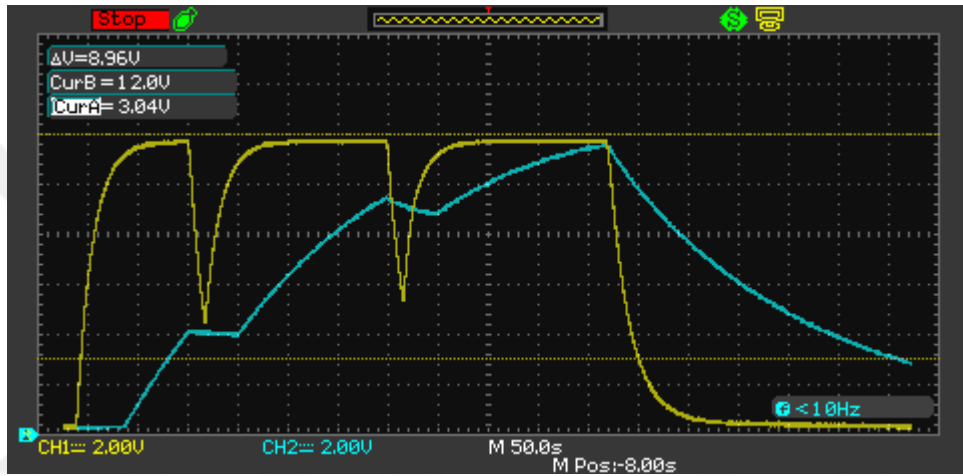
Şekil 3.2: Elektronik modül termal performans görüntüsü

Sistemde izolasyonun sağlandığı en kritik birim olan flyback konvertörün anahtarlama elemanı üzerine düşen gerilim (Mosfet drain-source) ölçümleri şekil 3.3’te verilmiştir. Yansıma gerilimi  $V_R = 82V$  olarak ölçülmüştür (Teorik değer = 72V, kabul edilebilir).



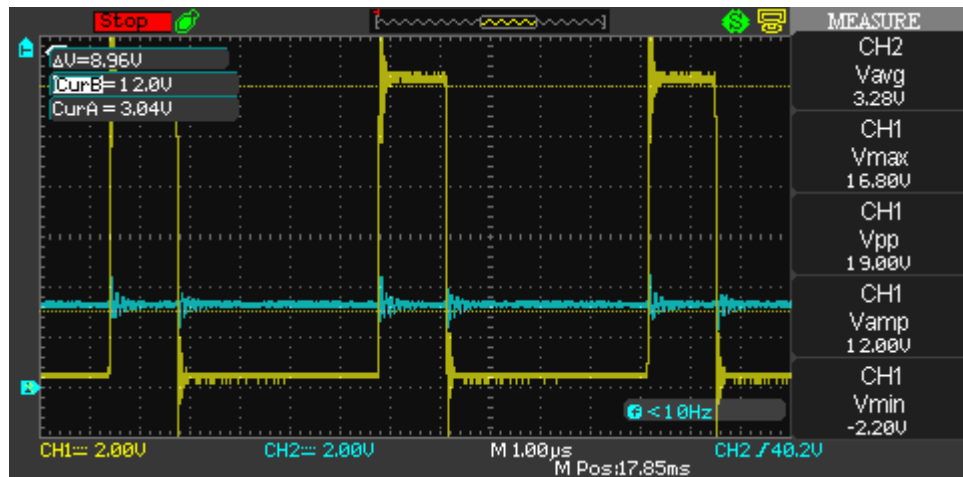
Şekil 3.3: Flyback mosfet drain-source gerilimi (CH1) ve giriş gerilimi (CH2)

2. Bölüm, 2.2. Sistem (Simulasyon) Modeli başlığı altında bahsedilen simulasyon senaryosu doğrultusunda depolama biriminin şarj süresi yaklaşık 8.6 dakika, yine aynı yük altında fotovoltaiik giriş enerjisinin kesilmesi durumunda deşarj süresi 5.8 dakika olarak ölçülmüştür (Şekil 3.4). Sisteme 1. ve 5. dakikalardan sonra fotovoltaiik giriş enerjisinde 10 ve 15 saniye süreli kesintiler verilmiş, depolama birimi yaşanan kısa süreli kesintilerde yük tarafını kesintiye uğratmadan beslemeye devam etmiştir. Hibrit elektrolit-süper kondansatör depolama biriminin 1F ve 75F kapasitans değerine sahip kondansatör bloklarının simulasyon senaryosunda şarj-deşarj ölçümleri şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4: Depolama birimi şarj-deşarj ölçümleri (CH1:1F, CH2:75F)

Yükseltici konvertörün tam yük altında yapılan testinde giriş gerilim değeri  $\cong 3\text{V}$ , çıkış gerilim değeri 12V olarak ayarlanmıştır (en zorlayıcı koşul). Bu koşul altında yükseltici konvertörün anahtarlama elemanı (Mosfet drain-source) gerilimi şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5: Yükseltici mosfet drain-source gerilimi (CH1) ve giriş gerilimi (CH2)

Özel çalışma koşulları altında yeni çalışma senaryolarına uygun olarak sistemin güç aralığı ve hibrit elektrolit-süper kondansatör depolama birimi kapasitans değerleri ayarlanabilir. Sistemin çalışma performansı, kesinti sürelerine, yükün tükettiği güç değerlerine ve değişimlerine bağlı olduğu için depolama birimi kondansatör kapasitans değerleri ve her bir süper kondansatör modülün şarj akımları (seri şarj dirençleri) uygulamanın türüne özgü hesaplanıp seçilmelidir.

Simulasyon çıktıları ve elektronik modül deneysel sonuçları birbiri ile örtüşmekte olup tasarlanan topoloji hem simulasyonda hem elektronik modülde hatasız çalışmaktadır.



#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmamızda tasarlanan fotovoltaik enerji temelli, kendi hibrit elektrolit-süper kondansatör depolama birimini içeren elektronik güç kaynağı, pil-batarya içeren sistemlere alternatif bir besleme modülü olarak önerilmiştir. Bu alternatif güç kaynağı, bir sistemin bütününe işleyişinde hayati öneme sahip ve katma değeri yüksek kritik alt sistemler olarak adlandırılan birimler için geliştirilmiştir.

Kondansatör bloğu tam şarj durumunda flyback konvertör aktif çalışırken tüm sistemin anlık verimi doğrulanan elektronik modül testlerine göre %83 olarak ölçülmüştür. Giriş gerilimi 3V, çıkış gerilimi 12V durumunda yükseltici konvertör verimi ise %88 olarak ölçülmüştür. Sistemin veriminin hedeflenen değerlerden daha düşük ölçülmesinin nedenleri olarak başta flyback transformatöründe sargı düzensizliği, nüvedeki hava boşluğunun çok iyi ayarlanamaması ve kullanılan bileşenlerin toleransları olarak sıralanabilir. Sistemin 48V giriş gerilimi ile tam yük altında 10 dakika süresince (flyback konvertör için en zorlayıcı durum) çalışma şartları altında en yüksek sıcaklık flyback konvertörde çıkış kondansatörleri ve diyotları üzerinde  $\cong 70^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür. Giriş gerilimi kesikken tam yük altında 10 dakika süresince (yükseltici konvertör için en zorlayıcı durum) çalışma şartları altında en yüksek sıcaklık yükseltici konvertörde giriş kondansatörü ve diyodu üzerinde  $\cong 80^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür. Bu sıcaklık değerleri kullanılan elemanların izolasyonu ve kararlı çalışma koşulları için uygundur.

Sistemin elektriksel izole flyback topolojisine sahip olması, insan/kullanıcı temaslı cihazlarda (güneş enerjili beyaz eşyalar, elektrikli ev aletleri, bilgisayarlar vb.) güvenlik standartlarına uygun olarak kullanılmasını sağlar. Sistemde kondansatör temelli depolama biriminin kullanılması ise, esnek şarj-deşarj akımları altında verimli çalışabilme, ani güç hareketlerinde bozulma ve patlama riskinin azalmasını (fiziksel temelli depolama) sağlar. Ayrıca modüler yapıda (farklı kapasitelerde ayrı ayrı çalışma) ve hiyerarşik düzende (küçük kapasiteden büyük kapasiteye şarj-deşarj) çalışması, minimum dolma boşalma sayısı sağladığı için daha uzun ömürlüdür.

Sistem tasarlanan flyback topolojisinin sınır güç değerleri (maksimum 50W) altında ki her güç değerinde şarj-deşarj olabildiği için ekstra maliyet ve yazılım yükü gerektiren şarj kontrolcüsüne ihtiyaç duymaz. Kimyasal temelli bir birim içermeyen sistem çevreye atık ağır metal ve zararlı kimyasallar salmadığı gibi geri dönüşüm kapasitesi de yüksektir. Sistemin geçici bir dezavantajı ise uzun depolama süreleri için yüksek kapasitans değerlerine sahip kondansatörlerin getireceği yüksek maliyettir. Hızla gelişen EDLC ve süper kondansatör teknolojileri ile maliyetler hızla düşmektedir.

Geliştirilen sistemin hibrit elektrolit-süper kondansatör depolama ünitesi hiyerarşisindeki kondansatör sayısı artırılabilir. Bu durumda sistem kısa süreli kesintilerden orta ve büyük ölçekli tüm kesintilere kadar daha verimli çalışabilir. Tasarlanan topolojinin flyback konvertör çıkış tarafına eklenebilecek bir mikrokontrolcü ile karmaşık uygulamalar için güç kaynağı ve yönetici anakart olarak işlev görebilir.

Bu tez çalışmasında geliştirilen, literatürde benzerlerinden farklı bir enerji depolama yaklaşımına sahip olan güç kaynağı modeli gelecekte şebeke bağımsız fotovoltaik sistemlerde kullanılabilir. Başta fotovoltaik enerji beslemeli elektronik ev cihazları olmak üzere otomobiller, taşınabilir güç istasyonları, kesintisiz güç kaynakları vb. yük güç tüketim yoğunlukları değişken cihazlarda güç kaynağı modülü olarak kararlı bir şekilde çalışabilecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Kim, H., Kim, J., Kim, H., Lee, K., Kim, J., Yoo, D., Shin, D.,** (2010). A high efficiency photovoltaic module integrated converter with the asymmetrical half-bridge flyback converter. *Solar Energy*, 84, 1376-1381,. doi: 10.1016/j.solener.2010.04.019.
- [2] **Lin, B.R. & Dong, J.Y.,** (2012). New zero-voltage switching DC–DC converter for renewable energy conversion systems. *IET Power Electronics*, 5, 393-400,. doi: 10.1049/iet-pel.2011.0002.
- [3] **Adarsh, B. V. & Shenoy, L.** (2016). Flyback topology based power amplifier for PV system applications, *International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuincation*, (ss. 434-438). Chennai : IEEE, Nisan 20-21.
- [4] **Halder, T.** (2014). Spacecraft electrical power systems (EPS) using the Flyback converters, *1. International Conference on Non Conventional Energy*, (ss. 52-57). Kalyani : IEEE, Ocak 16-17.
- [5] **Wu, Y.E., Huang, K.C., Li, M.X.,** (2016). A bidirectional DC/DC converter charge/discharge controller for solar energy illumination system integrating synchronous rectification SEPIC converter and active clamp flyback converter. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 44, 305-327,. doi : 10.1002/cta.2079.
- [6] **De Sousa, G.J.M., Cruz, C.M.T., Branco, C.G.C., Bezerra, L.D.S., Torrico-Bascope, R.P.** (2009). A low cost flyback-based high power factor battery charger for UPS applications, *Brazilian Power Electronics Conference*, (ss. 783-790). Bonito-Mato Grosso do Sul : IEEE, Eylül 27-Ekim 1.
- [7] **Maurya, R., Gunturu, P., Mo, S.** (2010). Simulation and design of an integrated fly back converter for uninterruptible power supply, *2. International Conference on Computer and Automation Engineering*, (ss. 524-528). Singapore: IEEE, Şubat 26-28.
- [8] **Saha, S., Bhattacharjee, A., Elangovan, D., Arunkumar, G.** (2017). DC microgrid system for rural electrification, *International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing*, (ss. 307-313). Chennai : IEEE, Ağustos 1-2.
- [9] **Chennampalli, D. & Anitha, G.S.** (2017). Simulation and hardware design of a flyback converter for solar energy powered DC loads, *International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications*, (ss. 332-336). Bangalore : IEEE, Şubat 21-23.

- [10] Ali, A., Lange, J., Elrayyah, A., Sozer, Y., De Abreu-Garcia, J.A., Mpanda, A. (2018). A hybrid flyback LED driver with utility grid and renewable energy interface, *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, (ss. 3377-3384). San Antonio : IEEE, Mart 4-8.
- [11] Huang, C.L. & Lin, B.R. (2009). Design and Implementation of Active-Clamping Flyback Converter for PV-Based LED Lighting. *International Review of Electrical Engineering*, 4 (5), 691-698.
- [12] Huang, G.S., Wu, S.L., Ding, P.S. (2016). Research for Solar Power Charger of Stable Feedback Control, *International Symposium on Computer, Consumer and Control*, (ss. 1006-1009). Xi'an : IEEE, Temmuz 4-6.
- [13] Jayalakshmi, N.S., Gaonkar, D.N., Naik, A. (2017). Design and Analysis of Dual Output Flyback Converter for Standalone PV/Battery System, *International Journal of Renewable Energy Research*, 7 (3), 1032-1040.
- [14] Yilmaz, U., Kircay, A., Borekci, S. (2017). PV system flyback converter controlled PI control to charge battery under variable temperature and irradiance, *Electronics*, (ss. 1-6). Palanga : IEEE, Haziran 19-21.
- [15] Jeon, B.J., Kim, K.H., Lee, K., Im J.H., Cho G.B., Choi Y.O. (2012). Battery Controller Design of Stand-alone Photovoltaic System Using IncCond Method, *15th International Conference on Electrical Machines and Systems*, (ss. 1-5). Sapporo : IEEE, Ekim 21-24.
- [16] Thangavelu, A., Vairakannu, S., Parvathyshankar, D., (2017). Linear open circuit voltage-variable step-size-incremental conductance strategy-based hybrid MPPT controller for remote power applications. *IET Power Electronics*, 10, 1363-1376., doi : 10.1049/iet-pel.2016.0245.
- [17] Hsieh, H.I., Tsai, C.Y., Hsieh, G.C., (2014). Photovoltaic Burp Charge System on Energy-Saving Configuration by Smart Charge Management. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29, 1777-1790., doi:10.1109/TPEL.2013.2268943.
- [18] Sokal, N.O. & Redl, R. (1997). Control algorithms and circuit designs for optimal flyback-charging of an energy-storage capacitor (e.g., for flash lamp or defibrillator) *IEEE Transactions on Power Electronics*, 12, 885-894., doi:10.1109/63.623007.
- [19] Kohama, T., Yamashima, M., Ninomiya, T. (2002). Operation-mode control of active-clamped bi-directional flyback converter as EDLC charger and discharger. *Power Conversion Conference*, (ss. 1155-1159). Osaka : IEEE, Nisan 2-5.
- [20] Wekhande, S. & Rajguru, A. (2017). Analysis and charge time estimation for capacitor voltage charger. *National Power Electronics Conference*, (ss. 358-362). Pune : IEEE, Aralık 18-20.
- [21] Rashid M.H. (2009). *Power Electronics : Circuits, Devices, and Applications*. USA : Pearson.



[22] **EPCOS AG. ETD 29/16/10 Datasheet.** Erişim: 14 Ekim 2018, [https://en.tdk-electronics.tdk.com/inf/80/db/fer/etd\\_29\\_16\\_10.pdf](https://en.tdk-electronics.tdk.com/inf/80/db/fer/etd_29_16_10.pdf)

[23] **ASTM B258-18 Standard Specification for Standard Nominal Diameters and Cross-Sectional Areas of AWG Sizes of Solid Round Wires Used as Electrical Conductors.** (2018). West Conshohocken, PA: ASTM.

[24] **Saliva, A.A.** (2013). Design Guide for Off-line Fixed Frequency DCM Flyback Converter (Rapor No. 1). NC : Infineon Technologies North America Corp.

[25] **Power Integrations TOP242-250 TOPSwitch-GX Family Datasheet.** Erişim: 25 Ekim 2018, <https://www.power.com/sites/default/files/product-docs/top242.250.pdf>



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Serhat ÖZKÜÇÜK  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 15/05/1992 - Merzifon  
**E-posta** : serhat.ozkucuk@btu.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015 (Mezun), Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2019 (Tez aşaması), Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği A.B.D.

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Vestel Elektronik A.Ş. – Sistem Tasarım Uzmanı (2 Yıl)
- Bursa Teknik Üniversitesi – Araştırma Görevlisi (Devam ediyor)

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Bilimsel Araştırma Makalesi, (Dergide incelenme aşaması), “Isolated Solar Electronic Unit Design Including Capacitive Storage For The Uninterruptible Power Supply Of Critical DC Loads”, Bursa, Türkiye.

### DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Tübitak Projesi, Yürütücü, 2014, TEYDEB - Akıllı Ev Cihazlarına Uyumlu Yeni Nesil Evrensel Kumanda (Vestel Elektronik A.Ş.)
- Bilimsel Araştırma Projesi, Araştırmacı, 2018, 182N26 No'lu Gama ve X-Işınları Detektörleri İçin Yüksek Çözünürlüklü Halit Perovskit Tek Kristallerin Üretimi ve Performans Değerlendirmesi (Bursa Teknik Üniversitesi)
- Bilimsel Etkinlik, Yardımcı Personel, 2018, Bilimsel Araştırmalarda X-Işınları Analiz Teknikleri - I (biXat-I) (Bursa Teknik Üniversitesi)
- Bildiri Sunumu, 2018, Alternative Energy Sources, Materials And Technologies (Aesmt'18) Uluslararası Kongresi, “Solar photovoltaic source based magnetic launcher simulation design with thermal requirements consideration”, Plovdiv, Bulgaristan.