



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

**FOTOVOLTAİK SİSTEMLER İÇİN**  
**YÜKSEK KAZANÇLI**  
**da-da DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI**

**Murat BİRKAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı**

**Şubat-2021**  
**BATMAN**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Murat BİRKAN tarafından hazırlanan “Fotovoltaik Sistemler İçin Yüksek Kazançlı da-da Dönüştürücü Tasarımı” adlı tez çalışması 01/02/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÜSTÜNDAĞ

.....

#### Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet GÜNDOĞDU

.....

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Reşat ÇELİKEL

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK  
FBE Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Murat BİRKAN

01.02.2021

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### FOTOVOLTAİK SİSTEMLER İÇİN YÜKSEK KAZANÇLI da-da DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI

**Murat BİRKAN**

**Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet GÜNDOĞDU**

**2021, 93 Sayfa**

#### **Jüri**

**Dr. Öğr. Üyesi Ahmet GÜNDOĞDU**

**Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÜSTÜNDAĞ**

**Dr. Öğr. Üyesi Reşat ÇELİKEL**

Yüksek anahtarlama frekansına sahip da-da dönüştürücüler günlük hayatta kullanılan birçok teknolojik cihazın bir parçası olmuştur. Bu dönüştürücülerin, küçük boyut ve yüksek verimlilik gibi özelliklere sahip olması istenir. Yüksek frekans anahtarlama bu dönüştürücüler, kontrol kolaylığı, hızlı tepki ve yüksek güç yoğunluğu nedeniyle akü şarj istasyonları, yenilenebilir enerji sistemleri, yakıt hücreleri, güç faktörü düzeltme devreleri, led aydınlatma gibi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek gerilim kazancına sahip bu da-da dönüştürücüler, özellikle fotovoltaik sistemlerdeki mikro eviricilerin giriş gerilimlerini elde etmek için kullanılmaktadır. Fotovoltaik sistemlerde yaygın olarak kullanılması, bu dönüştürücüler üzerinde yapılan araştırmaları yoğunlaştırmıştır.

Bu tez çalışmasında yüksek kazançlı bir Sarmaşık tipi da-da dönüştürücü devresi matematiksel olarak modellenmiş ve benzetim modeli MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Benzetim çalışmaları ile elde edilen sonuçların uygulanabilirliği tartışılmıştır. İncelenen da-da dönüştürücü yapısı, düşük görev periyodu ile yüksek çıkış gerilimi sağlamak için birleştirilmiş indüktanslardan oluşmaktadır. Bu yapı anahtarlama yükselten tip dönüştürücüye entegre edilmiştir. Bu dönüştürücü yapısının önemli bir avantajı, güç anahtarları ve diyotlar üzerindeki gerilim streslerinin düşük olmasıdır. Böylece düşük maliyetli ve yüksek performanslı yarı iletken anahtarlama elemanları kullanılabilir. Ayrıca, tüm diyotların ters geri kazınım problemi azaltılmakta ve anahtarlama elemanlarının sıfır akımdaki anahtarlama (ZCS) işlemi de sağlanmaktadır. Ek olarak pasif kilitleme devreleri, anahtarlama elemanlarının kapanma anları sırasında oluşan gerilim yükselmelerini bastırmak için kullanılmaktadır. Bu tezde 25V giriş gerilimi ve 400V çıkış gerilimine sahip 200W gücündeki bir da-da dönüştürücünün tasarımı ve benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışması sonucunda dönüştürücü yapısının çalışma prensibi ve sürekli durumdaki kararlılık analizi açıklanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Mikro evirici, da-da Dönüştürücü, Fotovoltaik, FV panel

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

#### **DESIGN OF A HIGH-GAIN da-da CONVERTER FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS**

**Murat BİRKAN**

**INSTITUTE OF SCIENCE OF BATMAN UNIVERSITY**

**RENEWABLE ENERGY SYSTEMS DEPARTMENT**

**Advisor: Asst. Prof. Dr. Ahmet GÜNDOĞDU**

**2021, 93 Pages**

**Jury**

**Advisor Asst. Prof. Dr. Ahmet GÜNDOĞDU**

**Asst. Prof. Dr. Mehmet ÜSTÜNDAĞ**

**Asst. Prof. Dr. Reşat ÇELİKEL**

da-da converters with high switching frequency have been a part of many technological devices used in daily life. These converters are desired to have characteristics such as small size and high efficiency. These high-frequency switched converters are widely used in industrial applications such as battery charging stations, renewable energy systems, fuel cells, power factor correction circuits, led lighting due to their ease of control, fast response and high power density. These da-da converters with high voltage gain are especially used to obtain the input voltages of microswitches in photovoltaic systems. Their widespread use in photovoltaic systems has intensified research on these converters.

In this thesis, a high-gain interleaved converter circuit was modeled mathematically and the simulation model was created in MATLAB / Simulink environment. The applicability of the results obtained through simulation studies has been discussed. The studied transformer structure consists of inductances combined to provide high output voltage with low duty period. This structure is integrated in the switched step-up type converter. An important advantage of this converter structure is that it reduces voltage stress on power switches and diodes. So, low cost and high performance semiconductor switching elements can be used. In addition, the reverse recovery problem of all diodes is reduced and the zero current switching (ZCS) operation of the switching elements is also provided. In addition, passive locking circuits are used to suppress the voltage spikes that occur during the closing moments of the switching elements. The design and simulation study of a 200W da-da converter with 25V input voltage and 400V output voltage was carried out. As a result of the simulation study, the working principle and steady state stability analysis of the converter structure are explained.

**Keywords:** Micro inverter, da-da Converter, Photovoltaic, FV panel

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında yardımlarını esirgemeyen değerli danışmanım; Dr. Öğr. Üyesi Ahmet GÜNDOĞDU hocama kıymetli katkılarından dolayı en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yine tez çalışmam süresince değerli yorum ve fikirlerine başvurduğum ayrıca desteğini aldığım Dr. Öğr. Üyesi Reşat ÇELİKEL 'e teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım esnasında desteğini aldığım değerli arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin ASKER 'e yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Son olarak çalışmalarım boyunca her an yanımda olan ve sabırla sıkıntılarımı paylaşan eşim Arzu BİRKAN 'a teşekkür ederim

Murat BİRKAN  
BATMAN-2021

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR.....</b>	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Tezin Amacı .....	5
1.2. Tezin Yapısı .....	6
<b>2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI.....</b>	<b>7</b>
2.1. Rüzgar Enerjisi .....	7
2.2. Hidrojen Enerjisi .....	9
2.3. Hidrolik Enerji .....	10
2.4. Jeotermal Enerji .....	11
2.5. Biyokütle Enerjisi .....	12
2.6. Dalga Enerjisi .....	12
2.6. Güneş Enerjisi .....	13
<b>3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER.....</b>	<b>15</b>
3.1. Fotovoltaik Panel .....	16
3.2. Evirici.....	18
3.3. Depolama ve Şarj Ünitesi .....	20
3.4. da-da Dönüştürücü .....	21
<b>4. DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ YAPILARI.....</b>	<b>23</b>
4.1. İzolasyonsuz da-da Dönüştürücüler .....	25
4.1.1. Düşürücü da-da Dönüştürücüler .....	27
4.1.2. Yükseltici da-da Dönüştürücüler .....	30
4.1.3. Düşürücü - Yükseltici da-da Dönüştürücüler .....	33
4.1.4. CUK tipi da-da Dönüştürücüler .....	36
4.1.5. SEPIC tipi da-da Dönüştürücüler .....	38
4.1.6. ZETA tipi da-da Dönüştürücüler .....	40
4.1.7. Sarmaşık(interleaved) tipi da-da Dönüştürücüler .....	42
4.1.7.1. Faz-Farklı Güç Katı Paralleleme (Sarmaşık paraleleme) .....	45
4.2. İzolasyonlu (Transformatörlü) da-da Dönüştürücüler .....	48
4.2.1. Tam köprü da-da dönüştürücüler .....	48
4.2.2. Yarım köprü da-da dönüştürücüler .....	50
4.2.3. İleri yönlü da-da dönüştürücüler .....	52
4.2.4. Geri yönlü da-da dönüştürücüler .....	53
4.2.5. Push-pull da-da dönüştürücüler .....	55

<b>5. YÜKSEK GERİLİM KAZANÇLI SARMAŞIK TİP DÖNÜŞTÜRÜCÜLER... 57</b>	
5.1. Yüksek Kazançlı Sarmaşık Tip Dönüştürücünün Devre Yapısı ve Çalışma Modları.....	57
5.2. Dönüştürme Oranı.....	62
5.3. Yarıiletken Elemanlar Üzerindeki Gerilim Stresi.....	63
5.4. Pasif Elemanların Tasarımı.....	64
<b>6. BENZETİM ÇALIŞMASI VE SONUÇLARI..... 66</b>	
<b>7. SONUÇ ..... 74</b>	
<b>KAYNAKLAR..... 75</b>	
<b>ÖZGEÇMİŞ.....84</b>	

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\Delta I_L$	: Bobin akımı değişimi, (A)
$\Delta V_C$	: Kondansatör gerilimi değişimi, (V)
C	: Kapasitans, (F)
R	: Direnç, ( $\Omega$ )
D	: Ana diyot
S	: Güç Anahtarı
N	: Güç Katsayısı
FF	: Faz farkı
$\tau$	: Sarmaşık Yükseltici Devre Giriş Akım Peryodu
$I_0$	: Çıkış akımı, (A)
$I_C$	: Kondansatör akımı, (A)
$I_D$	: Diyot akımı, (A)
$I_L$	: Bobin akımı, (A)
$T_1$	: Anahtarın açma (ON) süresi (sn)
$T_2$	: Anahtarın kesim (OFF) süresi (sn)
$T_p$	: Anahtarlama periyodu (sn)
$V_0$	: Çıkış gerilim, (V)
$V_C$	: Kondansatör gerilimi, (V)
$V_D$	: Diyot gerilimi, (V)
$V_i$	: Giriş gerilimi, (V)
$V_f$	: Geri besleme gerilimi, (V)
$V_L$	: Bobin gerilimi, (V)
$V_r$	: Referans gerilimi, (V)
$V_{st}$	: Testere dişi gerilimi, (V)

### Kısaltmalar

AA	: Alternatif akım
DA	: Doğru akım
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
EMI	: Electromagnetic Interference (Elektromanyetik Girişim)
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Metal Oksit Yarıiletkenli Alan Etkili Transistör)
PWM	: Pulse-Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
WECS	: Dalga Enerjisi Dönüşüm Sistemi
ZCS	: Sıfır Akım Anahtarlama

## 1. GİRİŞ

Günümüzde insanlığın gelişimine paralel olarak enerji ihtiyacı da artmıştır. İnsanoğlunun kullandığı enerjinin önemli bir kısmı ise fosil yakıtlardan temin edilmektedir. Ancak fosil yakıtların çevremiz üzerinde olumsuz ve yıkıcı etkileri olmaktadır. Dünyanın kirlenmesi ve küresel ısınma dünyadaki hayatı olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle bilim insanları farklı enerji kaynaklarına yönelme gereği duymuştur. Bu enerji kaynakları güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, dalga enerjisi, biyokütle enerjisi ve jeotermal enerji gibi dünya üzerinde var olan ve sürekli devam eden yenilenebilir enerji kaynaklarıdır.

Yenilenebilir enerji kaynakları, enerji üretimi için kullanılmakla birlikte genel olarak verimlerinin düşük olması en önemli dezavantajlarıdır. Verimlilik, genel anlamda tüm enerji kaynaklarında olduğu gibi yenilenebilir enerji alanında da önemli bir problemdir. Bu problemin giderilmesi için daha yüksek verimli sistemler yapma gereği ortaya çıkmıştır. Bu bakımdan son yıllarda yüksek kazançlı ve yüksek verimli güç dönüştürücüleri üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Güneş enerjisi, tüm dünyada yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde önemli bir paya sahiptir ve önemini her geçen daha da artırmaktadır. Bu nedenle güneş enerjisi ve güneş enerji sistemlerinde kullanılan güç dönüştürücüleri üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Güneş enerjisi sistemlerinin gelişimine paralel olarak da-da ve da-ac dönüştürücülerinin de gelişimine devam etmektedir.

Son yıllarda güç dönüştürücülerin gerilim kazançlarını arttırmak üzerine önemli çalışmalar yapılmıştır. Çünkü güneş enerji sistemlerinin çıkış gerilimi oldukça düşük seviyededir. Düşük olan bu gerilim seviyesi, çeşitli yöntemlerle yüksek seviyelere çıkartılmaktadır. Güneş panellerinin çıkış gerilimi, panellerin paralel veya seri bağlanması yolu ile artırılır. Diğer bir yöntem ise panellerin her birinin çıkışında transformatörlü mikroeviriciler kullanılır. Böylece çıkış gerilimleri artırılıp şebeke gerilimi seviyesinde yüke veya şebekeye bağlanmaktadır. Bu yöntemlere ilaveten son yıllarda yeni nesil yüksek kazançlı da-da dönüştürücüler geliştirilmiştir. Yeni nesil da-da dönüştürücüler kullanılarak her bir panelin gerilimi, evirici giriş gerilimine uygun değere yükseltilir. Örnek olarak 24 volt civarında olan panel çıkış gerilimi, 250 volt ve üzerinde bir dc gerilime dönüştürülebilmektedir. Böylece her bir mikroeviricinin çıkış gerilimlerinin ayarlanması ile panellerin birbirinden bağımsız kontrol edilmesi sağlanmaktadır.

Hızlı teknolojik gelişmelere bağlı olarak enerji ihtiyacı oldukça artmıştır. Gerek endüstrileşme gerekse insanların daha rahat bir biçimde yaşama isteği enerjiye olan talebi artırmaktadır. Bu durum doğal olarak enerji maliyetlerine negatif yönde etki etmektedir. Hava kirliliğinin ve enerji maliyetlerinin giderek artması, küresel bir sorun haline gelmiştir. Uluslararası yapılan toplantılarda dünya genelindeki kirlilik nedeniyle artan sera gazlarının sebebi olarak, fosil yakıtların kullanımının artması önemli bir nokta olarak belirtilmiştir. Çözüm olarak güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, dalga enerjisi, yakıt hücreleri ve biyokütle gibi çevre dostu ve tükenmeyen, esnek yapıdaki yenilenebilir enerji kaynakları incelenmiştir (Chen ve ark., 2008; Ghalib ve ark.,2014). Örneğin okyanus dalgalarını kullanarak dalga enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren Dalga Enerjisi Dönüşüm Sistemi (Wave Energy Conversion System-WECS) oldukça önemlidir (Khalid ve ark., 2013). Sınırsız enerji kaynağı olmasına rağmen yenilenebilir enerji sistemlerinin en büyük dezavantajı ilk kurulum maliyetlerinin yüksek olmasıdır (Drew ve ark., 2009; Cecati ve ark.,2004).

Fotovoltaik-FV sistemler, artan elektrik talebimizi karşılayacak temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Enerji talebinin gün geçtikçe artması, yenilenebilir enerjiye küresel anlamda ilgi odağı olan FV teknolojilerin araştırılmasında ve geliştirilmesinde itici güç olmuştur. 2009 yılından günümüze kadar güneş enerji sistemlerine tahmini olarak 243 milyar dolar yatırım yapıldığı düşünülmektedir. FV sistemlerin, 2040 yılına kadar tüm yenilenebilir enerji kaynakları arasında elektrik üretimine önemli katkılar sağlaması beklenmektedir (Pervaiz ve ark., 2013). FV sistemler, en yaygın enerji dönüşüm sistemleri olarak kabul edilmektedir. 2010 yılı itibarıyla 100'den fazla ülkede elektrik üretiminde kullanılan ve en hızlı büyüyen enerji üretim teknolojisi olmuştur. Buna rağmen küresel ölçekte tüm kaynaklardan üretilen toplam 4.8 TW 'lık enerjinin küçük bir bölümünü teşkil etmektedir. 2004 ve 2009 yılları arasında şebekeye bağlı FV kapasitesi, yıllık ortalama yüzde 60'lık bir artışla 21 GW 'a kadar yükselmiştir. Şebeke dışı sistemlerin ise 3-4 GW civarında olduğu tahmin edilmektedir. FV sistemler, güneş enerjisini elektrik enerjisine doğrudan dönüştürebilmektedir. En büyük dezavantajları ise verimlerinin ve birim yüzey başına üretilen gücün düşük olmasıdır (wikipedia, 2021).

Dalga Enerjisi Dönüşüm Sistemi olan WECS'ler yakın gelecekte yenilenebilir enerji kaynakları arasında oldukça önemli bir yere sahip olacaktır. Ancak ticari olarak daha rekabetçi olmaları için henüz istenen verimlilikte değildir. Bu konuda kontrol mühendisliği çalışmaları yoğun biçimde sürdürülmektedir (Vale ve ark., 2007).

Günümüzde birçok WECS teknolojisi mevcut olmasına rağmen halen birçok belirsizlik mevcuttur (Amundarain ve ark., 2010). Dalga enerjisi dönüşümlerinde kullanılan dönüştürücüler farklı konfigürasyonlara sahiptir. Bu dönüştürücüler, değişken giriş gerilimine karşı çıkış gerilimini istenilen değerde tutmak için gerekli düzenlemeleri yapar (Krishna ve ark., 2010).

Rüzgâr enerjisi hareket halindeki havanın kinetik enerjisidir. Rüzgâr türbinleride rüzgâr dan bu kinetik enerjiyi mekanik güce dönüştürür. Bu mekanik güç bir generatör yardımı ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Rüzgâr türbin teknolojisi, 1980'li yıllarda birkaç kW kapasite ile başlamasına rağmen günümüzde MW seviyelerine ulaşmıştır. Başlangıçta rüzgâr türbinleri bağlı oldukları enerji şebekesini pek fazla etkilemezken şimdi büyük güçlerinden dolayı aktif bir rol oynamaktadır. Rüzgâr türbin teknolojisi yenilenebilir enerji sistemleri içerisinde adından çokça söz ettiren teknolojilerden biridir (lov ve ark., 2007; Raducu ve ark.,2008).

FV teknolojisi, güneşten gelen enerji ile elektrik enerjisi üretmede en iyi yöntem olarak kabul edilmektedir. Özel yarı iletken malzemeler kullanılarak oluşturulmuş FV hücreler, güneş enerjisini fotovoltaik etki prensibine göre elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Silisyum ve diğer yarıiletken malzemelerden üretilen güneş hücreleri, FV panellerin en temel bileşenidir. FV panellerden elde edilen güç, panel akımı ve geriliminin çarpımına eşittir. FV paneller doğrusal olmayan akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristiğine sahiptirler. Bu karakteristik eğriler standart test koşulları (standart test conditions-STC) olarak bilinen 1000 W/m<sup>2</sup> ışınım ve 25°C ortam sıcaklığı altında elde edilir. Işınım ve sıcaklıkta değişimler meydana geldiğinde panelin çıkış akımı ve gerilimi de bu durumdan etkilenir. Güneş hücrelerinin verimliliği %10-%15 arasındadır, bu nedenle yüksek güçlü elektrik enerjisi üretimi için güneş hücreleri geniş yüzey alanlarına ihtiyaç duymaktadır. FV paneller genel 36 ile 72 arasında hücreye sahip olacak şekilde üretilirler. Hücreler akım ve gerilim değerlerine göre birbirleriyle bağlanarak farklı boyutlarda ve güçte panelleri oluşturmaktadırlar. Paneller yaklaşık 0.5, 1 ve 1.7 m<sup>2</sup> boyutlarında üretilmektedir. FV paneller ilk olarak yörüngeli uydular ve uzay araçlarının enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılmıştır. Günümüzde ise On-Grid ve Off-Grid sistemler ile elektrik üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Walker and Sernia, 2004;Kramer ve ark., 2008). Atmosferik şartlar, mevsim değişiklikleri, yerküre hareketi, gölgelenme ve benzeri daha birçok faktöre bağlı olarak fotovoltaik sistemlerde kullanılan panellerin çıkış gerilimleri değişmektedir. Bu durum evirici girişindeki DC barada gerilim dalgalanmalarına ve evirici çıkışında gerilim dengesizliklerine yol

açmaktadır. Bunu önlemek için eviricinin girişinde yüksek kazançlı da-da dönüştürücü devreler kullanılmaktadır.

Güneş hücrelerinin çalışma sıcaklığı, yük durumuna ve ışınım durumlarına göre değişmektedir. FV sistemler doğrusal olmayan yapıya sahip olduklarından dolayı maksimum güç noktalarında meydana gelen değişimler da-da dönüştürücüler tarafından sürekli kontrol edilir (Park ve ark., 2000). da-da dönüştürücüler, FV sistemin mevcut hava koşullarında üretebileceği en yüksek gücü elde edebilecek şekilde tasarlanır ve kontrol edilirler. Evirici girişlerinde bulunan da-da dönüştürücüler, gruplandırılmış FV panellerin elde ettiği maksimum gücü eviriciye aktarmaktadır. FV sistemlerde maksimum güç noktasını yakalamak için kullanılan iki çeşit dönüştürücü tipi mevcuttur. Bunlar da-da dönüştürücüler ve da-aa-da dönüştürücülerdir (Tsukiyama and Fukuda, 2012; Nabil ve ark., 2005).

FV sistemlerde kullanılan yüksek kazançlı da-da dönüştürücüler, güneş panellerinin her biri için gerekli güç ölçümlerini yapmakta ve güneş panellerinde oluşan gölgelenme kayıpları önlenmektedir (Yaosuo ve ark., 2004). On-Grid sistemlerde panele entegre edilen mikroeviriciler üzerine son yıllarda pek çok araştırma yapılmıştır. Mikroeviriciler tek kademeli ve çift kademeli olmak üzere ikiye ayrılırlar. Tek kademeli mikroeviricilerde panellerden elde edilen DA gerilim sinüsoidal gerilime dönüştürülür. Yüksek verimli olmaları, az sayıda malzeme kullanılması tek kademeli mikroeviricilerin avantajlarıdır. En önemli dezavantajı ise girişteki yüksek akım dalgalanması nedeniyle büyük kapasitörlere ihtiyaç duymasıdır. Çift kademeli mikroeviriciler ise panellerden gelen DA gerilimi ilk önce bir da-da yapısı ile daha yüksek bir DA gerilime çevirirler. Daha sonra oluşturulan bu DA gerilim bir DA/AA yapısı ile alternatif gerilime evrilir. Burada kullanılan da-da çeviriciler genellikle it-çek, tam köprü, ya da üstüne bindirmeli çapraz topolojileridir (Quan ve Wolfs,2008; Rong-Jong ve ark.,2008). Mevcut da-da dönüştürücüler, düşük verimlilik ve sınırlı yükseltme oranına sahiptir. Bu sorunları aşmak için izole edilmiş anahtarlamalı bir kapasitör hücresi kullanan yeni bir yüksek kademeli da-da dönüştürücü incelenmiştir.(Do-Hyu ve ark., 2013). Dönüştürücüde transformatör ve orta uçlu indüktör ile entegrasyonu sağlamak için anahtarlamalı kapasitör hücresi kullanılmıştır. Yükselten dönüştürücü ve izole anahtarlamalı kapasitör hücresinin çıkışı seri olarak bağlanmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynakları içinde, yakıt pillerinin popülerliği gün geçtikçe artmaktadır. Yakıt pilleri, gerekli yakıt sağlandığı takdirde herhangi bir mevsimsel değişimden etkilenmeksizin sisteme sürekli olarak enerji verebilir. Yakıt pillerinin üretim

ve dağıtım sistemlerinde kullanımı generatör, mikro ve mini türbinlere göre çok cazip görünmektedir. Yakıt pillerinde elde edilen gerilim değeri düşük seviyede ve kararsız olduğundan yükseltici tip dönüştürücüleri kullanımını gerektirir.

Yükseltici da-da dönüştürücüler, girişine uygulanan doğru gerilimi yükselterek yüksek genlikte bir doğru gerilim elde edilen elektronik devrelerdir. Birçok çeşitleri olup güç elektroniği devrelerinin girişinde bulunan aa-da doğrultuculardan hemen sonra gelerek hem bara gerilimini yükseltmek, hem de belirlenen anahtarlama ile giriş güç katsayısını daha iyi duruma getirmek için kullanılmaktadır (Çakır, 2006). Anahtarlama kayıpları, temel olarak, bir yarı iletken güç anahtarının iletim ve kesime girme işlemleri esnasında, anahtar üzerinde aynı anda oluşan gerilim ve akım nedeniyle oluşan kayıplardır. Anahtarlama yapan eleman üzerinde oluşan anahtarlama kayıplarına parazitik kondansatörün deşarj enerji kaybı da eklenmekte, ayrıca ana diyotun ters toparlanma kayıpları da bu kayıplara ilave edilmektedir. Genel olarak yumuşak anahtarlama teknikleri, sıfır akımda anahtarlama-SAA, sıfır gerilimde anahtarlama-SGA, sıfır akımda geçiş-SAG ve sıfır gerilimde geçiş-SGG şeklinde sıralanabilir (Smith and Smedley, 2002; Bodur ve Bakan, 2002). Kuplajlı indüktörler kullanılan z-girişli da-da dönüştürücülerde, düşük doluluk oranlarında ve düşük gerilim değerlerinde yapılan anahtarlamalarda etkili gerilim kazançları elde edilirken aynı zamanda dönüştürücü çıkış ve giriş arasındaki yalıtım da sağlanmaktadır (Evrar, 2012).

### **1.1. Tezin Amacı**

FV güç sistemlerinin çıkış gerilimlerinin düşük seviyeli olması yükseltici tip da-da dönüştürücüleri ile beraber kullanılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Yapılan literatür taramasında, yükseltici tip dönüştürücüler üzerine oldukça fazla çalışma yapıldığı görülmüştür. Son yıllarda geliştirilen yüksek gerilim kazançlı da-da dönüştürücüler kullanılarak FV panelin çıkış gerilimi tek fazlı eviricinin giriş gerilim seviyelerine yaklaştırılmıştır. Böylece tek bir panelin, daha az yer kaplayan düşük hacimli bir da-da dönüştürücü ve evirici ile birlikte şebekeye bağlanması gerçekleştirilebilmiştir. Bu tez çalışmasıyla 25V giriş gerilimine ve 400V çıkış gerilimine sahip 200W gücündeki yüksek kazançlı bir da-da dönüştürücünün tasarımı, benzetim modelinin oluşturulması ve benzetim çalışmaları ile elde edilen sonuçların değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak dönüştürücünün matematiksel modeli oluşturulmuş ve bu model üzerinden dönüştürücünün farklı çalışma modları açıklanmıştır. Daha sonra matematiksel model yardımı ile MATLAB/Simulink modeli oluşturularak çeşitli benzetimler

yapılmıştır. Yapılan benzetim çalışmaları ile girişindeki düşük değerli FV panel geriliminden yüksek kazançlı çıkış geriliminin elde edilebildiği grafiklerle detaylı olarak gösterilmiştir.

## **1.2. Tezin Yapısı**

Bu tez çalışmasında düşük giriş gerilimine sahip bir da-da dönüştürücünün yüksek çıkış gerilimi üretmesi için bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan da-da dönüştürücüsünü benzetim çalışması gerçekleştirilerek istenilen çıkış geriliminin elde edilebildiği gösterilmiştir. Bu amaç ile tezin birinci bölümünde literatür taraması yapılmıştır. İkinci bölümde yenilenebilir enerji kaynakları, üçüncü bölümde fotovoltaik sistemler ve bu sistemlerde kullanılan bileşenler tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde mevcut durumda kullanılan da-da dönüştürücüler tanıtılmıştır. Beşinci bölümde tasarlanan yüksek kazançlı da-da dönüştürücü tanıtılmış, dc dönüştürücünün MATLAB/ Simulink ortamında benzetim modeli oluşturulmuş yapılan benzetimlerden elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Altıncı bölümde yapılan çalışmanın sonuçları, uygulanabilirliği ve literatüre olan katkısı tartışılmıştır.

## 2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Fosil yakıtlar sanayi devriminden beri birincil enerji kaynakları arasında en büyük tüketim oranına sahip olmuştur. Fakat yakın zamanda dünyamızın hızla artan bu tüketime sandığımız gibi cevap veremediği ve doğal ortamımızın yok olmaya başladığı birçok bilim adamı tarafından iddia edilmektedir. Bunlara ek olarak da geçmişte yaşanan petrol krizleri, fosil kaynakların tükendiği söylentileri ve ekonomik faktörler nedeniyle bu kaynaklara olan ilginin yavaş yavaş başka kaynaklara ve kavramlara kaymasına ve yeni çevre dostu seçenekler olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının gündeme gelmesine neden olmaktadır. Hidrojen teknolojilerinin geliştirilmesi, yenilenebilir enerji kaynakları ve yakıt hücreleri gibi farklı teknolojilerin kullanılması ile fosil yakıtların çevreye verdiği zararlar daha da azaltılabilir. Fosil enerji kaynaklarının azalması ile fiyat ve kullanım açısından yenilenebilir enerji kaynakları ile yer değiştirebileceği öngörülmektedir. Gelecekte fosil yakıtlar tükenmese bile, toplumların dünya var oldukça tükenmeyecek yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanacağı ve enerjinin verimli kullanılması ile elektrik üretiminde CO<sub>2</sub> emisyonlarının azalacağı tahmin edilmektedir. Yakın gelecekte fosil enerji kaynaklarına yerine geçecek olan yenilenebilir enerji kaynakları yedi başlıkta incelenmiştir.

### 2.1. Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr türbinleri ile ilgili olarak, en eski rüzgâr enerjisi makinesinin yel değirmeni olduğu ve 3000 yıl önce İskenderiye yakınlarında yapıldığını öngörmektedir. Mısır, İran ve Uzak Doğu'da görülen yel değirmenleri, Haçlı Seferleri sırasında Orta Doğu medeniyetlerinden Avrupa'ya geçtiğini göstermektedir (Özgener, 2002). M.S.12. yüzyılda yel değirmenleri ilk defa Fransa, İngiltere ve Hollanda'da kullanılmaya başlandı. M.S 19. yüzyılın sonlarında ve M.S. 20. yüzyılda yel değirmenleri ile kuyudan su çekme ve elektrik elde etme gibi uygulamalar ortaya çıkmıştır (Hayli, 2001). 1891 yılında elektrik üreten ilk rüzgâr türbini Dane Poul LaCour tarafından üretilmiştir. Ama bu süreçte rüzgâr türbini teknolojisini geliştirmek için de çalışmalar yapılmıştır. 1942'de üretilen 17.5 m kanat çaplı ve 50 kW nominal güce sahip Smidth rüzgar türbini ile 1957 yılında 24 m kanat çaplı ve 200 kW nominal güce sahip Gedser rüzgar türbini örnek olarak verilebilir (Özgener, 2002). 1990'ların sonunda rüzgâr enerjisi en hızlı büyüyen ve en önemli enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir. Son teknolojik gelişmeler rüzgâr türbinlerini daha verimli, uygun maliyetli ve güvenilir hale getirmiştir. 50-100 kW'lık

küçük-orta ölçekli sistemler yerine artık 1 MW ve daha büyük sistemler kullanılmaktadır (Yılmaz, 2008). Günümüzde türbinlerinin güç kapasitesi 8 MW'a, kanat çapı ise 164 m'ye kadar ulaşmaktadır. Fosil yakıtlar kullanılarak elektrik enerjisi üretiminin neden olduğu çevresel problemler rüzgâr enerjisinde bulunmamaktadır. Araştırmalarda 500 kW'lık bir rüzgâr türbininin 57.000 ağacın yaptığı CO<sub>2</sub> temizleme işine eşdeğer bir iş yaptığı tespit edilmiştir. Ayrıca 2025 yılına kadar dünyadaki elektrik enerjisi ihtiyacının sadece % 10'u rüzgâr enerjisinden karşılanabilirse, atmosfere salınan CO<sub>2</sub> emisyonunun yılda 1.41 Gton azalacağı tahmin edilmektedir (Aydın, 2013). Rüzgâr türbinleri ilk yatırım aşamasında yüksek maliyet gerektirse de hammaddeye ihtiyaç duymazlar. Türbinlerin işletme maliyetleri de çok düşüktür.

Rüzgâr türbinleri, termik ve hidrolik enerji santralleri ile ekonomik olarak rekabet edebilecek seviyeye ulaşmıştır. 2011 yılı verilerine göre kilowatt-saat başına yaklaşık 4.5-6 cent'e mal olan rüzgâr türbin maliyetlerinin zamanla daha da düşeceği tahmin edilmektedir. İlk yatırım maliyeti açısından, bir türbinin fiyatı ABD iç piyasasında en az 750 \$/kW, Avrupa'da 1000-1500 \$/kW seviyelerindedir. Dünya pazarında artan rekabet nedeniyle bu fiyatların özellikle Avrupa'da 1000 \$/kW'ın altına düşeceği tahmin edilmektedir (Aydın, 2013; Şenel, 2012). Bir rüzgâr türbini yaklaşık 8 bin farklı bileşenden oluşmaktadır. Türbin ana bileşenlerinin türbin maliyeti içerisindeki payları sırasıyla kule (% 26.3), kanatlar (% 22.2), dişli kutusu (% 12.91), güç dönüştürücü (% 5.01), trafo (% 3.59), jeneratör (% 3.44), gövde (% 2.8) ve kanat açma kontrol sistemi (% 2.66) şeklindedir. Ülkemizde göbek, kanat, jeneratör, dişli kutusu gibi türbin bileşenlerinin çoğu ithal edilmektedir. Rüzgâr türbininde kullanılan kuleler nakliye maliyetlerinden dolayı genellikle projelerin yer aldığı yerel piyasada üretilmektedir (Altuntaşoğlu, 2012). Rüzgâr enerji santralleri çok geniş yer kaplıyor gibi görünmesine rağmen santralde türbinlerin kapladığı alan, toplam alanın yaklaşık %1-1.2'si düzeyindedir. Rüzgâr türbinlerinin birim kurulu güç başına toplam alan ihtiyacı 0.1-0.2 km<sup>2</sup>/MW seviyesindedir. Kalan kısım tarım ve hayvancılık için kullanılabilir. Rüzgâr türbinleri ile enerji üretimi aynı zamanda dışa bağımlılığı da azaltmaktadır (Aydın, 2013; Çolak ve Demirtaş, 2008). Yürütülmekte olan "Ulusal Rüzgâr Enerjisi Sistemleri Geliştirme ve Prototip Türbin Üretimi-MİLRES" projesi kapsamında ülkemizde büyük güç kapasiteli (>2MW) rüzgâr türbinlerinin üretilmesi hedeflenmektedir. Rüzgâr enerji santrallerinde oluşabilecek en önemli çevresel etki olarak gürültü gösterilmektedir. Bu yüzden, santraller yerleşimin olmadığı veya rakım farklılıkları nedeniyle gürültünün çok az hissedildiği yerlere kurulmaktadır (Aydın, 2013; Şenel, 2012).

## 2.2. Hidrojen Enerjisi

Temiz bir yakıt olan hidrojenin kullanıldığı enerji sistemlerinde, atmosfere sadece su veya su buharı bırakılır. Hidrojenden enerji elde edilirken su buharı dışında çevreyi kirletebilecek ve sera etkisini artırabilecek hiçbir gaz ve zararlı kimyasallar üretilmemektedir. Hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı ve kimyasal enerjinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistemlere yakıt hücreleri denir. Bu sistemlerde, doğrudan veya dolaylı olarak bir kaynak tarafından sisteme hidrojen verilerek enerji üretilir. Hidrojen evrende en çok bulunan yanıcı bir gazdır. Fakat serbest olarak değil, su molekülü içerisinde. Bu nedenle okyanuslar, göller, nehirler en önemli hidrojen kaynaklarıdır.

Hidrojen, doğal bir yakıt olmayıp birincil enerji kaynaklarından elde edilebilen sentetik bir yakıttır. Karbon içermediği için fosil yakıtların neden olduğu sera etkisi, kirli hava ve asit yağmurları gibi çevresel sorunları yaratmaz. Isınmadan elektrik üretimine kadar çeşitli alanlarda kullanılabilir. Depolanabilir ve taşınabilir olması, kullanım alanının çok geniş olmasını sağlar. Ancak kolay sızabildiği için hidrojenin korunması ve kapalı yerlerde uzun süre tutulması oldukça zordur. Enerji üretiminde kullanılan hidrojen gazının son derece saf olması gerekir. Saflaştırma işlemi maliyeti artıran en önemli süreçtir. Enerjinin üretildiği yakıt hücreleri ve hidrojenin depolandığı tankların hacmi geniş yer kaplamaktadır. Bunlar hidrojen enerjisinin dezavantajları olarak bilinmektedir (Kılınç, 2008).

Son yıllarda yakıt pilleri üzerine oldukça fazla akademik çalışma yapılmıştır. İlk yakıt pili çalışmaları 1838 yılında Sir William Grove tarafından  $H_2-O_2$  pili üzerinde yapılmıştır. Yakıt pilinin ilk kez 1958 yılında NASA'nın uzay programında Apollo, Gemini ve Space Shuttle uzay gemilerinde kullanıldığı bilinmektedir (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2003). Yakıt pillerinin geleceğin enerji sistemleri olacağı düşünülmektedir. Ülkemizde de birçok çalışma yapılmaktadır. Sodyum bor hidrür üretimi ve doğrudan sodyum bor hidrürlü yakıt pili üretimi gerçekleştirilmiştir. Askeri uygulamalarda kullanılması için T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenen proje ile daha hafif ve uzun ömürlü yakıt pillerinin tasarımı amaçlanmıştır (İnger ve ark., 2006). TÜBİTAK-MAM tarafından desteklenen birçok projede, askeri ve sivil alanlarda kullanılabilen yakıt pili teknolojileri üretilmiştir (Karadağ, 2006). Bunun dışında ülkemizde bazı özel firmalar da yakıt pili teknolojilerinin geliştirilmesi için yatırım yapmaktadır. VESTEL firması bu amaçla birçok projede yer almıştır. VESTEL

Savunma Sanayi A.Ş. , Katı Oksit Yakıt Pili-KOYP hücre ve stack geliştirme konusunda önemli bilgi birikimine sahiptir. Membran üretimi, KOYP hücre ve stack tasarımı, sodyum bor hidrürden hidrojen üretimi ve Proton Exchange Membrane-PEM yakıt pilleri konularında ulusal ve uluslararası yayınlar üretmiş ve birçok patentin sahibi olmuştur (vestelsavunma, 2021). Ayrıca Gebze Teknik Üniversitesi, Niğde Üniversitesi ve Sabancı Üniversitesi gibi birçok üniversitemizde de yakıt pili teknolojilerinin geliştirilmesi için akademik çalışmalar yapılmaktadır.

Elektrolizin ters reaksiyonu olarak da tanımlanabilecek olan yakıt pili reaksiyonu sonrasında, doğru akım formunda elektrik enerjisi üretilir (Sayar, 2008). Temel olarak bir yakıt pili; elektrolit ve bunun her bir yüzeyi ile temas halinde bulunan geçirgen-gözenekli yapıda bulunan anot ve katot elektrotlardan oluşur. Yani elektrotlar geçirgen ve gözenekli yapıdadır ve elektrotların arasında elektrolit yer alır. Yakıt pilinin anot kutbuna gaz yakıt, katot kutbuna ise oksitleyici hava ya da oksijen gönderilir. Gönderilen bu yakıt ve havanın elektrokimyasal reaksiyonu sonucunda anot ve katot arasında oluşan potansiyel farkı, bir elektron akışını ve elektriksel gerilimi meydana getirir. Yakıt pillerinin avantaj ve dezavantajları şunlardır.

*Avantajları:* Yakıt pilleri yüksek verimlilikleri dışında, hareketli parça içermeme, sessiz çalışma, modüler, kompakt yapılı, geniş yakıt yelpazesi ile çalışabilme (doğal gaz, LPG, metanol, etanol), düşük emisyon, yüksek güvenilirlik, kolay kurulum, hızlı enerji dönüşümü gibi avantajlara sahiptir.

*Dezavantajları:* Yüksek maliyet, büyük hacim ya da ağırlıkta yakıt depolama gereksinimi, direkt hidrojen kullanımı halinde yüksek yakıt fiyatı, kullanım ömürlerinin tam olarak bilinmemesi olarak özetlenebilir.

### **2.3. Hidrolik Enerji**

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan hidrolik enerji, teknolojik gelişimi en ileri düzeyde olan enerji kaynağıdır. Hidrolik enerjinin kaynağı sudur. Hidroelektrik santraller akan suyun gücünü elektriğe dönüştürürler. Akan su içindeki enerji miktarını, suyun akış ya da düşüş hızı belirler. Büyük bir nehirde akan su büyük miktarda enerji taşımaktadır. Ya da su çok yüksek bir noktadan düşürüldüğünde de yine yüksek miktarda enerji elde edilmektedir. Her iki yolla da kanal ya da borular içine alınan su, türbinlere doğru akar, elektrik üretimi için pervane biçiminde kolları olan türbinlerin dönmesini sağlar. Türbinler jeneratörlere bağlıdır ve mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler. Yakıt kullanmadığı için kirliliğe neden olmaz. Türkiye’de akarsuların

eğimi fazla olduğu için akarsular yoluyla erozyon ciddi bir tehlikedir. Hidroelektrik santraller için yapılan barajlar suyun hızını keserek erozyonun durdurulmasında önemli rol oynarlar. İstihdam, sulu tarım, taşımacılık, su sporları gibi sosyal ve ekonomik faydalar da sağlarlar. Bununla birlikte, hidroelektrik enerjinin birçok dezavantajı da vardır. Kuruluş maliyetleri yüksek, inşaat süreleri uzundur. Barajlar çevresindeki bölgenin ekolojisini değiştirir. Hidrolik enerjinin, hidrolojik ve biyolojik bakımdan çevreye etkileri vardır. Baraj gölünün geniş yüzey alanı buharlaşmayı artırmakta, tarım arazilerinde tuzlanma ve çoraklaşma olmakta, sudan kaynaklanan paraziter hastalıklar artmaktadır. Hidrolojik rejimde değişiklik olmakta, zorla göç yaşanabilmektedir. Sıcaklık, yağış, rüzgâr rejimleri değişmekte ve yöredeki doğal bitki örtüsü ile su ve kara canlılarının yaşam alanında değişiklik olmaktadır. Doğal fay hareketlerini etkileyerek deprem oluşum riskini artırmaktadır. Ayrıca tabiat ve tarih varlıklarının korunamaması sonucu kültürel değerlerin kaybı da söz konusu olabilmektedir (Tunay ve Mehmet, 2001).

#### **2.4. Jeotermal Enerji**

Jeotermal kelimesi Yunanca geo (Dünya) ve termal (ısı) kelimesinin birleşimidir (İnce, 2005). Jeotermal enerji, temelde dünyanın alt katmanlarında bulunan ve önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilen bir tür ısı enerjidir (Dur, 2005). Jeotermal enerji, yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde bulunan ve yeryüzündeki havzalardan beslenen sular ile potansiyelini oluşturmaktadır. Ayrıca bünyesinde daha çok erimiş mineral tuzlar ve gazlar içeren su ve buhardan oluşan bir hidrotermal küttedir. Yeraltındaki bazı granit gibi sert kayaların oluşturduğu sistemlerde, bünyelerinde su içermemesine rağmen bir jeotermal enerji kaynağı olarak nitelendirilir (Şen, 2006). Bu kayalar herhangi bir akışkan içermemesine rağmen bazı teknik yöntemlerle ısısından yararlanılan, yerin derinliklerindeki sıcak kuru kayalardır. En geniş anlamda yerkabuğunda depolanan ısı enerjisi, jeotermal enerjiyi oluşturmaktadır (Etemoğlu ve ark., 2004). Yerküredeki termal rejimler kaynak tiplerine göre sınıflandırılır. Bunlar sırasıyla hidrotermal enerji, basınçlı yer altı enerjisi, magma enerjisi, sıcak kuru kaya enerjisi ve yerküre enerjisidir. Yerküre enerjisi yerkabuğuna yakın bölgelerde oluşan bir ısı enerjidir. Genellikle endüstriyel ısı ihtiyaçlarımızı karşılamada, konutların ısıtılması ve soğutulması ve sıcak su ihtiyaçlarımızı karşılamada kullanılır (Arslan, 2006). Jeotermal enerjinin kullanım alanlarını doğrudan ve dolaylı kullanım olarak ikiye ayırmak mümkündür (Yiğit, 1994). 150°C altındaki termal enerji sera, bölge ısıtma, sulu tarım,

endüstriyel işlemler gibi alanlarda doğrudan kullanılmaktadır. Jeotermal enerji ile elektrik üretimi ise dolaylı kullanıma örnek olarak verilebilir.

## **2.5. Biyokütle Enerjisi**

Genel olarak biyokütle kolay elde edilen bir enerji kaynağıdır. Odun, odun kömürü, hayvan ve insan dışkı; tarım ürünleri ve orman sektörü organik atıkları, alkol ve metan mayalanması; çeşitli su bitkileri gibi canlı biyolojik kaynaklar yolu ile elde edilen enerji türüne biyokütle enerjisi denilmektedir. Daha çok ısınma amaçlı kullanılan bu enerjinin en eski bilinen hammaddesi yakacak odun, odun kömürü ve hayvan gübresidir. Klasik yakma işlemi ile elde edilen bu tip biyokütle enerjisinin yanında; enerji tarımı ürünlerinden, kentsel atıklardan, tarımsal endüstri atıklarından yakma işlemi ya da farklı teknikler kullanılarak katı, gaz ve sıvı yakıtlara çevrilerek biyokütle yakıt elde edilmesi, ısı ve elektrik üretilmesi mümkün olmaktadır. Türkiye biyokütle materyal üretimi açısından, güneşlenme ve alan kullanılabilirliği, su kaynakları, iklim koşulları gibi özellikleri uygun olan bir ülkedir. Ancak, ülkenin tüm yetiştiricilik alanlarının yıl boyu yalnızca biyokütle yakıt üretim amacıyla kullanılması olanaklı değildir (Şen, 2006).

## **2.6. Dalga Enerjisi**

Dalga enerjisi aslında güneş enerjisinin bir başka formudur. Dalgalar, güneşin dünyayı ısıtmasıyla ortaya çıkan rüzgârlar tarafından oluşturulur. Dünyanın geometrik yapısı nedeniyle güneş dünyanın her noktasını aynı şekilde ısıtmaz. Bazı bölgeler ısıyı daha iyi bir açıyla alır ve diğer yerlerden fazla ısınır. Isındıkça havanın yoğunluğu azalır, hafifler ve yukarı çıkar. Isınan havanın terk edip boşalttığı yere daha yoğun ve soğuk olan hava çöker. Bu hava dolaşımı rüzgârı oluşturur. Su yüzeyi boyunca hızla esen rüzgâr sürtünme nedeniyle küçük dalgalanmalara da neden olur. Bu küçük dalgacıklar devam eden rüzgâr boyunca çığ gibi büyüyerek daha büyük dalgaları oluştururlar. Yani temel olarak güneş enerjisi rüzgâra, rüzgâr da dalgaya dönüşmektedir. Böylece dalga enerjisi suyun muazzam kuvvetinden insanın faydalanabilmesini sağlar.

Deniz dalgalarının gücünün diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre 10-15 kat daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Bulduğu yere göre değişmekle birlikte günlük ortalama güneş enerjisi, metrekare başına 100 W'tır. İdeal koşullarda 1 kW elektrik üretimi için 10 m<sup>2</sup> bir alan gerekmektedir. Rüzgâr enerjisi ile aynı miktarda elektrik üretimi için 2 m<sup>2</sup> alan gerekli iken dalga gücü için bu alan sadece 1 m<sup>2</sup> 'dir (uni-leipzig, 2021). Fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltması, küresel ısınmayı ve çevre kirliliğini

dolaylı olarak azaltması dalga enerjisinin diğer olumlu yönleridir. Bununla birlikte; deniz dalgasının kullanılmasında birtakım sınırlamalar da bulunmaktadır. Her dalga boyutunun kullanılması için bir tasarımın oluşturulamaması, gemi rotalarının geçtiği yollar, askeri tatbikatlar, balık avlanma sahaları, su altı kabloları gibi kısıtlamalar büyük dalga enerjisi projelerine başlamadan önce dikkate alınması gereken hususlardır (cevrebilinci, 2021).

## 2.7. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi güneşte meydana gelen nükleer patlamalar sonucunda ortaya çıkar. Açığa çıkan bu enerjinin çok küçük bir kısmı dünyaya elektromanyetik ışınım olarak ulaşmaktadır. Dünyaya ulaşan enerjinin bir kısmı atmosfer tarafından yansıtılır ve bir kısmı da absorbe edilir. Kalan enerjinin büyük bölümü ise yeryüzüne ulaşarak yerkürenin ısı kaynağını oluşturur. Dünya üzerinde olan tüm doğa olaylarının %99.98'i bu durumdan dolayı gerçekleşir. Sonuç olarak güneş, tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının oluşabilmesinin ana sebebidir. Güneş tarafından dünyaya bir yılda gelen enerji miktarı, küresel olarak kullanılan fosil enerji kaynaklarından bir yılda elde edilen enerji miktarının 10 bin katına eşdeğerdir. Ülkemiz dünya üzerinde 36°-42° kuzey enlemleri ve 26°-45° doğu boylamları arasında bulunmaktadır. Türkiye'nin ortalama güneş ışınımı 1303 kWh/m<sup>2</sup> yıl, ortalama güneşlenme süresi ise 2623 saattir. Bu rakam günlük 3.6 kWh/m<sup>2</sup> güce eşdeğerdir. Güneşlenme süresi günlük yaklaşık olarak 7.2 saat olup, toplamda ise 110 günlük bir güneşlenme süresine denk gelmektedir. Yıllık 26.2 milyon ton eşdeğer petrol-TEP enerji potansiyeli mevcuttur. Türkiye güneş enerjisinden yılın on ayı boyunca ülke yüzölçümünün %63'ünden ve tüm yıl boyunca %17'inden yararlanabilir (mimo ve guinessistemleri, 2021). Ülkemiz, 2015 verilerine göre enerji tüketimi sıralamasında 263.828 GWh ile dünyanın 16. ülkesidir (Ghalib ve ark. 2014). Tükettiği enerjinin %76.2'lik oranını ithal etmektedir. 2015 verilerine göre yenilenebilir enerjinin dünyada kullanım oranı %2.8 olduğu halde Türkiye' de yenilenebilir enerji kullanım oranı sadece %1'dir. Türkiye tükettiği enerjinin %87'lik oranını fosil yakıtlarından elde etmektedir (mimo, 2020).

Güneş hücreleri, yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken maddelerdir. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş hücreleri alanları genellikle 100 cm<sup>2</sup> civarında, kalınlıkları ise 0.1-0.4 mm arasındadır. Güneş hücreleri fotovoltaiik ilkeye dayalı olarak çalışırlar, yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş hücresi birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey

üzerine monte edilir, bu yapıya güneş hücresi modülü ya da fotovoltaik modül adı verilir. Güç talebine bağlı olarak modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak bir kaç watt'tan megawatt'lara kadar sistem oluşturulur (Iov ve ark., 2007; enerji, 2021).

Güneşin ısı etkisi ile enerji üretiminde kullanılan düzlemsel güneş kolektörleri, güneş enerjisinin toplandığı ve herhangi bir akışkana aktarıldığı çeşitli tür ve biçimlerdeki aygıtlardır. Ulaştıkları sıcaklık 70°C civarındadır. Absorban plakanın yüzeyi genellikle koyu renkte olup bazen seçiciliği artıran bir madde ile kaplanır. Güneş kolektörlü sistemler tabii dolaşım ve pompalı olmak üzere ikiye ayrılır (enerji, 2021). Güneş enerjisi uygulamalarında düzlemsel güneş kolektör sistemlerinin yanı sıra daha yüksek sıcaklıklara ulaşmak için yoğunlaştırıcı kolektör sistemleri de kullanılmaktadır. Bu tür kolektörlerde güneş enerjisi, yansıtıcı veya ışın kırıcı yüzeyler yardımı ile doğrusal ya da noktasal olarak yoğunlaştırılabilir (Tufan, 2010). Enerjiyi toplamak için absorban boruda ısı transfer akışkanı olarak ısı transfer yağı kullanılmakla birlikte, çevreye zarar vermeyen ve daha ucuz olan suyun kullanılmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir. Bu sistemlerde yüksek yoğunlaştırma kapasitesi sayesinde 350-400°C gibi yüksek sıcaklıklara ulaşılmaktadır (enerji, 2021). Parabolik çanak kolektörlerin, çeşitli ticari tasarımları son on yılda elektrik üretimi için geliştirilmektedir. 7.5 m çapında esnek metal membran odaklayıcı, bir Alman firması tarafından geliştirilmiştir. Bu membran su yükü uygulanarak ve bölgesel vakumlama ile plastik deformasyona uğratarak parabol şeklini alır. Parabolik çanak kolektörlerde kullanılan odaklayıcı, iki noktadan montajlanarak asılmaktadır ve dikey ekseninde dönerek günlük, yatay ekseninde dönerek ise mevsimsel olarak güneşi takip eder. Işınım değeri 800 W/m<sup>2</sup> ise 27 kW gibi bir enerji alıcıda absorbe edilir. Odağa yerleştirilen ve enerji dönüştürme verimi 0.3 olan bir Stirling makinası, bu ısı girişini 8 kW'e enerjiye dönüştürür. "Heliostat" adı verilen güneş enerji sistemleri, büyük bir alana yerleştirilmiş yüzlerce yansıtıcı güneşten gelen ışınları heliostat tesisinin merkezindeki kulenin tepesine odaklar. Bu odaklama bölgesinde yoğunlaştırarak elde edilen yüksek ısı enerjisi elektrik enerjisine çevrilir. Bu sisteminde, 290°C'da sıvı haldeki tuz eriyiği, soğuk depolama tankından alıcıya doğru pompalanır. Burada sıcaklığı 565°C'ye kadar çıkarılarak sıcak depolama tankına gönderilir. Tesisten güç çekileceği zaman sıcak tuz, klasik bir Rankine çevrim türbini sistemi için aşırı kızdırılmış buhar üreten bir buhar üretme sistemine pompalanır. Buhar jeneratöründeki tuz soğuk tanka geri dönerek depolanır ve sonunda da alıcıda yeniden kızdırılır (Tabak ve ark., 2021).

### 3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

FV hücreler, yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken malzemelerden üretilmektedir. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen bu hücrelerin alanları genellikle 100 cm<sup>2</sup> civarında, kalınlıkları ise 0.1-0.4 mm arasındadır. Güneş hücreleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar. Yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında bir potansiyel fark oluşur. Güneş enerjisi, güneş hücresinin yapısına bağlı olarak %5 ile %30 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir. Güç üretimini artırmak amacıyla çok sayıda güneş hücresi birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir. Bu yapıya güneş hücresi modülü ya da FV modül adı verilir. Yine güç talebine bağlı olarak modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak bir kaç watt'tan MW'lara kadar yüksek güçlü sistemler oluşturulur (enerji, 2021). FV hücreler doğrusal olmayan akım-gerilim karakteristiğine sahiptir. Işınım ve sıcaklığa bağlı olarak en yüksek gücü üretebildikleri bir tepe noktasına sahiptir. Bu nokta Maksimum Güç Noktası-MGN olarak adlandırılır. Verimleri düşük olduğundan yüksek güçlü elektrik enerjisi üretimi için geniş yüzey alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Standart bir güneş paneli yaklaşık 36-72 hücreye sahiptir. Boyutları 0.5-1.7 m<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Yüzey alanları ile doğru orantılı olarak güç üretirler. FV paneller ilk olarak yörüngeli uydular ve uzay araçlarının enerji ihtiyacını karşılama için kullanılmıştır. Günümüzde ise FV paneller şebeke bağlantılı (On-Grid) ve şebekeden bağımsız (Off-Grid) sistemlerde elektrik enerjisi üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

On-Grid sistemlerde kullanıcı tarafından tüketilen enerji, FV sistemin üretmiş olduğu enerjiden karşılanmaktadır. Tüketimin üretimden fazla olduğu durumlarda kullanıcı tüketim fazlası enerjiyi şebekeden alırken, kullanıcının tüketimi üretiminden az olduğu durumlarda ise üretim fazlası enerji ile şebeke beslenmektedir (Turan, 2015). Bu sistemler şebekeye bağlı olarak çalıştığı için elektrik üretildiği yerde tüketilmektedir. Tüketilmeyen enerji şebekeye geri verilmektedir. Enerji depolama imkânı olmadığı için ilk kurulum maliyetleri daha uygundur (Bedeloğlu ve ark., 2010).

Off-Grid sistemler ise, şebeke enerjisine ulaşamayan durumlarda kullanılacak en pratik sistemlerdir. Off-Grid sistemlerde toplanan enerji istendiğinde depolanabilir ve kullanıma hazır hale getirilebilir. Bu sistemde güneşin yetersiz kaldığı durumlarda veya geceleri kullanılmak üzere akü grupları bulunmaktadır. Akü grubunun şarj ve deşarj sırasında zarar görmesini engellemek için denetim birimi olarak şarj regülatörleri

kullanılmaktadır. Bu ünite, bataryadaki duruma bağlı olarak FV panellerden gelen akımı veya yükün çektiği akımı kesmektedir. FV panellerden elde edilen doğru gerilimi alternatif gerilime dönüştürmek için eviriciler kullanılır. Şarj denetleyiciler akünün şarj durumunu kontrol ederek aşırı şarj olmasını ya da akünün boşalmasını engellemektedir (Koroğlu ve ark., 2010).

*On-Grid sistemlerin avantajları:* Enerji üretildiği yerde tüketilir ya da fazlası ücret karşılığında şebekeye aktarılabilir. Işınımın yetersiz olduğu ve üretimin hiç olmadığı gece boyunca enerji ihtiyacı şebekeden karşılanabilir. Farklı ölçeklerde kurulum sağlanabilir. Şebeke bağlantısı olmayan sistemlere göre oldukça kullanışlıdır.

*Off-Grid Sistemlerin Avantajları:* Şebekenin olmadığı durumlarda ekonomik çözümler sunar. Şebeke bağlantı maliyetleri oldukça yüksektir. Yakıt maliyeti yoktur. Kurulumu kolaydır. Esnek kurulum maliyetine sahiptir (Keskin ve ark., 2011).

Fotovoltaik sistemlerin genel bileşenleri olan FV panel, evirici, depolama amaçlı kullanılan aküler ve da-da dönüştürücüler aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır.

### **3.1. Fotovoltaik Panel**

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üreten güneş panelleri, yarı iletken malzemelerin ışığa maruz kalma prensibine göre çalışan katmanlı bir yapıya sahiptir. Bu yapı, üzerine düşen güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür. Hücre katmanının en üst kısmı, güneş ışınlarının hücreye girebilmesi için yansıma önleyici anti yansıtıcı kaplama olan ARC(Anti-reflective coating) katmanıdır. ARC katmanının altında fosforlu malzeme ile katkılı olan n-tipi bir tabaka daha vardır. Bu katmanda silisyum atomları ile fosfor atomları yer değiştirerek elektron hareketi meydana getirirler. Bu tabakanın altına bor katkılı p-tipi bir tabaka daha yerleştirilir. Bu katmandan sonra bor atomlarının yerini silisyum atomları alır ve bunun sonucunda milyonlarca hareketli elektron, elektrik akımını oluşturur (Ranabhat ve ark., 2016). Silisyum, FV sistemlerde en çok kullanılan yarı iletken malzemedir. Ancak doğada oksijenden sonra en sık rastlanan element olmasına rağmen saf halde bulunmamaktadır (Kekezoğlu, 2007). FV hücreler genel olarak monokristal, polikristal ve ince film hücreler başlıkları altında sınıflandırılır.

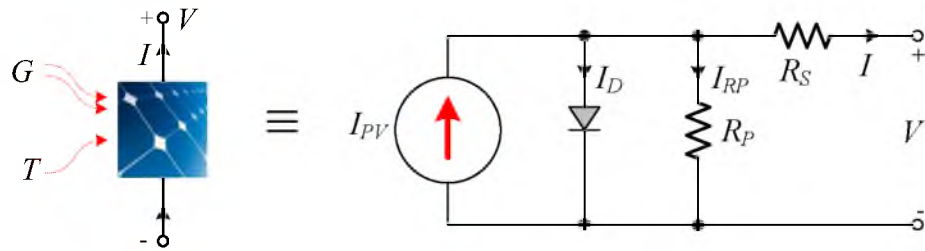
Monokristal hücrelerin verimi %17 civarında olup üretiminde silisyum hammaddesi kullanılmaktadır. Silisyum, doğada kum veya kuvars şeklinde bulunmaktadır. Silika, daha yüksek silisyum oranına (%91) sahip olan kuvarsın işlenmesiyle elde edilmektedir. Silikanın, silisyuma dönüşmesi için birçok kimyasal

işlemden geçmesi gerekir. Silisyum arıtma işlemlerine tabi tutularak malzemenin yarı iletken özelliği artırılır. Saflaştırılan silisyum tekrar eritilip bir dizi işlemden geçtikten sonra bir monokristal yapı elde edilmektedir.

Polikristal hücreler yaklaşık %16'lık bir verime sahiptir. Bu tip hücrelerin üretim süresi monokristal hücre üretim sürecinden daha kısadır ve ayrıca üretim süreçlerinin karmaşıklığı daha azdır. Bu hücrelerin üretiminde kullanılan silisyum yüksek sıcaklıkta eritilir ve elde edilen çözelti kalıplara dökülerek polikristal hücre elde edilir. Polikristal hücredeki silisyumun kristal kafesinin farklı boyutları, genel hücre verimliliğini olumsuz yönde etkiler. Bu hücrenin üretiminde kalıplara dökülmesi sonucu elde edilen Wafer yapılarının verimliliği monokristal yapılara göre daha düşüktür (Nayan evark., 2015).

İnce Film hücreler ise monokristal ve polikristal hücrelere göre daha az verimli hücrelerdir. Bunlardan üretilen FV modüllerin verimliliği %12 civarındadır. Polikristal hücrelerde olduğu gibi, hücreyi oluşturan kristal kafeslerin boyutlarındaki farklılık hücre içi elektron akışını engeller. Bu tür yapılarda, hücre katmanlarının metal oksit yapılarla birleştirilmesi sonucunda kısmen daha büyük verimli hücreler elde edilebilir (Yang ve ark., 2014).

Bir FV hücrenin modeli şekil 3.1' de görülmektedir. Bu FV hücresi modeli bir akım kaynağı, bu akım kaynağına ters ve paralel bağlanmış bir diyot ile paralel bağlı bir direnç ve seri bağlı bir dirençten oluşmaktadır (Gündoğdu ve Çelikel, 2020). Eşitlik 3.1 ile eşitlik 3.3 arasında FV hücrenin matematiksel denklemleri verilmiştir.



Şekil 3.1 FV hücrenin elektriksel eşdeğer devre modeli

$$I = I_{PV} - I_D - I_{RP} \quad (3.1)$$

$$I = I_{PV} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V+R_S I}{a}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_S I}{R_P} \quad (3.2)$$

$$a = \frac{N_s n k T}{q} \quad (3.3)$$

Burada  $I_0$ , diyotun ters yöndeki saturasyon akımı veya sızıntı akımı olarak adlandırılır.  $a$  idealite faktörü,  $N_s$  seri bağlı hücre sayısı,  $n$  diyot idealite sabiti,  $k$  Boltzmann sabiti

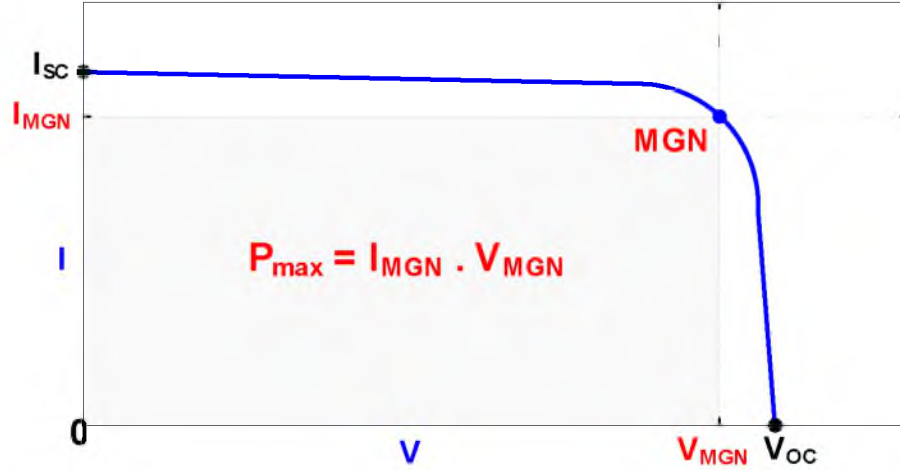
( $1.3806503 \times 10^{-23}$  J/K),  $T$  hücre sıcaklığını (Kelvin) ve  $q$  elektron yükünü ( $1.60217646 \times 10^{-19}$  C) göstermektedir. Işığın etkisi ile FV hücresi tarafından üretilen akım eşitlik 3.4' te verilmiştir.

$$I_{PV} = \left( I_{PV,n} + K_I(T - T_n) \right) \frac{G}{G_n} \quad (3.4)$$

Burada  $I_{PV,n}$ ,  $25$  °C ve  $1000$  W/m<sup>2</sup> için üretilen akımı,  $T_n$  nominal sıcaklığı (Kelvin),  $G$  panel yüzeyindeki radyasyon değerini (W/m<sup>2</sup>) ve  $G_n$  nominal radyasyon değerini (W/m<sup>2</sup>) ifade etmektedir. Diyotun saturasyon akımı  $I_0$  eşitlik 3.5' te verilmiştir.

$$I_0 = \frac{I_{SC,n} + K_I(T - T_n)}{\exp\left(\frac{V_{OC,n} + K_V(T - T_n)}{a}\right) - 1} \quad (3.5)$$

Burada  $I_{SC,n}$  nominal kısa devre akımını,  $V_{OC,n}$  nominal açık devre gerilimini,  $K_I$  akım katsayısını ve  $K_V$  gerilim katsayısını göstermektedir. FV hücrenin I-V eğrisi şekil 3.2`de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Fotovoltaik hücrenin I-V eğrisi.

Şekil 3.2`de de görüldüğü gibi, bir FV hücreden maksimum gücün elde edildiği nokta maksimum güç noktası-MGN`dir. Bu nokta atmosferik şartlara ve yükün değişimine göre değişiklik gösterebilir. Bu bakımdan bu noktasından sürekli olarak izlenmesi gerekir.

### 3.2. Evirici

Eviriciler, girişlerindeki doğru gerilimi sabit veya değişken genlikte ve frekansta alternatif gerilime dönüştüren güç elektroniği devreleridir. Çalışma prensibine ve kullanılan güç kaynağının türüne göre i) Gerilim kaynaklı eviriciler, ii) Akım kaynaklı

eviriciler ve iii) Empedans kaynaklı eviriciler olmak üzere üçe ayrılır. Gerilim kaynaklı eviriciler genlik ve frekansı kontrol ederler. Akım beslemeli eviriciler, yüksek güçlerde tercih edilir ve akımı evirmekte kullanılır. Akım beslemeli evirici devrelerde kaynak empedansı yüksektir. Eviricilerin kaynaktan çektiği akımın sabit kalması için eviricinin girişine seri bir indüktans bağlanır. Devrede seri bir indüktans olduğundan dolayı aşırı akım koşullarında bile kontrol kolaydır. Yükün üstündeki gerilim, yükteki değişimle büyük bir ölçüde değişir (Arifoğlu, 2016). Empedans kaynaklı eviriciler ise anahtarlama elemanlarının bulunduğu güç katını girişinde bulunan besleme katına bağlayan bir çift kondansatör ve bobinden meydana gelen özel bir empedans ağına sahiptir. Empedans kaynaklı evirici devresinde, aynı faz kolundaki anahtarlama elemanları kısa devre modunda çalıştırılarak yükseltme sağlandığından anahtarlar sürülürken ölü zaman süresi konulmasına gerek yoktur. Bunun sonucunda çıkış işaretinde geleneksel eviricilere kıyasla daha az bozulma meydana gelmektedir (Anderson and Peng, 2008).

FV sistemlerde kullanılan eviriciler, paneller tarafından üretilen doğru akım elektrik enerjisini bir fazlı veya üç fazlı alternatif akım elektrik enerjisine dönüştürür. Eviriciler, FV sistemin tipine göre On-Grid veya Off-Grid eviriciler olarak adlandırılır. İmal edildikleri güce göre mikroevirici (micro inverter), dizi evirici (string inverter) ve merkezi evirici (central inverter) olarak üç ana sınıfa ayrılmaktadır. Mikroeviriciler tek bir FV panele bağlanmakta ve genel olarak birkaç kW'lık konut uygulamalarında tercih edilmektedir. Bu uygulamalarda her bir modül bağımsız eviriciler tarafından kullanıldığından, böyle bir sistemde enerji dönüştürülmesi sonucu verimlilik daha yüksek olmaktadır. Ayrıca kullanılan eviricilerden birinin arıza yapması durumunda sadece arıza yapan eviriciye bağlı FV modülün enerji üretimi duracaktır. Fakat ilk yatırım ve kurulum maliyetleri diğer evirici tiplerine göre daha yüksektir. Dizi eviriciler monofaze sistemler için 1.2 kW-6 kW aralığında trifaze sistemler için ise 10 kW-120 kW aralığında imal edilirler. Bu eviricilerin kullanımındaki en büyük avantaj büyük güçlü santrallerde, FV modüllerin gruplanarak tesis edilmesi sonucu oluşabilecek arıza durumunda sadece arıza yapan modül dizisinin devre dışı kalmasını sağlamaktadır. Böylelikle santralin tamamen enerji üretilmez konuma geçmesi önlenebilmektedir.

Merkezi eviriciler ise genellikle 0.5 kW ile 2.3 MW arasında üretilmektedir. Özellikle birkaç MW'lık büyük güçlü santrallerde kullanmak için tasarlanmaktadır. En önemli avantajları evirici arıza tespitinin ve arızaya müdahalenin hızlı yapılabilmesidir. Dolayısıyla kurulan santral daha kısa sürede devreye alınmakta ve üretim kayıpları da minimuma indirilebilmektedir (electronics, 2021).

### 3.3. Depolama ve Şarj Ünitesi

Günümüzde teknoloji hızlı bir şekilde ilerlemektedir. Gelişen batarya teknolojisi ile cep telefonları, işitme cihazları, el fenerleri ve benzeri cihazlar daha kullanışlı hale gelmiştir. Batarya sistemleri birçok cihazın kullanımında esneklik ve kolaylık sağlamaktadır (electronics, 2021). Enerjinin depolanmasında, teknoloji henüz istenen düzeyde değildir. Bilim insanları gerek batarya teknolojisinde gerekse enerji depolayan cihazların enerji depolama sürelerinin kısaltılması ile ilgili yoğun mesai harcamaktadır. Enerjinin istendiği zaman ve istenilen yerde kullanılmaya hazır olması istenir. Enerji depolama işleminde aranan özellikler; yüksek depolama ve yüksek şarj/deşarj kapasitesi, kendiliğinden boşalmanın ve kapasite kayıplarının az olması, uzun ömür, ucuzluk, enerji yoğun olması. Enerji çok değişik formlarda depolanabilir. Örneğin biyolojik depolama, kimyasal depolama, ısı depolama, elektriksel depolama, potansiyel enerji, yerçekimi potansiyel enerjisi, kinetik enerji vb. (Boztepe, 2006). Pil, kimyasal bir tepkimede açığa çıkan enerjiyi elektrik enerjisine çeviren aygıt olarak adlandırılır. Isı enerjisini elektrik enerjisine çeviren aygıtlara termopil, nükleer enerjiyi elektrik enerjisine çevirenlere atom pili, ışık enerjisini elektrik enerjisine çevirenlere fotovoltaik pil ve kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çevirenlere de elektrokimyasal pil denilmektedir (mekanikdunyasi, 2021). Elektrokimyasal pillerin ilk örneği 1800'lerde Volta tarafından geliştirilmiştir. Volta pili, asitli suyla ıslatılıp ortası delikli kumaş parçalarıyla birbirinden ayrılan yuvarlak bakır ve çinko dizilerden oluşmaktaydı. Laboratuvar pilleri arasında yer alan potasyum bikarbonatlı pil 1842 'de Poggendorff tarafından tasarlandı. 1842 'de geliştirilen diğer bir pil olan Bunsen pilinde ise kutuplaşmayı önleyici olarak nitrik asit kullanıldı. İlk kez Fery tarafından geliştirilen kutuplaşması havayla giderilmiş piller ise elektromotor kuvveti 105V olan düşük şiddetle akım üreticileridir. Şarj edilebilir piller, Fransız fizikçi Gaston Plante'nin kurşun asit hücrelerini icat ettiği 1859 yılından beri kullanılmaktadır. Bir kurşun anodu, bir kurşun dioksit katodu ve bir sülfürik asit elektroliti ile Plante batarya, modern günlük araç aküsünün bir öncüsü olmuştur. Kullandığımız taşınabilir cihazların bataryaları içinde sürekli bir dönüşüm olmaktadır. Bataryalar için farklı şarj etme yöntemleri geliştirilmiştir.

*Sabit Akımda Şarj* : Basit bir yöntemdir. Şarj akımı seri bağlı olan tüm batarya hücrelerinde eşittir. Bataryalarda şarj durumu arttıkça beraberinde iç direncinde artış göstermesinden dolayı, sabit takımda şarja devam edebilmek için gerilim sürekli artırılmalıdır. Ancak bu yöntemde seçilen şarj akımı çok önemlidir. Çünkü çok yüksek

seçilen şarj akımı bataryanın kısa sürede şarj olmasına imkân sağlarken diğer yandan bataryanın aşırı şarja maruz kalması ve fazla ısınması nedeniyle zarar görmesine sebep olabilir. Düşük akımda şarj ise şarj süresinin uzamasına neden olur.

*Sabit gerilimde şarj: Gerçekleştirilmesi* ve kontrolü basit bir yöntemdir. Şarjın başlangıcında düşük batarya iç direncine bağlı olarak kaynaktan yüksek bir akım çekilebilir. Çekilebilecek bu yüksek akımın elemanlara zarar vermemesi için sınırlandırılması gerekir. Daha sonra batarya gerilimi istenen bir seviyeye geldiğinde, gerilim sabit tutularak şarja devam edilir. Şarj artışına bağlı olarak artan batarya iç direnci nedeniyle şarj akımı zamanla azalır. Bu da şarjın, sızıntı akımıyla tamamlanmasını ve böylece bataryanın aşırı şarj olma ihtimalinin bir önceki yöntemle göre azalmasını sağlar. Ancak şarj akımında oluşan azalma nedeniyle bataryanın şarj olma süresi bir önceki yöntemle göre daha uzundur.

*Sabit akım-sabit gerilim ile şarj: Batarya* sabit akım ve sabit gerilim olmak üzere iki farklı periyotta şarj edilir. Bataryaların aşırı şarja karşı çok hassas olmaları, şarjın başlangıcında sabit gerilim uygulandığında kaynaktan aşırı akımlar çekilmesi ve şarjın olabildiğince kısa olması istendiğinden dolayı şarj, önceden ayarlanmış bir gerilim seviyesine ulaşana kadar sabit akımla başlar, sonrasında sabit gerilimle devam eder.

### **3.4. da-da Dönüştürücü**

Farklı formlardaki elektrik enerjini birbirine dönüştüren devrelere genel olarak dönüştürücü adı verilmektedir. Dört temel dönüştürücü devresi vardır (Bodur ve Bakan, 2002). Bunlar i) aa-da dönüştürücüler, ii) AA-AA dönüştürücüler, iii) da-da dönüştürücüler ve iv) da-aa dönüştürücülerdir (Yıldız, 2009). Bu devre yapıları, alternatif akım veya doğru akım türündeki dalga formlarını birbirlerine veya farklı formlara dönüştürür. da-da dönüştürücüler, yüksek frekansta anahtarlama yaparak belirli bir genlikteki gerilimi daha düşük veya daha yüksek bir seviyedeki gerilime dönüştüren güç elektroniği sistemleridir. Anahtarlama modlu dönüştürücülerin birçok elektronik sistemde kullanılması, bu dönüştürücülerin tasarımı ve kontrolü konusundaki çalışmaları yoğunlaştırmıştır (Aslan ve Güldemir, 2005). da-da dönüştürücü devreler doğrusal olmayan yapıda olduklarından dolayı verimlilikleri bu devrelerin tasarımı ve kontrolünde kullanılan denetleyiciye bağlı olarak değişmektedir (Atacak ve Bay, 2009). da-da dönüştürücüler güç katı ve kontrol katından oluşmaktadırlar. Giriş gerilimine bağlı olarak istenilen büyüklükte çıkış gerilimi elde etmek için bir güç katı kullanılır. Güç katı, yarı iletken elemanlar ve filtrelerden oluşmaktadır. Kontrol katı ise yarı iletken anahtarlama

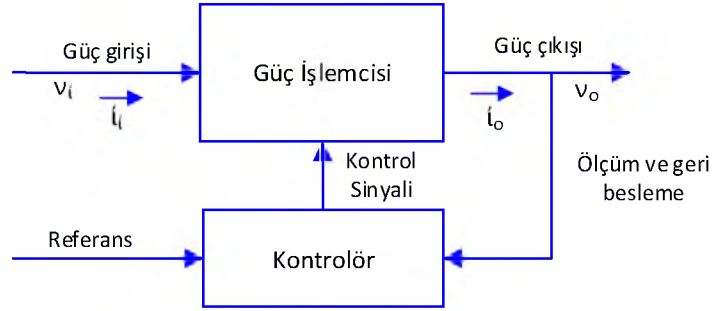
elemanlarını sürmek için kontrol sinyalleri üretir (Ürgün ve ark., 2010). da-da dönüştürücü yapıları dördüncü bölümde ayrıntılı olarak incelenmiştir.

#### 4. da-da DÖNÜŞTÜRÜCÜ YAPILARI

Dönüştürücüler doğru veya alternatif akımı alıcılar için ihtiyaç duyulan DA ve AA formuna dönüştüren önemli güç elektroniği aygıtlarıdır. Genel olarak dört çeşit dönüştürücü yapısı vardır.

1. AA–DA Dönüştürücü (Doğrultucu)
2. DA–DA Dönüştürücü (Kıyıcı)
3. DA–AA Dönüştürücü (Evirici)
4. AA–AA Dönüştürücü (AA Kıyıcı)

Dönüştürücünün güç girişi doğru akım veya alternatif akım olabilir. Şekil 4.1 'de bir güç elektroniği dönüştürücü sisteminin blok şeması gösterilmiştir. Dönüştürücü genel olarak güç katı ve kontrol katı olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır.



Şekil 4.1 Güç elektroniği dönüşüm sistemi blok şeması

Günümüzde yaygın olarak kullanılan da-da dönüştürücüler, akademik çalışmalarda da geniş bir şekilde incelenmektedir. Endüstriyel alanda yüksek anahtarlama frekanslı devreler veya DA transformatörler olarak ta bilinen da-da dönüştürücüler basit yapı, kolay denetim ve yüksek güç yoğunluğu gibi avantajlara sahiptir. Motor kontrolü, kaynak makinaları, batarya şarj sistemleri, kesintisiz güç kaynakları, yakıt pilleri, FV sistemler ve güç faktörü düzeltme devreleri gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde anahtarlama ve rezonanslı olmak üzere ikiye ayrılan da-da dönüştürücülerin anahtarlama tipte olanları daha yaygın kullanıma sahiptir. Anahtarlama da-da dönüştürücüler kontrollü yarıiletken anahtarlama elemanları, yarıiletken güç diyotları, kondansatör ve bobinlerin farklı şekillerde bağlanmasıyla elde edilmiştir. Devrede iletim ve kesim modlarında çalışan güç anahtarları aktif eleman, diyotlar ise pasif elemanlar olarak adlandırılır (Rashid,2014; Şahin,2013).

Anahtarlama da-da dönüştürücülerin çalışma prensibi, anahtarlama bobinin enerji aktarımına dayalıdır. Bu dönüştürücülerde bir anahtarlama periyodu içerisinde güç

anahtarları veya güç diyotu iletimdedir. Genellikle anahtar iletimde iken bobinde biriktirilen enerji, diyot iletimde iken çıkışa aktarılır. Anahtarlamalı da-da dönüştürücülerde yarı iletken güç elemanı olarak genellikle yüksek güç ve düşük frekanslarda SCR, orta güç ve orta frekanslarda BJT, düşük güç ve yüksek frekanslarda MOSFET, ortamın üzerindeki güç ve frekanslarda ise IGBT kullanılmaktadır (Weicheng ve ark., 2016; Chengbin ve ark., 2015). Uygulamada yaygın kullanılan da-da dönüştürücü yapıları Tablo 1’de verilmiştir (Çengelci, 1999).

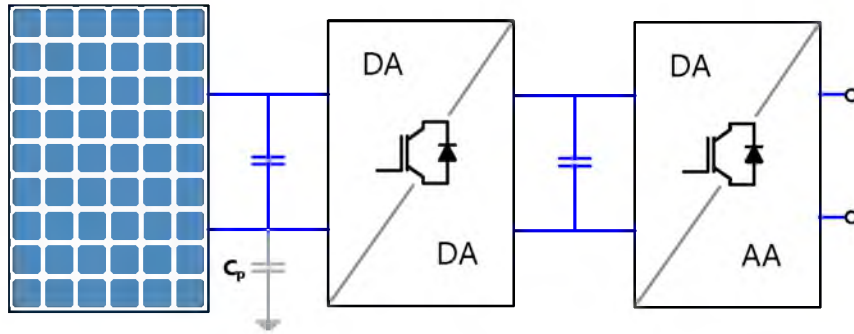
Tablo 1. da-da dönüştürücü topolojileri.				
Topoloji	Güç Aralığı (W)	Giriş Gerilimi (V)	İzolasyon	Verim (%)
Buck (Düşürücü)	0-1000	5-40	Yok	78
Boost (Yükseltici)	0-150	5-40	Yok	80
Buck-Boost (Düş./Yük.)	0-150	5-40	Yok	80
Cuk	-	-	Yok	-
Sepic	-	-	Yok	-
Zeta	-	-	Yok	-
Full Bridge (Tam köprü)	400-2000+	50-1000	Var	75
Half Bridge (Yarım Köprü)	100-500	50-1000	Var	75
Forward (İleri yönlü)	0-150	5-500	Var	78
Flyback (Geri yönlü)	0-150	5-500	Var	80
Push-Pull	100-1000	50-1000	Var	75

Anahtarlamalı da-da dönüştürücülerde çalışma frekansına göre bobin değerinin yeterince büyük olduğu ve böylece bobinden geçen akımın genellikle kesintisiz ve düzgün olduğu kabul edilmektedir. Devrenin tasarımı ve devrede kullanılan bobin, kondansatör, diyot ve anahtarların seçimi oldukça önemlidir (Lee ve ark., 1998). Anahtarlamalı da-da dönüştürücülerde güç anahtarlarının kontrolü farklı darbe genişlik modülasyonu-DGM teknikleri ile yapılmaktadır. DGM tekniğinde sabit çalışma frekansı altında güç anahtarının iletim süresi değiştirilerek, bağlı iletim süresi ve böylece çıkış gerilimi kontrol edilmektedir (Bodur ve Bakan, 2002; Şahin, 2016). Anahtarlamalı dönüştürücülerin çıkış gerilimi, ayrıca frekans modülasyonu-FM tekniği ile de kontrol edilebilmektedir. Bu teknikte, anahtarlama frekansı veya periyot değiştirilerek bağlı iletim süresi, dolayısıyla çıkış gerilimi kontrol edilmektedir. Ancak bu kontrol yöntemi,

düşük yük veya geçici rejim şartlarında çalışma gibi zorunlu hallerde ve geçici olarak kullanılmaktadır (Acha ev ark., 2001; Luo and Ye, 2005). da-da dönüştürücüler, izolasyonsuz (indüktanslı) ve izolasyonlu (transformatörlü) olmak üzere iki farklı sınıfta gruplandırılır.

#### 4.1. İzolasyonsuz da-da Dönüştürücüler

İzolasyonsuz (indüktanslı) da-da dönüştürücülerde enerji aktarımı anahtarlanan bobinler vasıtasıyla yapılmaktadır. Dönüştürücüdeki kontrollü yarıiletken anahtarlama elemanının iletimde olduğu süre boyunca bobinde biriktirilen enerji, anahtarın kesime girmesiyle birlikte yüke aktarılır. Bu dönüştürücülerin tasarımı izolasyonlu olanlara göre daha kolaydır ancak en büyük dezavantajları giriş ile çıkış arasında izolasyonun olmamasıdır. İzolasyonsuz dönüştürücülerde giriş ve çıkış arasında elektriksel bağlantı olduğundan dolayı giriş geriliminde meydana gelecek olası gerilim dalgalanmalarının etkisi çıkış gerilimini etkileyebilmektedir. Şekil 4.2 'de izolasyonsuz da-da dönüştürücünün blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.2 İzolasyonsuz da-da dönüştürücünün prensip şeması.

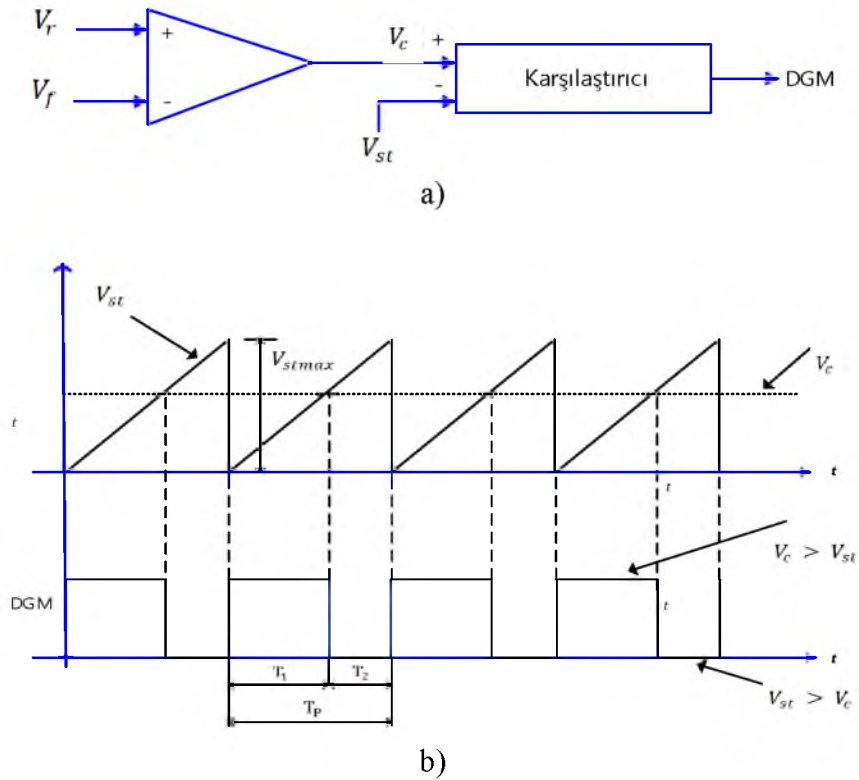
İzolasyonsuz dönüştürücüler düşürücü, yükseltici, düşürücü-yükseltici, CUK, Sepic ve Zeta olmak üzere farklı tasarımlara sahiptir.

1. Düşürücü (Buck) da-da dönüştürücüler
2. Yükseltici (Boost) da-da dönüştürücüler
3. Düşürücü-Yükseltici (Buck-Boost) da-da dönüştürücüler
4. CUK tipi da-da dönüştürücüler
5. Sepic (Single-Ended Primary Inductance Converter) tipi da-da dönüştürücüler
6. Zeta tipi da-da dönüştürücüler
7. Sarmaşık (Interleaved) tipi yükseltici dönüştürücüler

Anahtarlamalı da-da dönüştürücülerde bobin üzerinden akan akımın genel olarak sürekli ve düzgün olduğu kabul edilmektedir. Devrenin tasarımında kullanılan bobin ve kondansatör ile birlikte diyot ve anahtar seçimleri bir hayli önem arz etmektedir.

Çalışma frekansı arttırıldığında, dönüştürücüde kullanılan devre eleman boyutları küçülmekte ve maliyetleri düşmektedir. Ayrıca giriş ve çıkış akım ve gerilim dalgalanmaları da azalmaktadır. Ancak devrede Elektromanyetik girişim (Electromagnetic Interference-EMI) gürültüleri, anahtarlama kayıpları ile akım ve gerilim stresleri artmaktadır.

Anahtarlamalı da-da dönüştürücülerde güç anahtarının kontrolü darbe genişlik modülasyonu-DGM ile yapılmaktadır. Gerçekleştirilmesi ve uygulanması kolay bir modülasyon tekniğidir. Şekil 4.3a'da DGM tekniğinin elde edilmesine ait blok şeması verilmiştir.  $V_r$  referans gerilimini,  $V_f$  geri besleme gerilimini temsil eder. Bu iki gerilim arasındaki fark ile  $V_c$  kontrol gerilimi elde edilmiştir. Bu gerilim testere dişi formundaki  $V_{st}$  gerilimi ile karşılaştırıldıktan sonra anahtarlama elemanının sürülmesi için gerekli olan DGM sinyalleri elde edilmiştir (Bodur ve Bakan, 2002; Şahin,2016). Şekil 4.3b'de ise karşılaştırılan  $V_r$ ,  $V_f$  gerilimleri ile elde edilen DGM sinyalinin değişim grafikleri yer almaktadır.



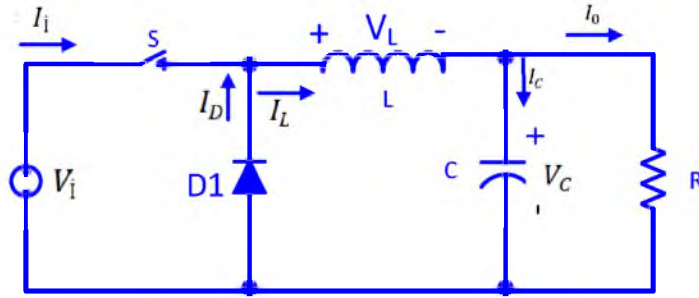
Şekil 4.3 Darbe genişlik modülasyonu tekniği.

DGM sinyalinin bir anahtarlama periyodu içerisindeki uygulanma süresi görev oranı olarak adlandırılır ve  $D$  ile sembolize edilir. Diğer bir ifade ile bir anahtarlama periyodu içerisinde güç anahtarının iletimde kalma süresinin anahtarlama periyoduna oranı bağıl iletim zamanı veya doluluk oranı olarak da adlandırılır. Bu tanımlardan hareketle görev oranı  $D$ , denklem 4.1'deki gibi ifade edilir (Kramer ve ark., 2008).

$$D = \frac{T_1}{T_p} \text{ ve } 0 < D < 1 \quad (4.1)$$

#### 4.1.1. Düşürücü da-da Dönüştürücüler

Düşürücü tip dönüştürücü, izolasyonsuz da-da dönüştürücüler arasında en çok kullanılan dönüştürücülerden biridir. Dönüştürücü çıkış gerilimi her zaman giriş geriliminden daha düşüktür. Bu dönüştürücülerde giriş akımı süreksizdir çünkü yarı iletken anahtar kaynak ve bobin arasında seri olarak bağlıdır. Bunun dışında, bobin ve kapasite her durumda yükü beslediği için çıkış akımı süreklidir. Şekil 4.4 'de temel bir düşürücü dönüştürücü devresine ait prensip şeması görülmektedir. Bu yapıda çıkış akımını filterlemek için  $L$  bobini ve gerilimi filtrelemek için  $C$  kapasitesi kullanılır.  $R$  direnci çıkış yükünü göstermektedir.  $D1$  diyotu serbest geçiş diyotu olarak adlandırılmaktadır.

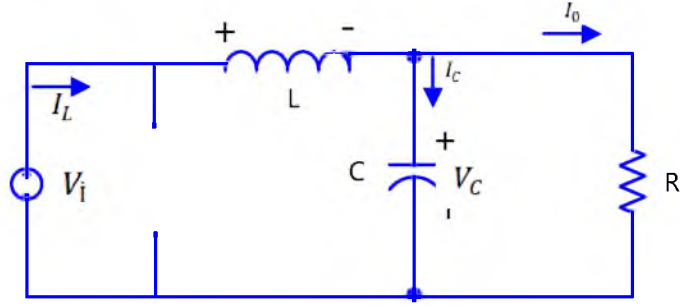


Şekil 4.4 Düşürücü da-da dönüştürücü temel devre şeması.

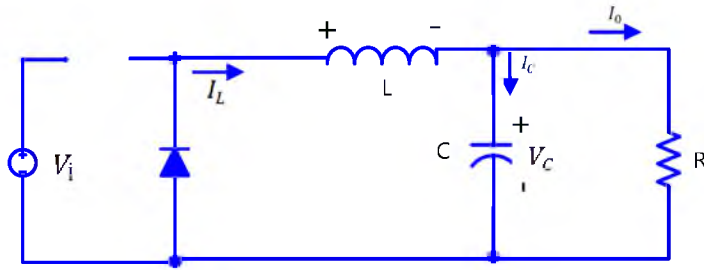
Dönüştürücünün güç katı, bobin akımı için sürekli ya da süreksiz akım modunda çalışmaktadır. Kararlı durum için, sürekli akım modunda bobin içerisinde kesintisiz olarak akım geçişi olmaktadır. Süreksiz çalışma modunda ise bobin akımı sıfırdan başlayarak tepe değerine yükselir ve anahtarlama süresi sona ermeden sıfıra düşer. Bu dönüştürücü pratikte her iki çalışma modunda da çalıştırılabilir. Süreksiz moda çalışan bir buck dönüştürücü sıfırın altına düşen bobin akımı, her döngü sırasında çıkış kapasitörünün deşarjına ve dolayısıyla daha yüksek anahtarlama kayıplarına neden olmaktadır. Ayrıca çıkış gerilimi, sürekli moda göre çok daha karmaşıktır. Çıkış gerilimi

sürekli akım modundan farklı olarak yalnızca giriş gerilimi  $V_i$  ve görev döngüsü  $D$  'nin değil, aynı zamanda bobin değerinin  $L$ , komutasyon süresine  $T_p$  ve çıkış akımı  $I_o$ 'a bağlıdır. Bu nedenle, dönüştürücü tasarımında her iki çalışma modu dikkate alınmaktadır (Rashid, 2017; He ve ark., 2007).

Sürekli akım modunda yarı iletken güç anahtarı  $S$  iletimde ve  $D_1$  kesimde. Süreksiz akım modunda ise  $S$  anahtarı kesimde ve  $D_1$  diyot'u iletimdedir. Şekil 4.5 'de bu iki durum gösterilmiştir.



a) S anahtarı iletimde



b) S anahtarı kesimde

Şekil 4.5. S anahtarının iletimde ve kesimde olma durumları.

Şekil 4.5a ve 4.5b'de bobin akımındaki artış aşağıdaki denklemler ile ifade edilebilir.

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (4.2)$$

$$\Delta I_L = \frac{V_L}{L} \Delta T \quad (4.3)$$

İletim durumu için bobin akımındaki yükselme aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$\Delta I_{L1} = \frac{V_i - (V_S - I_L R_L) - V_o}{L} T_1 \quad (4.4)$$

Burada  $R_L$  bobin eşdeğer devresindeki direnci,  $V_S$  iletim durumunda anahtar üzerindeki gerilim düşümünü ve  $\Delta I_{L1}$  ise bobin akımındaki dalgalanma miktarının

göstermektedir. Anahtarın kesim durumu için bobin akımında meydana gelen düşüş aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$\Delta I_{L2} = \frac{V_0 + (V_D + I_L R_L)}{L} T_2 \quad (4.5)$$

Kararlı çalışma şartlarında akımın iletimdeki yükselme miktarı  $\Delta I_{L1}$  ve kesimdeki azalma miktarı da  $\Delta I_{L2}$  eşitlikleri ile gösterilmiştir. Bundan dolayı eşitlik 4.4 ve eşitlik 4.5 denklemleri eşitlenip sürekli hal için dönüştürücü çıkış gerilimi  $V_0$  aşağıdaki gibi elde edilir.

$$V_0 = (V_1 - V_S) \left( \frac{T_1}{T_1 + T_2} \right) - V_D \left( \frac{T_2}{T_1 + T_2} \right) - I_L R_L \quad (4.6)$$

$$\frac{T_1}{T_1 + T_2} = D \quad (4.7)$$

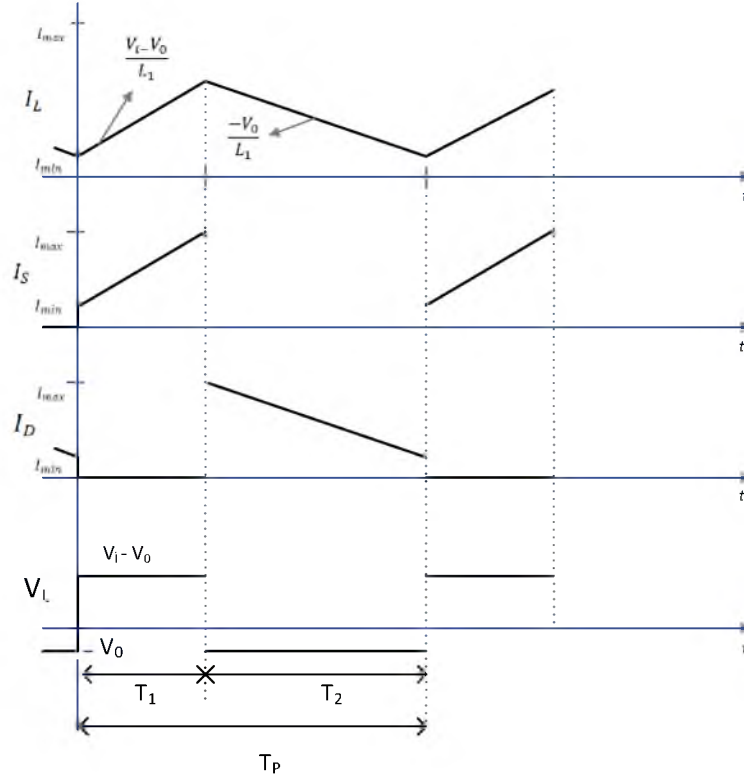
$$\frac{T_2}{T_1 + T_2} = 1 - D \quad (4.8)$$

$$V_0 = (V_1 - V_S) D - V_D (1 - D) - I_L R_L \quad (4.9)$$

Eşitlik 4.9 'a göre  $V_0$  çıkış gerilimi  $D$  ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle çıkış gerilimi her zaman giriş geriliminden düşük olmaktadır. Genel bir basitleştirme yapmak için  $V_C$ ,  $V_D$  ve  $R_L$  değerlerinin yeterince küçük olduğu kabul edilirse çıkış gerilimi aşağıdaki şekilde sadeleştirilebilir.

$$V_0 = V_1 D \quad (4.10)$$

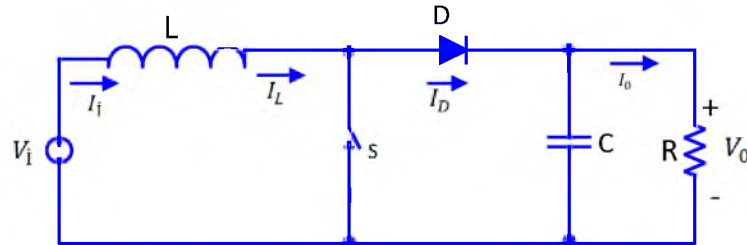
Şekil 4.6'da devredeki elemanlar üzerindeki akımların ve bobin geriliminin değişim grafikleri verilmiştir. Burada S anahtarının iletimde olduğu durum  $D \times T_p = T_1$  süresi ile ifade edilmiştir.  $D$ , kontrol devresi tarafından belirlenen  $T_p$  periyodundaki iletim süresidir. Anahtarın kesimde olduğu süre ise  $T_2$  ile ifade edilmiştir (Aydın, 2013).



Şekil 4.6 Devredeki eleman akımlarının zamana göre değişimleri.

#### 4.1.2. Yükseltici da-da Dönüştürücüler

Yükseltici da-da dönüştürücüler de temel olarak yarı iletken anahtar, diyot, bobin ve kapasite elemanlarından oluşmaktadır. Şekil 4.7’de yükseltici dönüştürücünün devre şeması görülmektedir. Yarı iletken güç anahtarı iletimdeyken giriş gerilim kaynağı sadece bobine ilave bir enerji verir ve bobin üzerinde enerji depolanmaya başlar. Aynı esnada yük kondansatör tarafından beslenmektedir. Güç diyotunun iletim durumunda ise hem giriş gerilimi hem de bobin üzerindeki ekstra enerji, çıkışta bulunan yüke aktarılmaktadır.

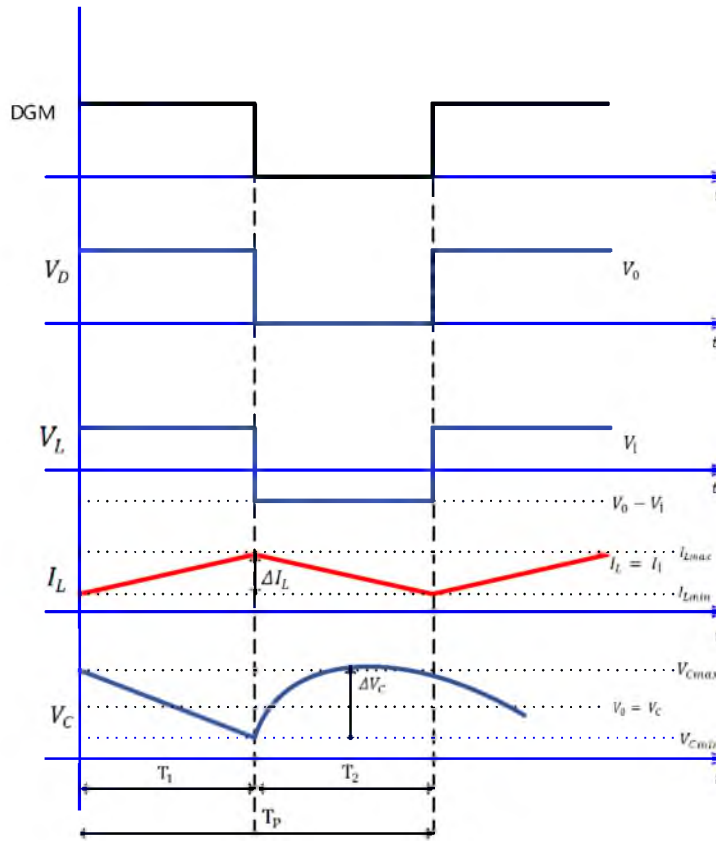


Şekil 4.7 Yükseltici da-da dönüştürücü temel devre şeması.

Anahtarın kesimde olduğu durumda, bobinde oluşan şarj akımı diyot üzerinden kapasite ve yüke doğru akarak, üzerinde oluşan enerjiyi deşarj eder. Aynı zamanda bobin üzerinde oluşan gerilimin polaritesi giriş gerilim kaynağının polaritesi ile aynı olarak

diyot üzerinden çıkışta bulunan yükü beslemektedir. Dolayısıyla çıkış gerilim seviyesi yükseltilmiş olur.

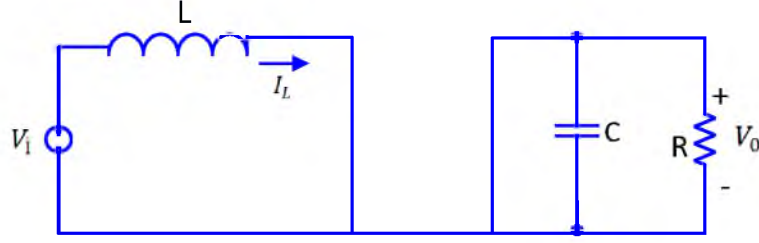
Devre üzerindeki güç elemanları çıkışta oluşan gerilime maruz kalmaktadır. Bobin üzerinden geçen akım, girişe seri bağlı olduğundan giriş akımına eşittir. Aynı zamanda girişte meydana gelecek akım dalgalanmaları da düşük olmaktadır. Ancak çıkışta oluşan akım dalgalanması ve ihtiyaç duyulan kapasite değeri yükselmektedir. İlgili temel dalga şekilleri şekil 4.8’de verilmiştir (Bodur ve Bakan, 2002).



Şekil 4.8 Devrenin çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri.

Devredeki elemanların ideal olduğu kabul edilirse, S anahtarı iletimdeyken üzerinde düşen geriliminin sıfır olduğu, diyotun iletim durumunda üzerine düşen gerilimin sıfır olduğu söylenebilir. Devre periyodik olarak çalışmaktadır. Dolayısıyla bobin üzerindeki akımda periyodiktir.

Devredeki RC zaman sabiti, kapasitenin büyük kabul edilmesinden dolayı çok büyük olur. Bundan dolayı iletim ve kesim durumları göz önüne alındığında gerilim değişimleri kapasite için ihmal edilebilir. S anahtarının iletimde olduğu şekil 4.8’deki  $T_1$  aralığında, yükseltici da-da dönüştürücü devresi şekil 4.9’daki gibi çalışmaktadır.



Şekil 4.9 S anahtarının iletimde olma durumu.

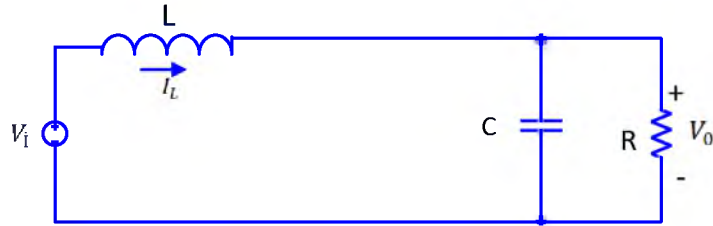
Bu aralıkta girişte bulunan gerilim kaynağı bobini beslemekte ve bobin üzerinde oluşan akım eşitlik 4.11'deki gibi ifade edilir.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_L}{L} \quad (4.11)$$

Eğer gerilim kaynağının sabit olduğu kabul edilirse bobin akımındaki artış pozitif ve sabit olmaktadır. Dolayısıyla bobin doyuma ulaşmaz.  $T_1$  aralığında bobin akımında meydana gelen artış eşitlik 4.12'deki gibidir.

$$\frac{\Delta i_L(T_1)}{T_1} = \frac{V_i}{L} \quad (4.12)$$

S anahtarının kesimde olduğu şekil 4.8'deki  $T_2$  aralığında ise yükseltici da-da dönüştürücü şekil 4.10'daki gibi çalışmaktadır.



Şekil 4.10 S anahtarının kesimde olma durumu.

$T_2$  aralığında bobin akımında meydana gelen düşüş,

$$\frac{\Delta i_L(T_2)}{T_2} = \frac{V_i - V_0}{L} \quad (4.13)$$

eşitlikleri ile ifade edilir. Bir periyot içinde bobin akımında meydana gelen toplam değişimin mutlak değeri sıfır olacağından eşitlik 4.13 ve eşitlik 4.14'ün toplamı sıfıra eşitlenerek aşağıdaki gerilim ve D bağıntıları elde edilir.

$$\frac{V_i}{L} T_1 + \frac{V_i - V_0}{L} T_2 = 0 \quad (4.14)$$

$$\frac{V_i}{L} T_1 = \frac{V_0 - V_i}{L} T_2 \quad (4.15)$$

$$V_i T_1 = (V_0 - V_i) T_2 \quad (4.16)$$

$$V_i T_1 = V_0 T_2 - V_i T_2 \quad (4.17)$$

$$V_i \left( \frac{T_2 + T_1}{T_2} \right) = V_0 \quad (4.18)$$

$$\frac{T_1}{T_1 + T_2} = D \quad (4.19)$$

$$\frac{T_2}{T_1 + T_2} = 1 - D \quad (4.20)$$

Ara işlemlerden sonra yükseltici tip da-da dönüştürücünün çıkış gerilimi eşitlik 4.22 deki gibi elde edilir (Gürdal, 2000).

$$V_0 = \frac{V_i}{1-D} \quad (4.21)$$

Kayıplar ihmal edilirse, dönüştürücünün giriş gücü ile çıkış gücü arasındaki bağıntıdan yararlanarak giriş-çıkış akımları arasındaki ilişki eşitlik 4.23-4.25 de ki gibi elde edilir.

$$I_0 V_0 = I_i V_i \quad (4.22)$$

$$I_i = \frac{I_0 V_0}{V_i} \quad (4.23)$$

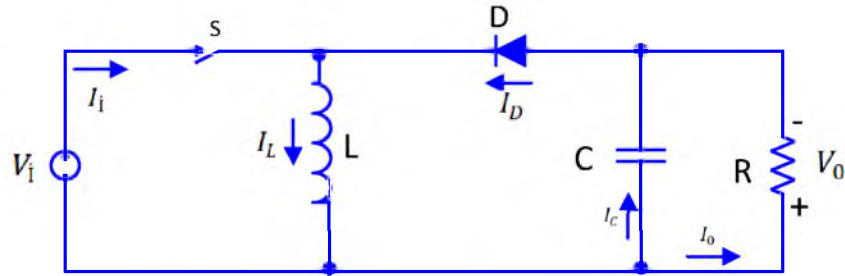
$$I_i = I_0 \left( \frac{1}{1-D} \right) \quad (4.24)$$

#### 4.1.3. Düşürücü-Yükseltici da-da Dönüştürücüler

Genel olarak düşürücü-yükseltici dönüştürücüler, izolasyonlu ve izolasyonsuz olarak iki farklı yapıda olmakla birlikte izolasyonsuz dönüştürücülerin kullanımı daha yaygındır. Düşürücü-yükseltici dönüştürücülerin çıkış gerilimi görev periyoduna bağlı olarak giriş gerilim değerinden daha büyük ya da daha küçük olabilir. Bu dönüştürücünün önemli bir özelliği, çıkış geriliminin giriş gerilimine göre ters yönlü olmasıdır. Bu nedenle, bu dönüştürücüye ters çıkışlı dönüştürücü de denilmektedir. Genel olarak tüm da-da dönüştürücüler yük ve giriş gerilimi değişse bile çıkışta sabit çıkış gerilimi sağlamalıdır (Hanifi, 2011). Bu bakımdan doğrusal olmayan yapılarından dolayı bu dönüştürücülerin kontrolü zordur (Buso, 1999). Düşürücü-yükseltici dönüştürücüler iki farklı modda çalışabilir. Eğer bobin akımı sıfıra düşmüyorsa dönüştürücü sürekli iletim modunda aksi takdirde, süresiz çalışma modunda çalışır (Garcia and Gutierrez, 2009).

Düşürücü-yükseltici dönüştürücülerin verimi yüksektir. Çıkışa kısa devre koruması yerleştirmek kolaydır. Ancak giriş akımı kesiklidir ve anahtarlama elemanından yüksek tepe akımları akar (Jozwik and Kazimierczuk, 2013).

Düşürücü-yükseltici dönüştürücüde temel olarak, güç anahtarı iletimdeyken girişte bulunan gerilim kaynağı sadece bobine ilave bir enerji vermekte, yükü ise kondansatör beslemektedir. Güç diyotu iletim durumunda iken yüke sadece bobinde bulunan ilave enerji aktarılmaktadır. Dönüştürücü sürekli halde çalışmakta, minimum ve belirlenen maksimum gerilim arasında elde edilen çıkış gerilimi ise kontrol edilebilir durumdadır. Güç elemanları, giriş ve çıkış gerilimlerinin toplamına maruz kalır. Bobin giriş veya çıkışa seri bağlı olmadığından bobin akımı, giriş ile çıkış akımlarının toplamına eşit olur ve giriş ile çıkış akımlarındaki dalgalanmalar büyüktür. Düşürücü-yükseltici bir dönüştürücüye ait devre şeması şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Düşürücü-yükseltici dönüştürücü devresi.

Şekil 4.11’de verilen düşürücü-yükseltici dönüştürücü devresinde S anahtarının görev periyodu eşitlik 4.26 ile ifade edilir.

$$D = \frac{T_1}{T_1 + T_2} = \frac{T_1}{T_P} \quad (4.25)$$

Burada  $T_1$  anahtarın iletimde kalma süresi,  $T_2$  ise anahtarın kesimde kalma süresidir.  $T_P$  ise anahtarlama periyodudur.

İdeal koşullarda dönüştürücü çıkış gerilimi ve akımı,

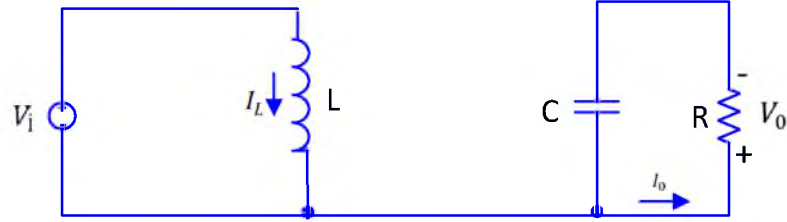
$$V_0 = \frac{D}{1-D} V_i \quad (4.26)$$

$$I_i = \frac{D}{1-D} I_0 \quad (4.27)$$

eşitlikleri ile tanımlanır. Görev periyodu D, (0-1) aralığında değişmektedir. Görev periyodunun farklı değerleri için farklı çıkış gerilimleri elde edilmektedir. Görev

periyodu  $D < 0.5$  için çıkış gerilimi düşürülür,  $D > 0.5$  için çıkış gerilimi yükseltilir. Düşürücü-yükseltici dönüştürücü çıkışında oluşan akımın dalgalı olmasından dolayı akım kesintilidir (Chen and Bao, 2013).

S anahtarının iletimde olma durumu için devre şekil 4.12'deki gibi çizilebilir. Bu durumda D diyotu ters gerilime maruz kaldığından kesimdedir. Giriş kaynak akımı artarak, S anahtarı ve bobin üzerinden akmaktadır.



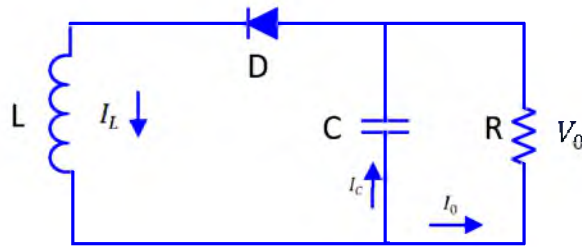
Şekil 4.12 S anahtarının iletimde olma durumu.

İletim modunda akım ve gerilim denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_i}{L} \quad (4.28)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = -\frac{V_o}{RC} \quad (4.29)$$

S anahtarının kesimde olma durumu için devre şekil 4.13 'deki gibi çizilebilir. Anahtar kesimde iken bobinden akan akım C, D ve R yükü üzerinden akar. Bobinde depolanan enerji bu şekilde yüke aktarılmış olur.



Şekil 4.13 S anahtarının kesimde olma durumu.

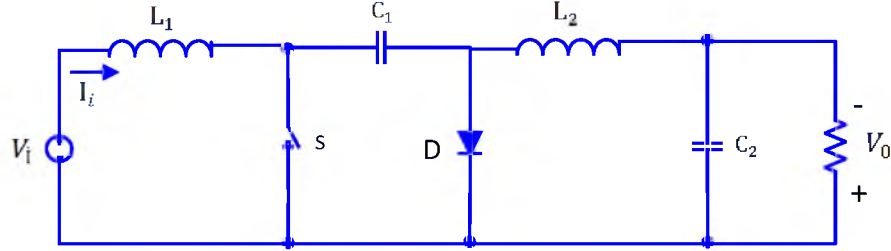
Kesim modunda akım ve gerilim denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_C}{L} \quad (4.30)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = -\frac{I_L}{C} - \frac{V_C}{RC} \quad (4.31)$$

#### 4.1.4. CUK Tipi da-da Dönüştürücüler

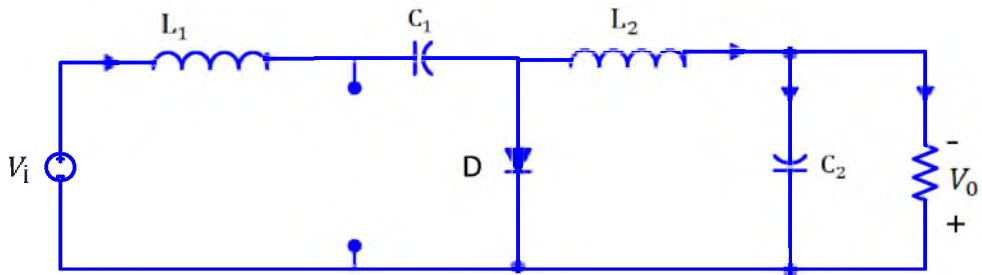
CUK tipi dönüştürücüler, düşürücü-yükseltici dönüştürücülere benzer şekilde çıkış gerilimini düşürebilme ve yükseltebilme özelliklerine sahiptir. Bu dönüştürücüler, yükseltici ve düşürücü tip dönüştürücülerin arka arkaya bağlanması ile elde edilmektedir. CUK tipi dönüştürücülerde de elde edilen çıkış geriliminin polaritesi giriş gerilimine göre ters yönlüdür. Bu dönüştürücülerde enerji depolama elemanı olarak bir kondansatör kullanılmaktadır. Dönüştürücünün devre şeması şekil 4.14’de verilmiştir.



Şekil 4.14 CUK tipi dönüştürücü devre şeması

CUK tipi dönüştürücülerin giriş ve çıkışlarında bulunan bobinler, giriş ve yük akımlarında meydana gelebilecek dalgalanmaların azaltılmasını sağlar. Ancak oluşabilecek yüksek akım dalgalanmalarını taşıyabilecek kapasiteye sahip bir enerji transfer kondansatörüne de ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca çok fazla devre elemanı bulunması bu yapının dezavantajıdır (Mohan ve ark., 2003).

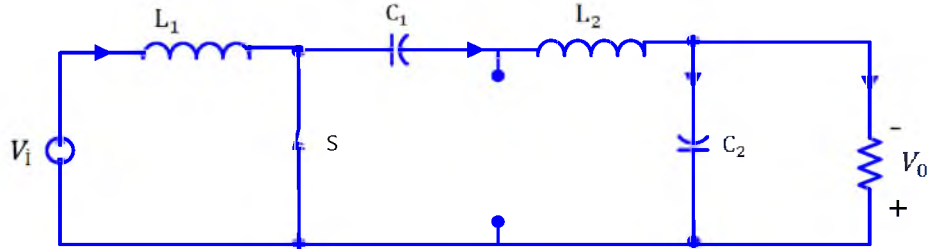
Şekil 4.15’de görüldüğü gibi CUK tipi dönüştürücüdeki S anahtarlama elemanının kesimde olduğu durumda akım, ters kutuplanan diyot üzerinden akmaktadır. Bu durumda  $C_1$  kondansatörü;  $V_i$ ,  $L_1$ ,  $C_1$  ve D diyotundan oluşan kapalı devreden dolayı  $V_i + VL$  gerilimine maruz kalır.



Şekil 4.15 CUK tipi dönüştürücüde S anahtarının kesimde olma durumu.

Anahtar iletim durumunda iken  $L_1$  bobini üzerinde oluşan enerjiyi anahtarın kesimde olduğu durumda harcamaktadır. Ayrıca  $L_2$  bobininde biriken enerji D diyotu üzerinden yükü beslerken aynı zamanda  $C_2$  kondansatörü de yükü beslemektedir.

Anahtarın kesimde olduğu zaman aralığında  $C_1$  kondansatörü kaynak ve yük arasındaki enerji aktarımında aracılık yapmaktadır. Devrede bulunan D diyotu ise kontrolsüz bir anahtar olarak çalışmakta ve S anahtarı ile senkron bir anahtarlama yapmaktadır (Mohan ve ark., 2003).



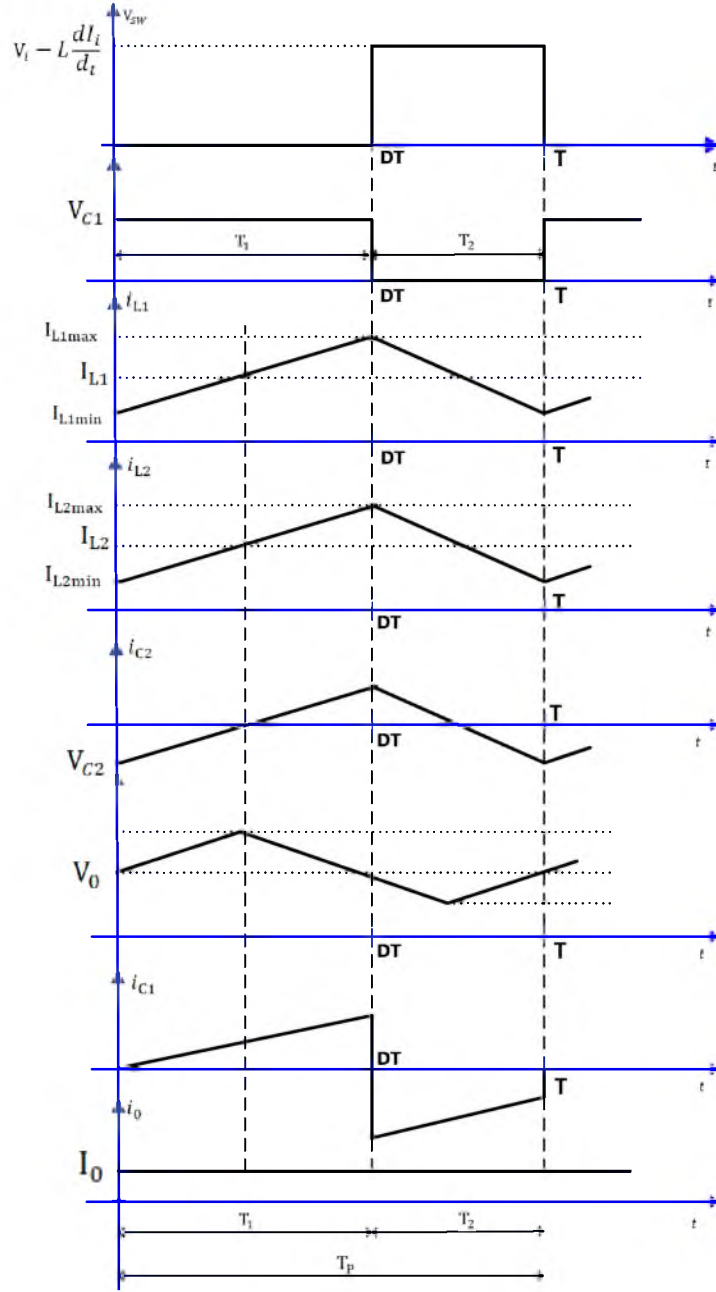
Şekil 4.16 CUK tipi dönüştürücüde S anahtarının iletimde olma durumu.

Şekil 4.16’da görüldüğü gibi CUK tipi dönüştürücüdeki S anahtarının iletimde olduğu durumda  $L_1$  ve  $L_2$  üzerinden akan akımlar S anahtarı üzerinden akmaktadır.  $V_{C1} > V_0$  olduğundan  $C_1$ , S anahtarı üzerinden yüke ve  $L_2$  bobinine enerji aktarır. Böylece  $L_2$  bobini üzerinden akan akım artar. Girişteki enerji  $L_1$  bobinine aktarıldığından  $L_1$  bobini üzerinden akan akım da artmaktadır. Devrenin sağ tarafına baktığımızda  $C_1$  kondansatörünün depoladığı gerilim D diyodunu ters yönde kutuplar ve bu yüzden anahtar iletim durumunda olduğunda devredeki diyot üzerinden akım akmaz.  $C_1$  kondansatörü üzerindeki enerji  $C_2$  kondansatörü,  $L_2$  bobini ve yük üzerinde boşalmaktadır (Mohan ve ark., 2003; allaboutcircuits, 2021). CUK tipi dönüştürücünün ideal koşullarda çıkış gerilimi ve akımı aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilir.

$$V_0 = \frac{D}{1-D} V_i \quad (4.32)$$

$$I_i = \frac{D}{1-D} I_0 \quad (4.33)$$

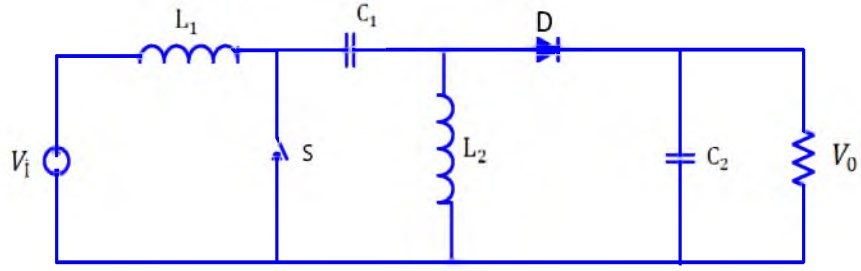
CUK tipi dönüştürücü temel dalga şekilleri şekil 4.17’de yer almaktadır.



Şekil 4.17 CUK tipi dönüştürücü temel dalga şekilleri.

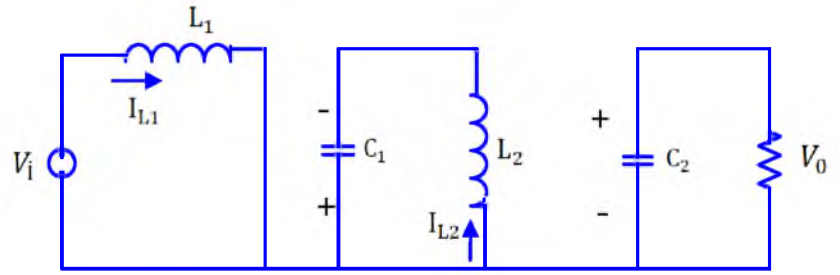
#### 4.1.5. Sepic Tipi da-da Dönüştürücüler

Sepic tipi da-da dönüştürücüler iki bobin ve iki kondansatörden oluşmaktadır. Bununla birlikte çıkış gerilimi giriş gerilimi ile aynı polarite de olup daha düşük ya da daha yüksek olabilmektedir.  $L_2$  bobini sayesinde yük akımındaki dalgalanma CUK tipi dönüştürücüye oranla daha azdır (Erickson, 1999; Ion and Predusca, 2008). Şekil 4.18 'de Sepic tipi da-da dönüştürücü devre yapısı görülmektedir.

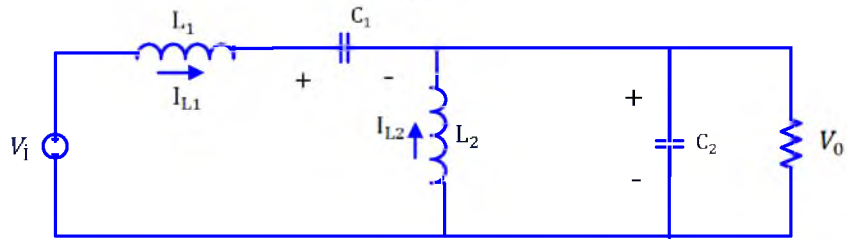


Şekil 4.18 Sepic tipi da-da dönüştürücü devre şeması.

Sepic tipi da-da dönüştürücünün iletim ve kesim durumlarındaki devre şemaları şekil 4.19a ve 4.19b’de ayrı ayrı verilmiştir. S anahtarı iletimde iken  $L_1$  bobini enerjilenir ve akım doğrusal olarak artar. Aynı zamanda  $C_1$  kondansatörü deşarj olur ve enerjisini  $L_2$  bobinine aktarır.  $L_2$  bobini de enerjilenir ve akımı doğrusal olarak artar. Diğer taraftan  $C_2$  kondansatörü yükü beslemeye devam eder. S anahtarı kesime götürüldüğünde ise D diyotu iletime geçer ve  $C_1$  kondansatörü,  $L_1$  bobini ve kaynak tarafından şarj edilir. Aynı zamanda  $C_2$  kondansatörü de kaynak,  $L_1$  ve  $L_2$  bobinleri tarafından şarj edilir ve yük beslenir (Falin, 2008; Pressman,1998).



(a)



(b)

Şekil 4.19 Sepic tipi da-da dönüştürücü a) iletim durumu b) kesim durumu

İdeal koşullarda dönüştürücü çıkış gerilimi ve akımı aşağıdaki gibi ifade edilir.

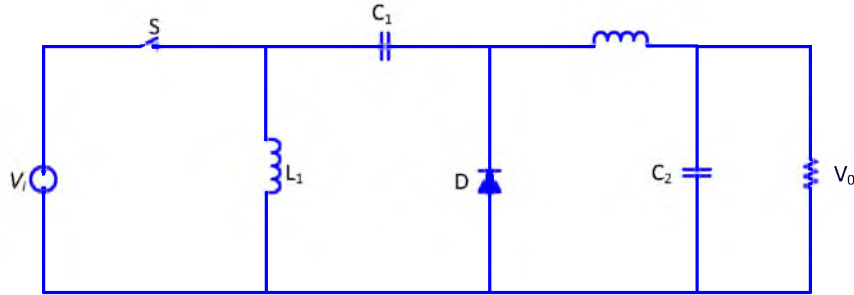
$$V_0 = \frac{D}{1-D} V_i \quad (4.34)$$

$$I_i = \frac{D}{1-D} I_o \quad (4.35)$$

Sepic dönüştürücü diğer dönüştürücü yapıları ile karşılaştırıldığında şu avantajlara sahiptir. Tek anahtar kullanılması, sürekli giriş akımı, ayarlı çıkış gerilimi, girişteki akım dalgalanmasının azaltılması, aşırı akım sınırlama yeteneği, sürme devresinin kolay tasarımı ve pozitif çıkış gerilimi (Falin, 2008).

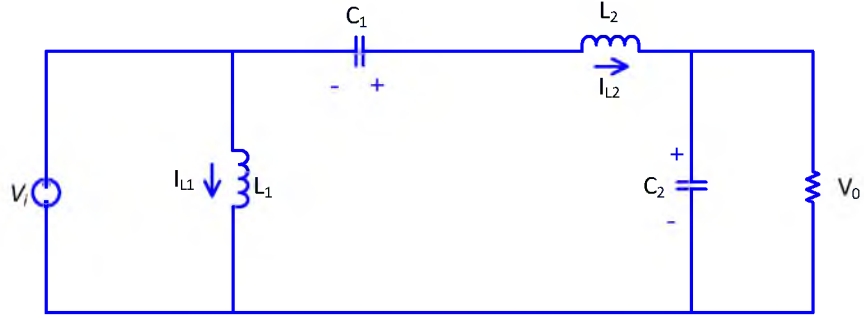
#### 4.1.6. Zeta Tipi da-da Dönüştürücüler

Zeta dönüştürücüler, 1980 li yıllarda Sepic tipi dönüştürücünün dual yapıdaki modeli olarak literatüre girmiştir. Yunan alfabesinde “zeta” altı anlamına geldiğinden ve literatüre giren altıncı da-da dönüştürücü olmasından dolayı bu dönüştürücüye Zeta ismi verilmiştir. Zeta tipi dönüştürücüler iki kondansatör ve iki bobine sahiptir. Ayrıca Sepic tipi dönüştürücüde olduğu gibi giriş gerilimini yükselten ya da düşüren modlarda çalışabilen bir dönüştürücüdür. Bu dönüştürücülerde, CUK ve düşürücü-yükseltici tip dönüştürücülerin aksine giriş ve çıkış gerilim yönlerinin aynı olduğu için dağıtımlı güç sistemlerinde kullanılmaya daha uygundur (Jozwik and Kazimierczuk, 2013). Dönüştürücüye ait devre yapısı şekil 4.20 'de verilmiştir.

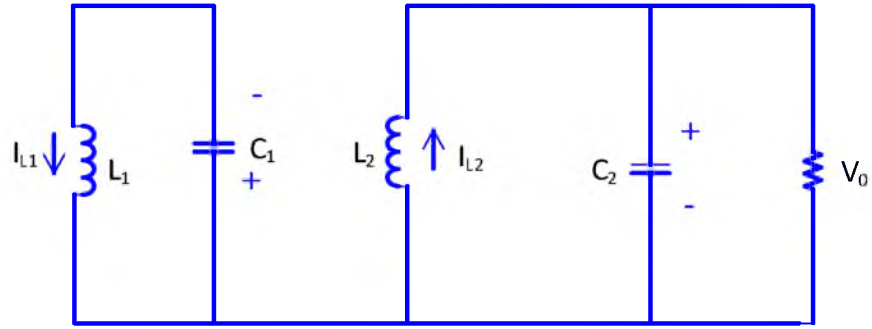


Şekil 4.20 ZETA tipi da-da dönüştürücü devre yapısı.

Zeta dönüştürücüler şarj ve deşarj modu olmak üzere iki farklı çalışma moduna sahiptir. Bu modlar anahtarın iletimde diyotun kesimde olduğu ve anahtarın kesimde diyotun iletimde olduğu modlardır. S anahtarını iletimdeyken  $L_1$  ve  $L_2$  bobinleri giriş kaynağından beslenmektedir. S anahtarını kesimdeyken diyot iletime girmekte ve  $L_2$  bobininde biriken enerji yüke aktarılmaktadır. Gerilim ve akım bağıntısı düşürücü-yükseltici dönüştürücülerle aynıdır. Zeta tipi dönüştürücülerin yük tarafındaki akım dalgalanması CUK tipi dönüştürücülerde benzerdir ve Sepic tipi dönüştürücüye göre daha fazladır (Raj and Urmila, 2013). Dönüştürücüye ait çalışma modları şekil 4.21a ve 4.21b' de yer almaktadır.



(a) İletim durumu



(b) Kesim durumu

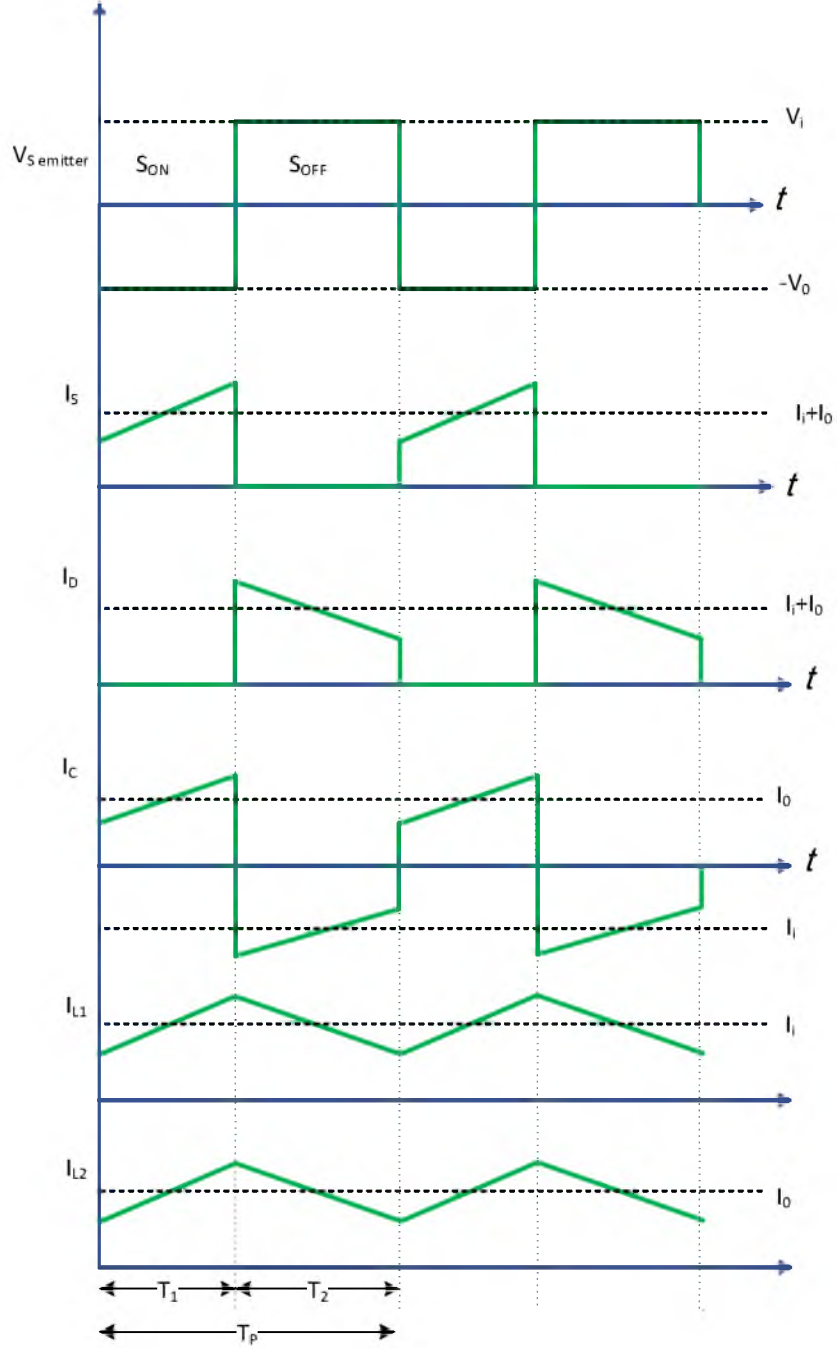
Şekil 4.21 Zeta tipi dönüştürücünün çalışma modları.

İdeal koşullarda dönüştürücünün çıkış gerilimi ve akımı,

$$V_0 = \frac{D}{1-D} V_i \quad (4.36)$$

$$I_i = \frac{D}{1-D} I_0 \quad (4.37)$$

Zeta tipi dönüştürücü temel dalga şekilleri şekil 4.22’de verilmiştir S anahtarı emiter voltajı  $V_i$  ve  $V_0$  arasında değişmektedir (analog, 2021).



Şekil 4.22 Zeta tipi dönüştürücü temel dalga şekilleri.

#### 4.1.7. Sarmaşık Tipi Yükseltici da-da Dönüştürücüler

Anahtarlamalı da-da dönüştürücüler düşük güçlü motor sürücüleri, ayarlı güç kaynakları, akü şarj sistemleri gibi birçok uygulamada yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Yüksek frekansta anahtarlama yapıldığından EMI meydana gelir. EMI'yi azaltmak amacıyla kullanılan yumuşak anahtarlama teknikleri, uygulaması zor ve devre yapısında değişikliğe neden olurken gücün yükseltilmesine fazla bir katkı sağlamamaktadır (Canesin and Gonçalves, 2005). Yapılan araştırmalara göre izole

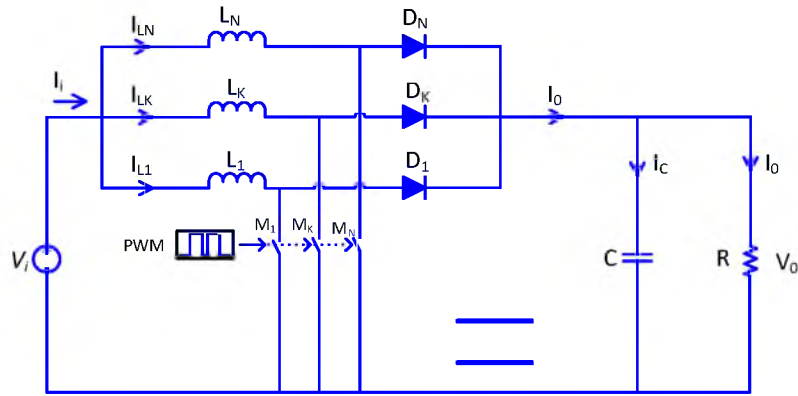
edilmemiş da-da dönüştürücüler, izole edilmiş dönüştürücülere göre daha düşük boyut, daha düşük maliyeti ve verimliliklerinin daha yüksek olması nedeniyle gerilim yükseltici uygulamalarında daha avantajlı görülmektedir. Geleneksel yükseltici ve düşürücü-yükseltici dönüştürücüler teorik olarak yüksek gerilim kazancına sahiptir. Bununla birlikte, pasif elemanların eşdeğer seri direnci ve çıkış diyotunun ters geri kazanım problemi gibi birçok sınırlama faktörü nedeniyle, pratikte yüksek bir gerilim kazancı elde edilememektedir. Bu nedenle güç kapasiteleri bir kaç sebepten dolayı sınırlıdır. Bu sebepler akım arttırıldığında anahtarlama elemanları üzerindeki akım streslerinin artmasına neden olur. Ayrıca diyotların ters dönüşüm akımları ve oluşan rezonans akımları elemanların nominal sınırlarını aşacak düzeylere yükselir. Akımın arttırılması ile yüksek ısınma ve doyum probleminin oluşmaması için kullanılan indüktörün boyutunun arttırılması gerekir. Geleneksel CUK, Sepik ve Zeta dönüştürücüler, yükseltici dönüştürücü olarak kullanılabilir. Ancak bu dönüştürücüler, yükseltici dönüştürücüden daha karmaşık yapılara sahiptir. Sepic ve yükseltici dönüştürücüleri birleştirmek için çalışmalar devam etmektedir. Ancak daha fazla eleman kullanılmasına rağmen, gerilim kazancı sınırlıdır. Bu sınırlamalardan dolayı geleneksel tek anahtarlı yükseltici dönüştürücüler için paralelleme yöntemleri geliştirilmiştir. Yüksek gerilim kazancı sağlamak için kullanılan bu yöntemde geleneksel yükselten dönüştürücüde kullanılan tek anahtar yerine iki veya daha fazla anahtar paralel bağlanmaktadır.

Paralel kullanılan anahtarların tümüne aynı tetikleme sinyali uygulanır. Bu yöntemde, sadece anahtar akımının değeri bölüştürüldüğünden, kullanılan diyot ve indüktör ile ilgili güç sınırlamaları devam etmektedir. Ayrıca, kullanılan anahtarların bazı üretim farklılıklarından dolayı, akımın anahtarlar arasında eşit bölüştürülemediği durumu söz konusu olabilmektedir (Genç, 2010; Ardavan and Ghazanfar, 2017).

Bazı uygulamalarda, birden çok geleneksel yükselten dönüştürücü modül halinde tasarlanarak belli güç kapasitesini karşılamak üzere birlikte kullanılırlar. Bu yöntemin en büyük dezavantajı, pahalı ve fiziksel boyutun büyük olmasıdır. Her bir modül için ayrı soğutucu kullanılmaktadır. Bir önceki yöntemde olduğu gibi modüller arası akımın eşit paylaşılması zordur. Modüller arasındaki akım farklılıkları sirkülasyon akımlarına neden olmaktadır (Wu, 2005).

Sarmaşık tip yükselten dönüştürücü devresi yarıiletken anahtarlama elemanları ile indüktör ve diyotlardan oluşmaktadır. Şekil 4.23'te görüldüğü gibi N adet anahtar sayısına eşit sayıda güç katları paralel olarak bağlanmıştır. Bu paralel güç katlarının anahtarlarına aynı tetikleme sinyalleri uygulanır. Giriş akımı, paralel bağlanmış güç

katlarının çektiği akımın toplamına eşittir. Bütün anahtarlar aynı tetikleme sinyali ile anahtarlanır ve güç katları arası akımın eşit paylaşılmasına yönelik ek kontrol devresi kullanılmaz. Bu yöntemde benzer olmayan indüktörler nedeni ile güç katları arasındaki akımın eşit bölünmemesine yol açar. Bu bakımdan eşit indüktörlerin kullanılması son derece önemlidir. Diğer yöntemlere göre en önemli avantajı, birden çok indüktör kullanıldığından büyük boyutlu indüktöre ihtiyaç duyulmaz. Çünkü toplam enerji depolama ihtiyacı birden çok indüktör tarafından sağlanmaktadır. Bu avantaja rağmen, giriş akımının dalgacık oranının yüksek olması, giderilmesi gereken önemli sorundur (Genç, 2010).



Şekil 4.23 N-adet güç katı paralel bağlanmış sarmaşık tip yükseltici devre yapısı.

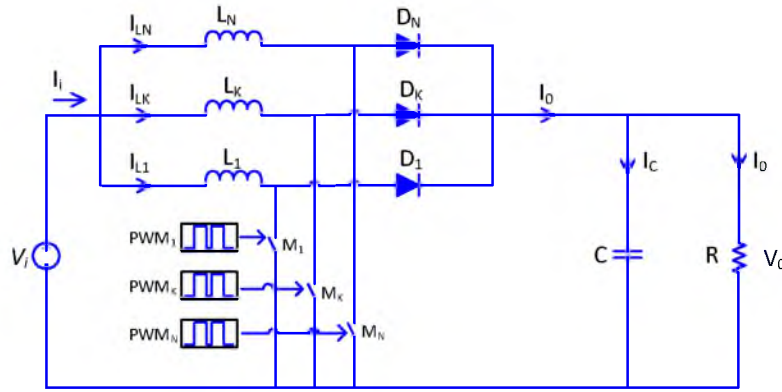
Tek fazlı kuplaj indüktörlü (coupled inductor-CI) dönüştürücülerin avantajlarına rağmen, giriş akımında meydana gelen dalgalanmalardan dolayı giriş kapasitörünün ömrü kısalmaktadır. Giriş akımında meydana gelen bu dalgalanmanın azaltılması için, sargıları çapraz bağlı kuplaj indüktörlü (winding cross-coupled inductor-WCCI) sarmaşık tip yükseltici dönüştürücüler önerilmiştir. Bu topolojide, kaçak indüktansdan dolayı oluşan enerjiyi absorbe etmek ve yumuşak anahtarlama işlemini gerçekleştirmek için pasif veya kenetlenmiş devreler kullanılır (Ardavan and Ghazanfar, 2017).

Sarmaşık tip dönüştürücüler yüksek güç ve akımlarının yanı sıra yüksek verime de sahiptir. Paralel bağlı dönüştürücülerin sarmaşık yöntemi ile kullanımı dönüştürücü giriş ve çıkışındaki akım-gerilim dalgalanmalarını azaltmaktadır. Çok sayıda güç devresi elemanının kullanılması bu dönüştürücülerin dezavantajlarından biridir. Özellikle yüksek anahtarlama frekanslarında ve yüksek güçlerde meydana gelen anahtarlama kayıpları sert anahtarlama nedeniyle artmaktadır. Bu durumda yumuşak anahtarlama tekniklerinin kullanımı bir gerekliliktir. Sarmaşık yükseltici dönüştürücülerde yumuşak anahtarlama tekniklerinin kullanımı için yapılan çalışmalar giderek artmaktadır. Genel olarak

yardımcı devrelerde kullanılan eleman sayısı fazla ve birçoğunda devre bileşenleri güç devresi ana hat üzerindedir. Sarmaşık yöntemlerde, genellikle kullanılan yumuşak anahtarlama yöntemlerinden farklı olarak, sıfır gerilim-sıfır akım geçişli yumuşak anahtarlama yöntemi kullanılmış ve bu yöntem her kat için farklı yardımcı anahtarlar ile aynı yumuşak anahtarlama hücresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yardımcı hücrede kullanılan eleman sayısı miktarının az olması önemli avantajlarından biridir (Çoruh, 2013).

#### 4.1.7.1. Faz-Farklı Güç Katı Paralleleme (Sarmaşık paralelleme)

Şekil 4.23’de verilen devre yapısında aynı tetikleme sinyali uygulanan eşit güç katlarının paralel olarak bağlanması uygulamada pratik olsa da, dönüştürücü giriş akımındaki yüksek dalgalanma miktarına bir çözüm üretmemektedir. Bunun için paralel katlardaki kontrol işaretleri arasında faz kaydırma işlemi gerçekleştirilir (Miwa ve ark., 1992). Örnek olarak şekil 4.24’de verilen aynı devre yapısında her bir güç katındaki anahtarlama elemanlarına aralarında faz farkı olan 3 ayrı kontrol sinyalinin uygulanması ile giriş akımındaki dalgalanma miktarı azaltılabilmektedir.



Şekil 4.24 N-adet güç katı paralel bağlanmış faz-farklı sarmaşık tip yükseltici devre yapısı.

Dönüştürücü giriş akımı, paralel bağlanmış güç katlarının çektiği akımların toplamına eşittir. Faz farklı kontrol sinyalleri anahtarlama gerçeğinden, her hangi bir veya birden çok güç katının akımı yükselirken diğer güç katı ya da güç katlarının akımları düşmektedir. Bu nedenle, bütün güç katları akımlarının toplamı olan giriş akımının dalgalanma miktarı bu şekilde düşürülmektedir. Bu yöntemde güç katları arası akımın eşit paylaşılmasına yönelik ek kontrol devresi kullanılır. Teorik olarak güç katı sayısında sınır olmasa da, pratikte çok sayıda güç katına sahip böyle bir devrenin

uygulaması kontrol karmaşıklığı bakımından oldukça zordur. Bu nedenle, pratikte iki veya üç güç katına sahip faz farklı sarmaşık tip yükseltici devre uygulamaları tercih edilir.

Faz farklı sarmaşık tip yükseltici devrenin her bir güç katı için uygulanacak olan kontrol sinyalleri arasındaki faz farkı FF eşitlik 4.38'deki gibi hesaplanır.

$$FF = k \frac{\pi}{N} \quad (4.38)$$

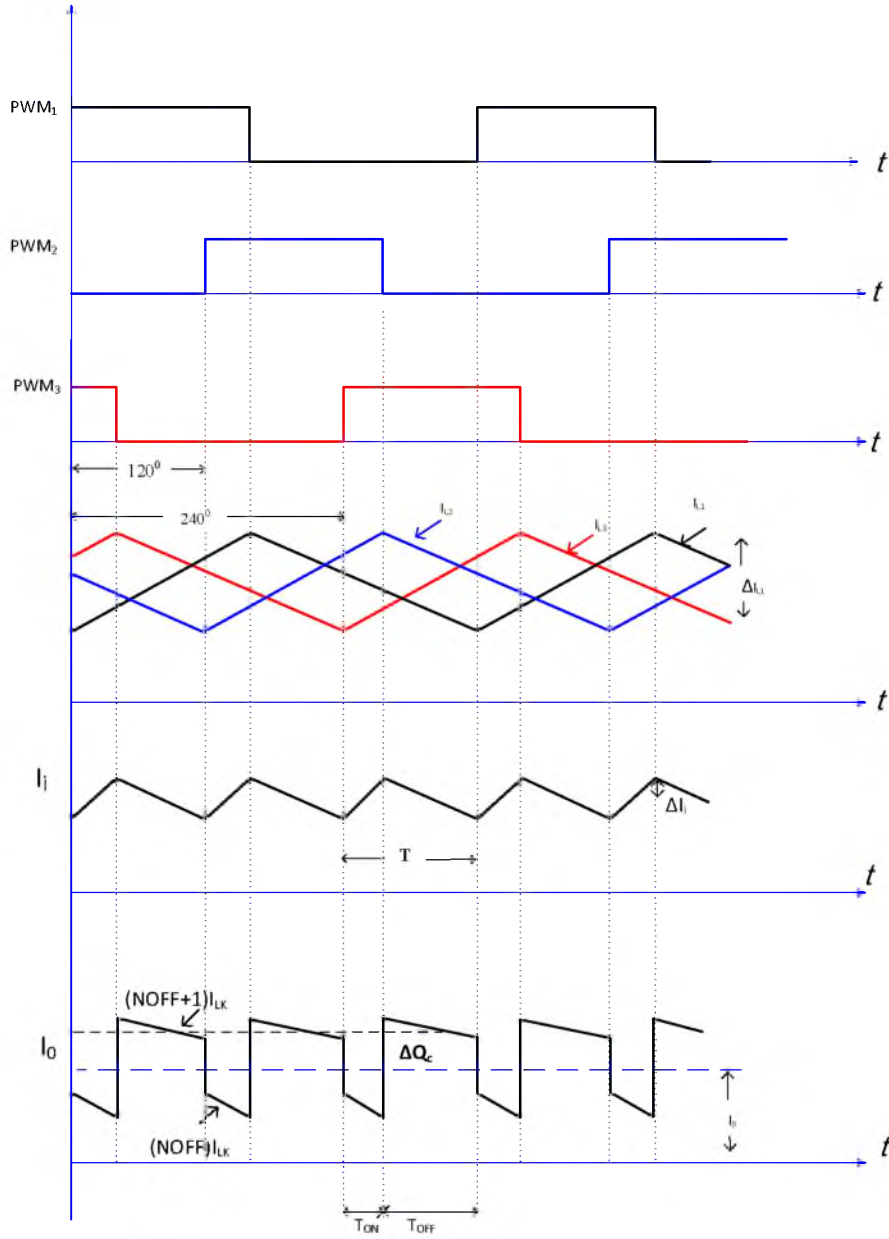
Burada  $k=1,2,\dots,N$  olmak üzere faz farkı bulunacak olan  $k$ 'inci paralel güç katını,  $N$  ise paralel bağlı güç katlarının toplam sayısını ifade etmektedir. Dönüştürücü giriş akımının anahtarlama periyodu  $\tau$ ,

$$\tau = \frac{T_s}{n} \quad (4.39)$$

olarak ifade edilir. Sarmaşık yükseltici devre giriş akımının görev oranı  $q$  ile ifade edilecek olursa, giriş akımındaki dalgalanma miktarı eşitlik 4.40 ile ifade edilir (Mirzaei, 2007).

$$\Delta i_i = \frac{V_i(1-q)}{L(1-D)} q \tau \quad (4.40)$$

Şekil 4.25 'de üç adet güç katı içeren faz farklı sarmaşık tip yükseltici devrenin anahtarlama sinyalleri, indüktör akımları ile giriş ve çıkış akımlarına ait grafikler verilmiştir.



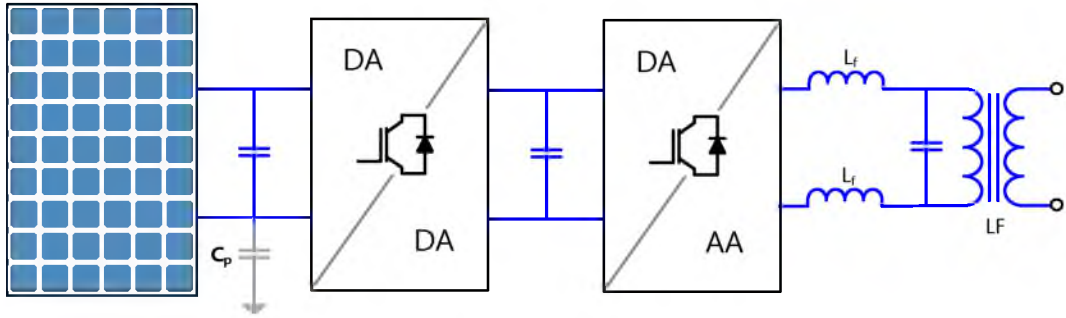
Şekil 4.25. 3-adet güç katı içeren faz farklı sarmaşık tip yükseltici devrenin temel dalga şekilleri.

Şekilden de görüldüğü üzere devrede bir ile ikinci katlar arası faz farkı  $120^\circ$  iken birinci ile üçüncü katlar arası faz farkı  $240^\circ$  olmaktadır. Yani her bir güç katı, bir öncekine göre  $120^\circ$  faz farkı ile anahtarlanmaktadır. Devrenin detaylı analizi kaynak (Kaya, 2008; Shin ve ark.,2005) 'da verilmiştir. Sonuç olarak sarmaşık tekniğinde çok sayıda aynı tip dönüştürücünün faz kaydırma tekniği ile birlikte kullanılması, anahtarlama frekansını ve elemanlar üzerindeki stresleri arttırmadan dönüştürücü giriş akımındaki dalgalanmanın genliğini düşürür. Bu özellikleri nedeni ile sarmaşık tekniğinin güç faktörü düzeltme devrelerinde kullanımı yaygındır (Choi and Balogh, 2012). Sarmaşık tip yükseltici da-da

dönüştürücülerin kararlı durum analizi kaynak (Genç, 2010; Kaya, 2008; Shin ve ark., 2005)'da detaylı olarak verildiğinden burada tekrar değinilmemiştir.

## 4.2. İzolasyonlu da-da Dönüştürücüler

İzolasyonlu (transformatörlü) da-da dönüştürücülerin çalışma prensipleri izolasyonsuz dönüştürücülere benzer. İkisi arasındaki temel fark izolasyonlu dönüştürücünün giriş ve çıkışının transformatör ile birbirinden izole edilmesidir. Şekil 4.26 'da izolasyonlu bir da-da dönüştürücünün blok diyagramı verilmiştir.



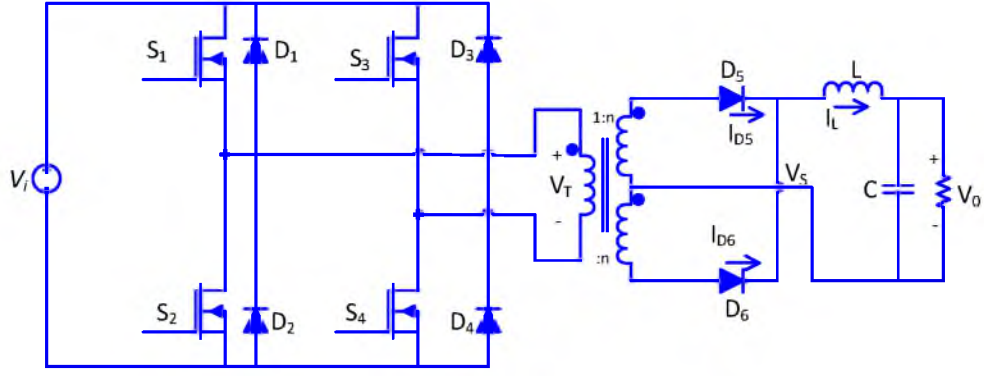
Şekil 4.26 İzolasyonlu da-da dönüştürücü prensip şeması.

İzolasyonlu da-da dönüştürücüler; tam köprü, yarım köprü, ileri yönlü, geri dönüşlü ve push-pull dönüştürücüler olmak üzere 5 ayrı grupta sınıflandırılır. Bu dönüştürücüler genel olarak yükseltici, düşürücü ve düşürücü-yükseltici dönüştürücülerden birinin özelliğini taşımaktadır.

1. Tam köprü (Full Bridge) da-da dönüştürücüler
2. Yarım köprü (Half Bridge) da-da dönüştürücüler
3. İleri yönlü (Forward) da-da dönüştürücüler
4. Geri yönlü (Flyback) da-da dönüştürücüler
5. Push-Pull da-da dönüştürücüler

### 4.2.1. Tam Köprü da-da Dönüştürücüler

İzolasyonlu tam köprü da-da dönüştürücü devresi Şekil 4.27 'de gösterilmiştir. İzolasyonu sağlamak için kaynak ve yük arasında yüksek frekanslı bir transformatör kullanılmıştır. Bu dönüştürücü genelde düşük çıkış gerilimi istenilen uygulamalarda tercih edilmektedir (Erickson, 1999; Saygı, 2017).



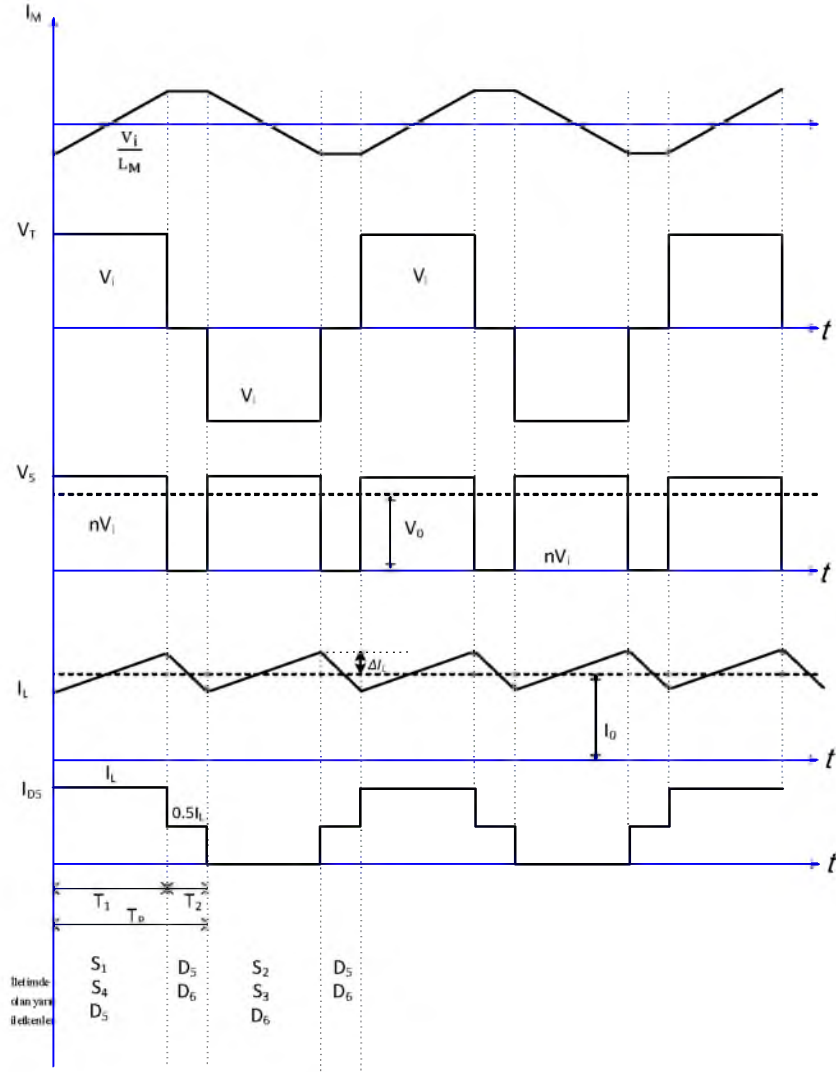
Şekil 4.27 İzolasyonlu tam köprü da-da dönüştürücü.

Bu dönüştürücüler H-köprü evirici, yüksek frekans transformatörü, doğrultucu ve bir LC filtre olmak üzere dört ana kısımdan oluşmaktadır. H-köprü evirici  $S_1$ - $S_4$  olmak üzere dört adet anahtarlama elemanından oluşmaktadır. Evirici çıkışı  $+V_i$ ,  $-V_i$  ve 0 olmak üzere üç gerilim seviyesine sahiptir.  $S_1$ - $S_4$  anahtarları aynı anda iletimde iken evirici çıkışında  $+V_i$  gerilimi,  $S_2$ - $S_3$  anahtarları aynı anda iletimde iken evirici çıkışında  $-V_i$  gerilimi oluşur. Tüm anahtarlar kesimdeyken transformatörün primer sargısına uygulanan gerilim sıfırdır.

Dönüştürücünün çıkış gerilimi eşitlik 4.41'deki gibidir.

$$V_0 = nDV_i \quad (4.41)$$

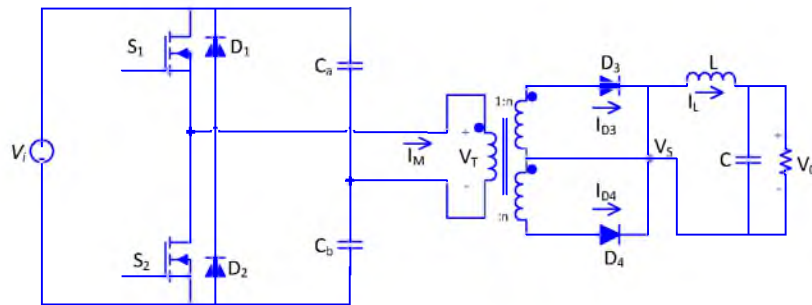
Burada  $D$  görev oranı olarak adlandırılır ve  $0 \leq D < 1$  aralığında değiştirilerek çıkış gerilimi  $V_0$  kontrol edilir.  $D_5$  ve  $D_6$  diyotları transformatörün sekonder tarafındaki alternatif gerilimi doğrultur. Bu doğrultulmuş gerilim daha sonra bir LC filtresinden geçirilerek çıkışa aktarılır. Dönüştürücünün temel dalga şekilleri Şekil 4.28'de verilmiştir. Tam köprü da-da dönüştürücüler genellikle anahtarlama güç kaynaklarında, 750 W ve üzerindeki güçlerde kullanılmaktadır. Devre daha düşük güçler için daha fazla eleman içerdiğinden, maliyet açısından kullanılması tercih edilmemektedir (Erickson, 1999; Saygi, 2017).



Şekil 4.28 Tam köprü da-da dönüştürücünün temel dalga şekilleri.

#### 4.2.2. Yarım Köprü da-da Dönüştürücüler

İzolasyonlu yarım köprü da-da dönüştürücü devre yapısı şekil 4.29'da gösterilmiştir.



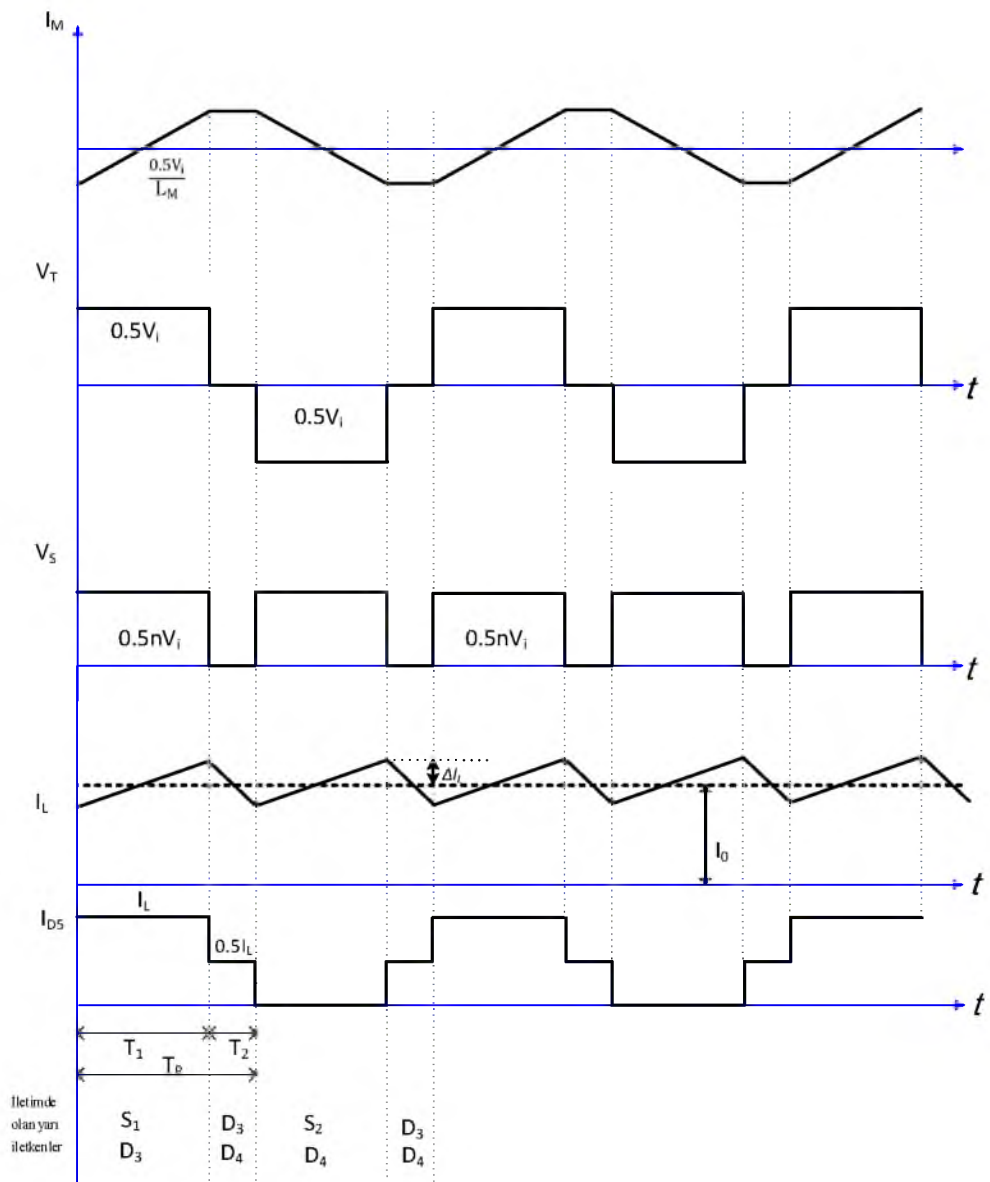
Şekil 4.29 İzolasyonlu yarım köprü da-da dönüştürücü.

Tam köprü da-da dönüştürücülerden farklı olarak devre yapısında iki adet anahtarlama elemanı ve ters paralel bağlı diyotlar yerine yüksek değerli iki adet kapasitör vardır.

Dönüştürücünün çıkış gerilimi eşitlik 4.42 deki gibidir (Rong-Jong ve ark.,2008).

$$V_0 = 0.5nDV_i \quad (4.42)$$

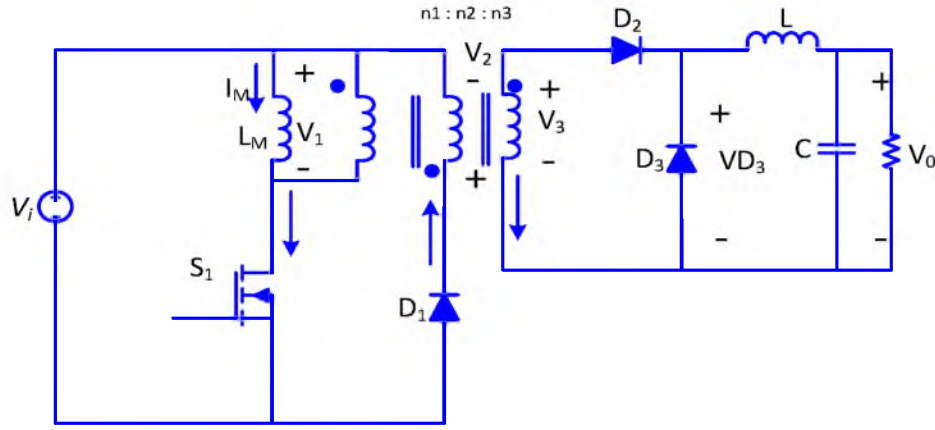
Bu dönüştürücülerin düşük güçlerde kullanılması daha uygundur. Dönüştürücünün temel dalga şekilleri şekil 4.30 'da yer almaktadır (Erickson, 1999; Saygı, 2017).



Şekil 4.30 Yarı köprü da-da dönüştürücünün temel dalga şekilleri.

### 4.2.3. İleri Yönlü da-da Dönüştürücüler

İzolasyonlu ileri yönlü da-da dönüştürücünün tek anahtarlı olan devre şeması şekil 4.31’de gösterilmektedir. Yüksek güçlü uygulamalarda tercih edilir (Erickson, 1999; Saygı, 2017). İleri yönlü da-da dönüştürücüler, düşürücü tip dönüştürücü tasarımından türetilmiştir. Bu dönüştürücüler genel olarak 60V-200V ile 150W-200W aralığında imal edilirler. İleri yön dönüştürücüler, Push-Pull dönüştürücülere göre daha gelişmiş bir yapıya sahiptir. Ayrıca kullanılan anahtarlama elemanının tek, maliyet ve devre boyutunun daha küçük olmasından dolayı daha avantajlıdır.



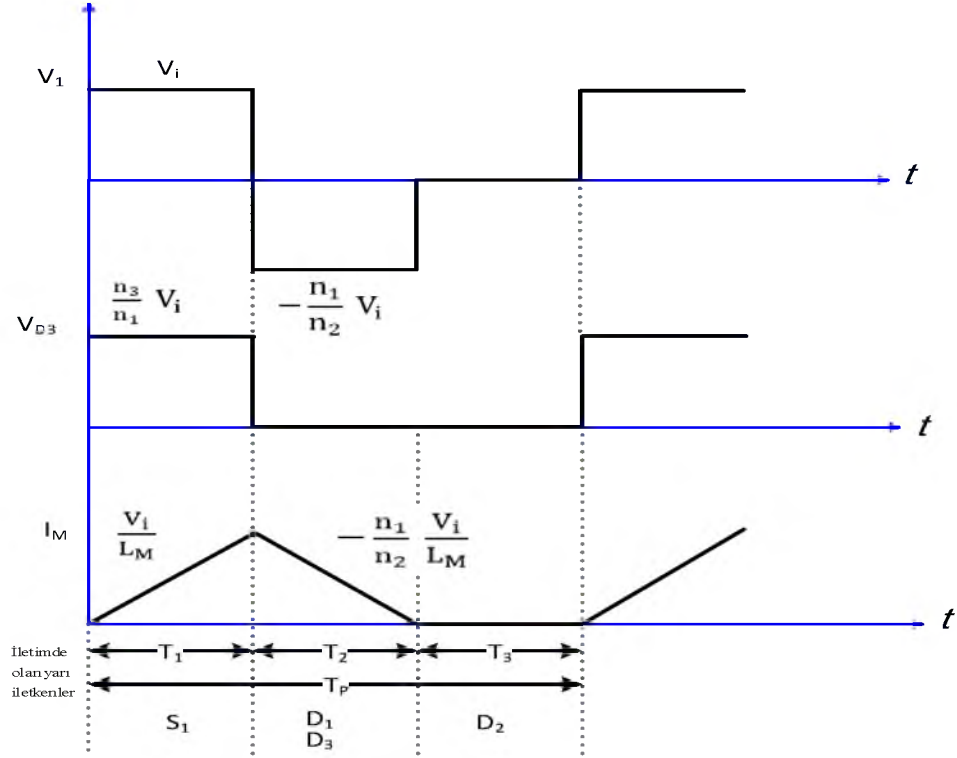
Şekil 4.31 İzolasyonlu ileri yönlü da-da dönüştürücü.

İleri yönlü da-da dönüştürücülerin tercih edilme nedenleri şöyle özetlenebilir. i) Yüksek giriş gerilimine bağlı olarak daha düşük gerilim elde edilmesi, ii) Geri yönlü dönüştürücülere göre çıkış gücünün daha yüksek olması ve iii) Tasarım kolaylığı. Genel olarak ileri yönlü dönüştürücülerde tek anahtarlama elemanı kullanılmaktadır. Fakat iki anahtarlama elemanının kullanıldığı gelişmiş yapıları da bulunmaktadır (Brown, 2001; Yang, 2000). İki anahtarlı olan modeller, yarım köprü dönüştürücülerle aynı güçlerdeki uygulamalarda kullanılmaktadır. Dönüştürücünün temel dalga şekilleri şekil 4.32’de yer almaktadır (Erickson, 1999; Saygı, 2017).

İleri yönlü dönüştürücünün çıkış gerilimi eşitlik 4.43’deki gibi ifade edilir.

$$V_0 = \frac{n_3}{n_1} n D V_i \quad (4.43)$$

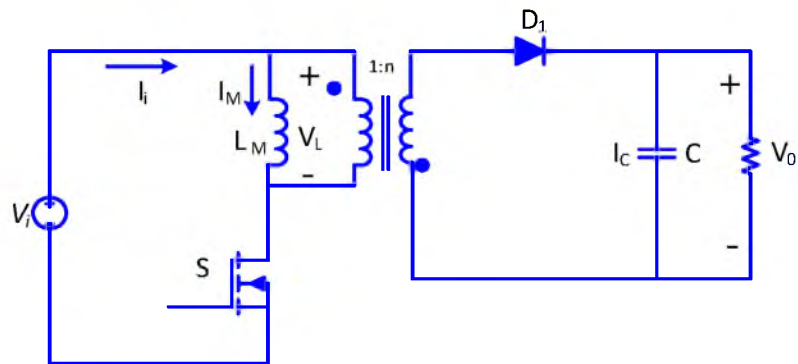
Burada  $n_1$  ve  $n_2$  transformatörün sarım sayılarıdır.  $n_1=n_2$  için görev oranı,  $0 \leq D < 0.5$  olarak sınırlandırılmıştır.



Şekil 4.32 İzolasyonlu ileri yönlü da-da dönüştürücü temel dalga şekilleri.

#### 4.2.4. Geri Yönlü da-da Dönüştürücüler

Geri yönlü da-da dönüştürücüler temel olarak düşürücü-yükseltici dönüştürücülere benzer. Yapısında kullanılan transformör sayesinde izoleli bir yapı sunmaktadır.



Şekil 4.33 İzolasyonlu geri yönlü da-da dönüştürücü.

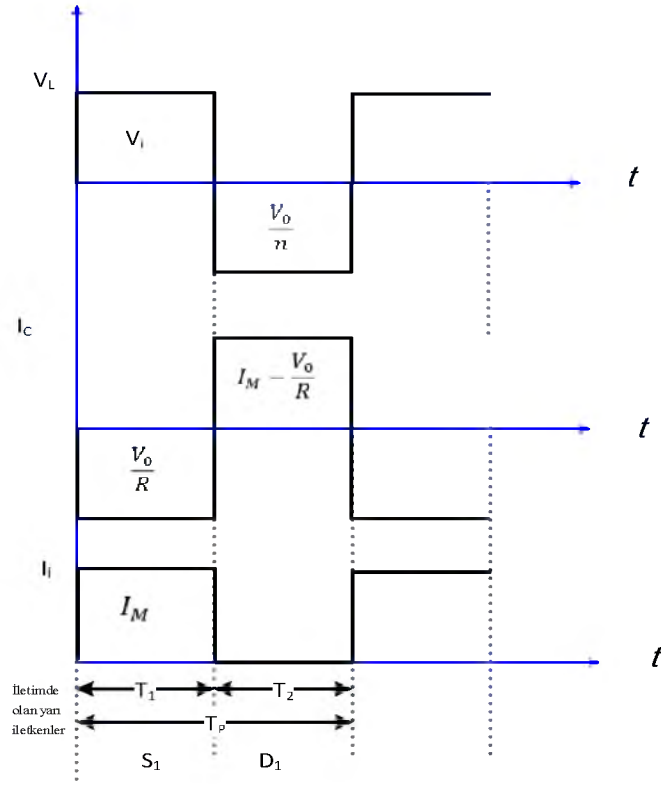
Şekil 4.33’de yer alan geri yönlü dönüştürücü devresinde S anahtarı ilettime girdiğinde  $V_i$  gerilimi primer sargısına uygulanır. Sekonder sargının primer sargıya göre ters yönde kutuplanmasından dolayı  $D_1$  diyotu da ters yönde kutuplanır ve bu nedenle sekonder sargıdan akım akmaz. Yük akımı C kondansatörü ile sağlanır. Primer sargı

uçlarında sabit bir gerilim olduğundan primer sargı akımının artışı doğrusal olur (Pressman,1998). S anahtarı kesime girdiğinde hava aralığında ve manyetik çekirdekte depolanan enerji sekonder sargı üzerinden yüke aktarılır (Xiangjun ve ark., 2003). Sekonder sargı uçlarında sabit bir gerilim olduğundan, akım doğrusal olarak azalır. D<sub>1</sub> diyotu iletime geçince Lm bobininde biriken enerji yüke aktarılır (Erickson, 1999; Saygı, 2017). Geri yönlü da-da dönüştürücülerin başlıca özellikleri şöyle sıralanabilir. Düşük güçler için yüksek frekanslı transformatör (kuplajlı bobin) tasarımı basittir. Bileşen sayısı az olduğundan kurulum maliyeti düşüktür. Manyetik nüve olarak sadece transformatör kullanılır. Çıkış filtresinde bobin yoktur. Diğer yapılarda filtre indüktansı üzerinde oluşan tıkama geriliminin olmaması çıkış diyotu maliyetini azaltır. Çıkış devresinde sekonder bobini dışında fazladan bobin yoktur. Çıkış bobini olmadığından geçici durumlara hızlı cevap verir.

Geri yönlü dönüştürücünün çıkış gerilimi eşitlik 4.44 deki gibi ifade edilir.

$$V_0 = n \frac{D}{1-D} V_i \quad (4.44)$$

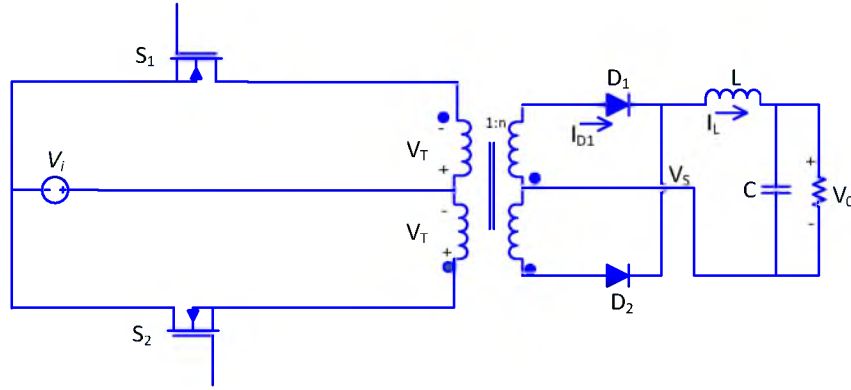
Manyetik nüve kısıtlamalarından dolayı 5W-250W aralığındaki düşük güçlü uygulamalarda tercih edilir. Dönüştürücüye ait temel dalga şekilleri şekil 4.34'de gösterilmiştir.



Şekil 4.34 İzolasyonlu geri yönlü da-da dönüştürücünün temel dalga şekilleri.

#### 4.2.5. Push-Pull da-da Dönüştürücüler

Push-Pull dönüştürücüler giriş gerilimini transformator kullanarak değiştiren anahtarlama bir da-da dönüştürücü tipidir. Push-pull dönüştürücünün en belirgin özelliği birincil transformatorun Push-pull devresindeki transistör çiftleri tarafından giriş hattından gelen akımla beslenmesidir. Transistörler dönüşümlü olarak açılıp kapanarak transformatordeki akımı periyodik olarak tersine çevirir. Bu nedenle anahtarlama döngüsünün her iki yarısı boyunca akım hattan çekilir. Bu durum giriş akımının açılıp kapatılan tek bir transistör tarafından beslendiği düşürücü-yükseltici tip dönüştürücüler ile zıttır. Bu nedenle akım sadece anahtarlama döngüsünün yarı süresi boyunca hattan çekilir. Diğer yarısında ise çıkış gücü, güç kaynağındaki indüktör ve kapasitörlerde depolanan enerji tarafından sağlanır. Push-pull dönüştürücüler daha sabit giriş akımına sahiptir. Giriş hattında daha az gürültü oluşturur ve daha yüksek güç uygulamalarında daha verimlidir. Push-pull düşürücü dönüştürücü devre modeli Şekil 4.35’deki gibidir.

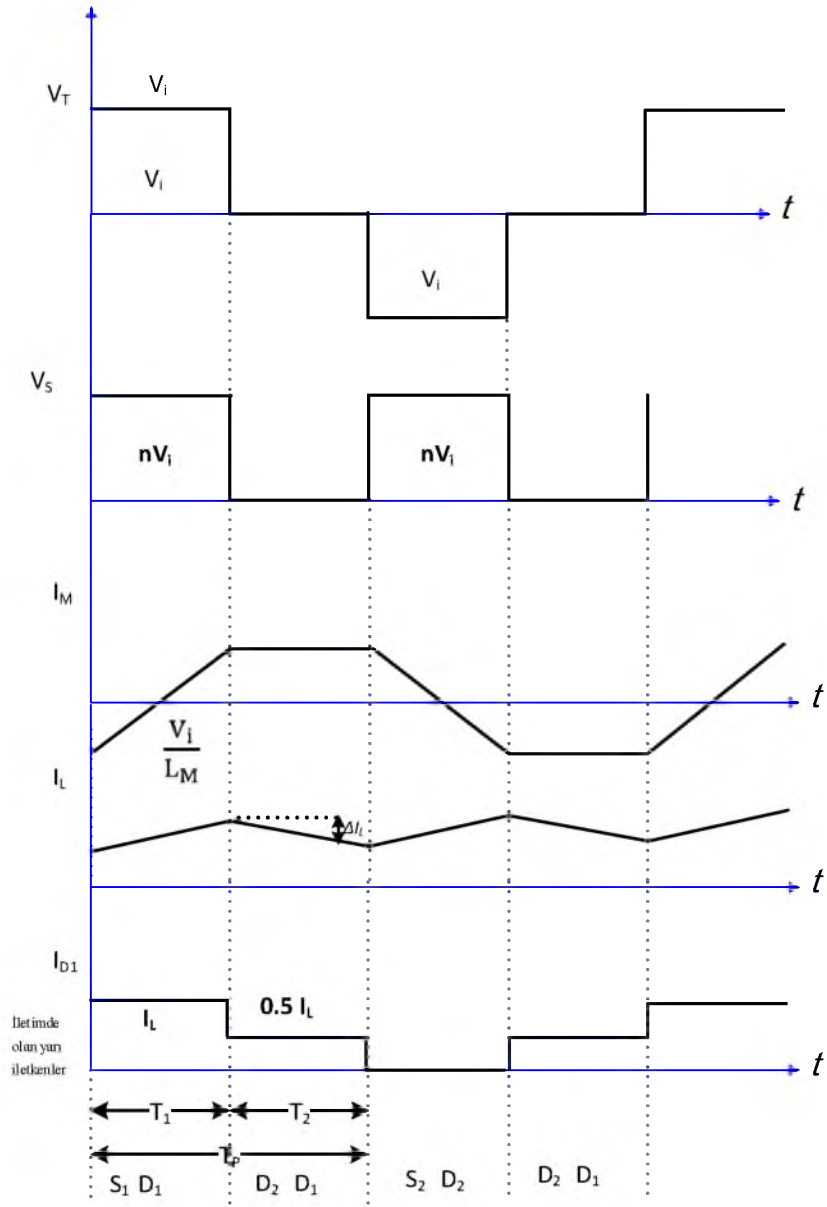


Şekil 4.35 Push-Pull da-da dönüştürücü.

Push-Pull dönüştürücünün çıkış gerilimi eşitlik 4.45’deki gibidir.

$$V_0 = nDV_i \quad (4.45)$$

Burada D görev oranı,  $0 \leq D < 1$  aralığında ayarlanabilir. Dönüştürücünün çalışmasına ait temel dalga Şekilleri Şekil 4.36’da verilmiştir (Erickson, 1999; Sayęı, 2017).



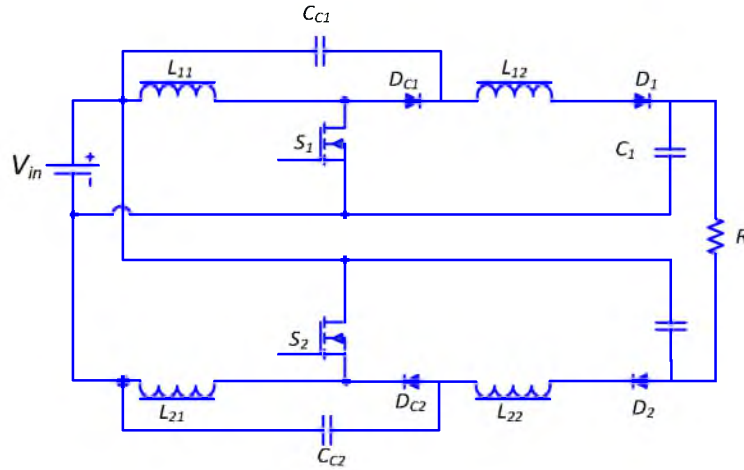
Şekil 4.36 Push-Pull da-da dönüştürücünün temel dalga şekilleri.

## 5. YÜKSEK GERİLİM KAZANÇLI SARMAŞIK TİP DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

Fotovoltaik sistemlerde yüksek gerilim kazançlı da-da dönüştürücülerin kullanımı son yıllarda giderek artmıştır. Bu dönüştürücülerin giriş gerilimleri, yaklaşık olarak bir FV panelin çıkış gerilimi olacak şekilde tasarlanmaktadır. Çıkış gerilimleri ise oldukça yüksektir. Literatürde yaygın olarak 240V-400V aralığında çıkış gerilimine sahip yüksek kazançlı dönüştürücüler bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında da yüksek gerilim kazançlı sarmaşık tip da-da dönüştürücü yapısı analiz edilmiştir. Sarmaşık dönüştürücüler benzerleri ile aynı sayıda anahtarlama elemanı bulundurmamakla beraber daha düşük görev periyodunda çalışabilmektedir. Dolayısı ile anahtarlar üzerinde daha düşük gerilim stresleri oluşur. Aynı zamanda kuplaj bobinlerinin kaçak akıları, sıfır geçişlerinde anahtarlama imkânı sunmaktadır. Ayrıca bu devre yapısında diyotların ters düzelleme zamanları da daha kısadır. Devrede kullanılan pasif devre elemanları kaçak indüktanstan dolayı oluşan kaçak enerjinin devreye geri kazanımını sağlar. Böylece anahtarlama periyodu anahtar uçarındaki gerilim yükselmelerini engelleyerek anahtarlar üzerinde oluşacak olan gerilim streslerinin engellenmesi sağlanır. Böylece düşük iletim direncine ve düşük gerilim seviyesine sahip anahtarlama elemanları kullanılarak anahtarlama kayıpları da azaltılmış olur.

### 5.1. Yüksek Gerilim Kazançlı Sarmaşık Tip Dönüştürücünün Devre Yapısı ve Çalışma Modları

Bu tez çalışmasında benzetimi yapılacak olan yüksek gerilim kazançlı sarmaşık tip dönüştürücünün devre yapısı şekil 5.1’de görülmektedir. Bu devre yapısı, girişindeki gerilimi yüksek bir gerilim kazancı ile yükselterek çıkışa akataran bir karakteristiğe sahiptir.



Şekil 5.1 Yüksek gerilim kazançlı sarmaşık tip yükseltici dönüştürücü devre yapısı.

Bu dönüştürücü yapısı, girişe aralıklı olarak bağlanan ve çıkışa seri olarak bağlanan iki adet yükselten dönüştürücüden oluşmaktadır. Dönüştürücüdeki anahtarların tetikleme sinyalleri 180 derece faz farkına sahiptir. Bu iki yükselten dönüştürücü birbirinden ayrık olarak çalışmaktadır. Bu topolojide  $L_{11}$  ve  $L_{21}$  olarak belirtilen indüktanslar, kuplaj bobinlerinin indüktanslarıdır.  $S_1$  ve  $S_2$  yarıiletken anahtarlama elemanları olup  $D_1$  ve  $D_2$  diyotları ise dönüştürücü çıkışındaki doğrultucu diyotlarıdır. Bunun yanında  $D_{C1}$  ve  $D_{C2}$  diyotları ile  $C_{C1}$  ve  $C_{C2}$  kapasitörlerinden oluşan pasif kenetleme devreleri, kaçak indüktansdan dolayı oluşan enerjiyi geri dönüştürerek ve  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarları üzerindeki gerilim streslerini sınırlar. Dönüştürücünün analizi yapılırken kabul edilen varsayımlar aşağıda özetlenmiştir.

- Tüm anahtarlama elemanları ile diyotlar ideal kabul edilir.
- Tüm kapasitörler yeterince büyük seçildiği için gerilim dalgalanmaları ihmal edilebilir.
- $S_1$  ve  $S_2$  anahtarlama elemanlarının görev periyotları birbirine eşit kabul edilir.
- Kuplaj indüktörü, bir mıknatıslanma indüktansı, bir kaçak indüktans ve  $n = n_{12}/n_{11} = n_{22}/n_{21}$  dönüştürme oranına sahip ideal bir transformatör olarak modellenmiştir.

Şekil 5.1’de devre şeması verilen sarmaşık tip yükseltici dönüştürücü bir anahtarlama periyodu boyunca 8 farklı çalışma moduna sahiptir.  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarları simetrik çalıştığı için aşağıda sadece  $S_1$  anahtarına ait 4 farklı çalışma modu açıklanmıştır. Her bir çalışma moduna ait elektriksel devre modelleri ile kararlı durum analizinden elde edilen akım-gerilim dalga şekilleri aşağıda detaylı olarak verilmiştir. Tüm çalışma modları için,  $t_0$  ‘dan önce  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarlarının iletimde olduğu ve mıknatıslanma indüktansları  $L_{M1}$  ve  $L_{M2}$ ’ nin giriş üzerinden şarj edildiği varsayılır.

#### MOD 1 [ $t_0-t_1$ aralığı]

$t_0$  anında  $S_1$  anahtarı kesime sokularak  $D_{C1}$  kenetleme diyotu iletime girer. Bu esnada mıknatıslama indüktansının akımı  $i_{LM}$  'nin bir kısmı, kuplaj indüktörlerinin ikincil tarafı ve  $D_1$  diyotu üzerinden çıkışa aktarılır. Ayrıca  $L_{K1}$  içinde depolanan kaçak enerji, kenetleme kondansatörü  $C_{C1}$  tarafından emilir. Bu nedenle kaçak indüktans akımı  $i_{L1K1}$  doğrusal olarak azalır.  $t_1$  anında,  $i_{L1K1}$  sifıra ulaşır ve bu mod sona erer. Bu çalışma

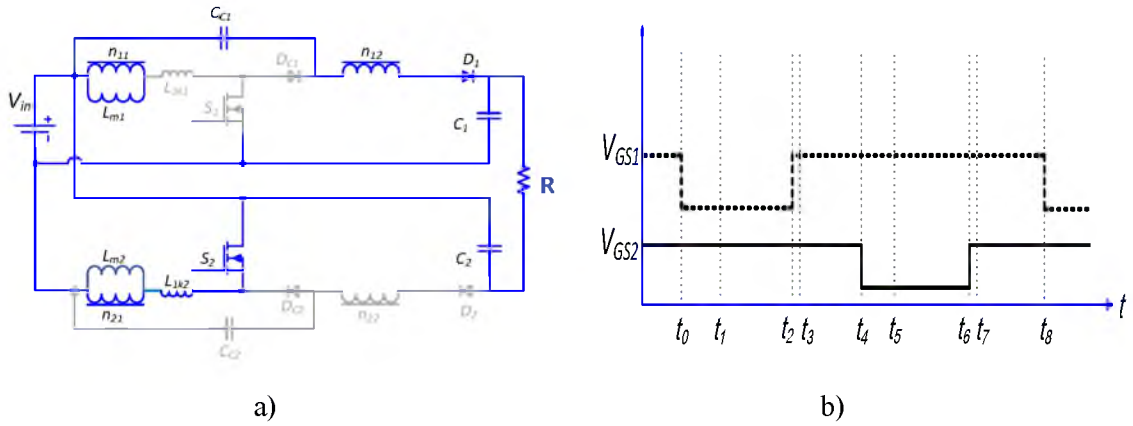
modundaki kaçak indüktans akımı  $i_{L_{1k1}}$  eşitlik 5.1’de ve mıknatıslanma indüktansının akımı  $i_{L_{m2}}$  eşitlik 5.2’de gösterilmiştir.

Kaçak indüktans akımı  $i_{L_{1k1}}$

$$i_{L_{1k1}}(t) = i_{L_{m1}}(t_0) - \frac{V_{CC1} - \frac{1}{1+n} \cdot (V_{C1} - V_{in})}{L_{1k1}} \cdot (t - t_0) \quad (5.1)$$

Mıknatıslanma indüktansının akımı  $i_{L_{m2}}$

$$i_{L_{m2}}(t) = i_{L_{1k2}}(t_0) = I_{L_{m2}}(t_0) + \frac{V_{in}}{L_{m2} + L_{1k1}} \cdot (t - t_0) \quad (5.2)$$

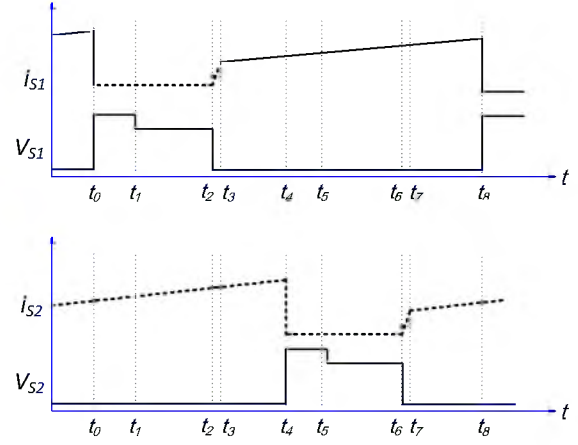
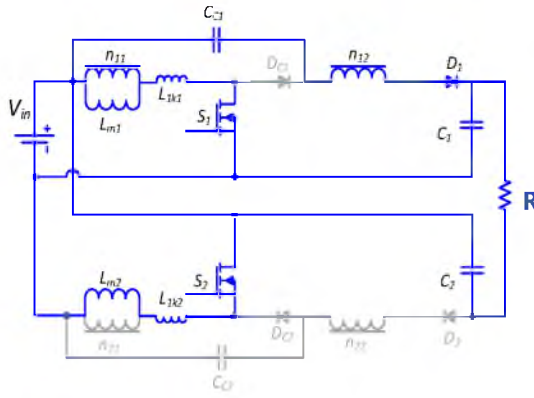


Şekil 5.2 MOD 1, a) Eşdeğer devre b) S1 ve S2 kapı gerilimi

### MOD 2 [t1-t2 aralığı]

t<sub>1</sub> anında kaçak indüktans akımı sıfırlanır ve DC<sub>1</sub> kenetleme diyotu, herhangi bir ters düzelleme sorunu olmadan kapatılır. Bu çalışma modunda C<sub>1</sub> çıkış kondansatörü, kuplaj indüktörlerin ikincil tarafı üzerinden i<sub>LM</sub> akımı ile şarj edilir. Bu esnada i<sub>LM</sub> akımı eşitlik 5.3’ te görüldüğü gibi ifade edilir. Bu akım doğrusal olarak azalmaktadır.

$$i_{L_{m1}}(t) = I_{L_{m1}}(t_0) + \frac{V_{C1} - V_{CC} - V_{in}}{L_{m1}} (t - t_1) \quad (5.3)$$



a)

b)

Şekil 5.3 MOD 2, a) Eşdeğer devre b) S1 ve S2 akımı ve gerilimi

### MOD 3 [t2-t3 aralığı]

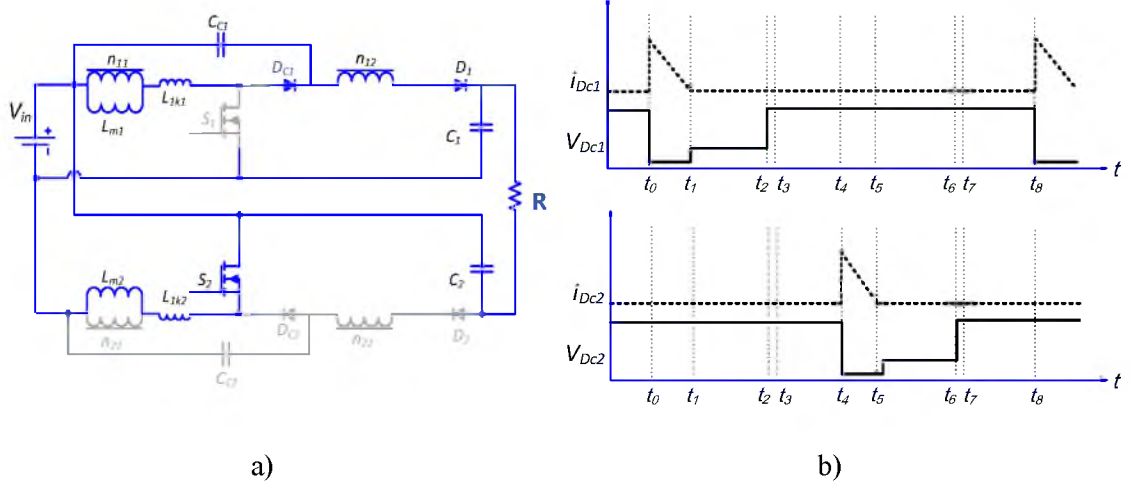
t2 anında, kaçak indüktans  $L_{1k1}$  sayesinde, S1 anahtarı sıfır geçiş anahtarlama koşulları altında iletme sokulur. Bu çalışma modunda kaçak indüktans akımı  $i_{L1k1}$  doğrusal olarak artmaktadır. Mıknatıslama indüktansının ve kaçak indüktans akımları t3 anında birbirine eşit olur ve D1 diyotu, geri kazanım problemi olmadan kesime girer. Kaçak indüktansın ve D1 diyotunun akımları eşitlik 5.4 ve eşitlik 5.5' te verilmiştir.

Kaçak indüktans akımı  $i_{L1k1}$

$$i_{L1k1}(t) = \frac{V_{in} + \frac{V_{C1} - V_{C1} - V_{in}}{n}}{L_{1k1}} (t - t_2) \quad (5.4)$$

D1 diyotunun akımı,

$$i_{D1}(t) = \frac{1}{n} \left[ i_{L_{m1}}(t_2) - \frac{V_{in} + \frac{V_{C1} - V_{C1} - V_{in}}{n}}{L_{1k1}} (t - t_2) \right] \quad (5.5)$$



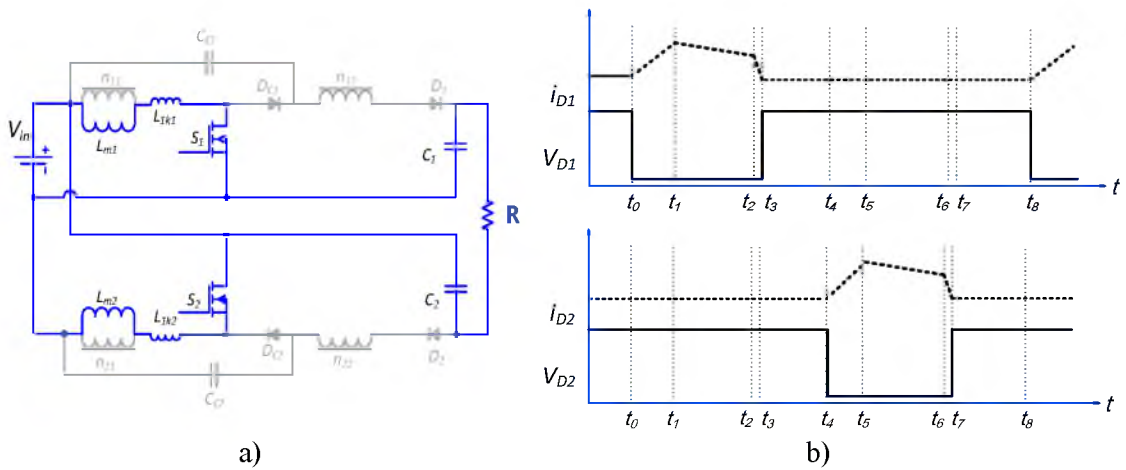
Şekil 5.4 MOD 3, a) Eşdeğer devre b)  $D_{C1}$  ve  $D_{C2}$  diyotlarının akım ve gerilimi

#### MOD 4 [t<sub>3</sub>-t<sub>4</sub> aralığı]

t<sub>3</sub> anında S<sub>1</sub> ve S<sub>2</sub> anahtarları iletimde ve diğer tüm doğrultucu diyotlar kesimdedir. Bu durumda kaçak ve mıknatıslama indüktansları giriş gerilim kaynağı  $V_{in}$ ' e bağlanarak şarj olur. Ayrıca  $V_{in}$  ile birlikte C<sub>1</sub> ve C<sub>2</sub> kapasitörleri çıkıştaki yüke enerji sağlar. Bu çalışma modunda mıknatıslanma ve kaçak indüktans akımları eşitlik 5.6 ve eşitlik 5.7' de görüldüğü gibi elde edilir.

$$i_{L_{m1}}(t) = i_{L_{1k1}}(t) = I_{L_{m1}}(t_3) - \frac{V_{in}}{L_{m1} + L_{1k1}} \cdot (t - t_3) \quad (5.6)$$

$$i_{L_{m2}}(t) = i_{L_{1k2}}(t) = I_{L_{m2}}(t_3) - \frac{V_{in}}{L_{m2} + L_{1k2}} \cdot (t - t_3) \quad (5.7)$$



Şekil 5.5 MOD 4, a) Eşdeğer devre b)  $D_1$  ve  $D_2$  diyotlarının akım ve gerilimi

## 5.2. Dönüştürme Oranı

Anahtarlama modlu da-da dönüştürücülerde bir indüktörün kararlı durumda çalışabilmesi bir anahtarlama periyodu içerisindeki net indüktör gerilimi sıfır olmalıdır. Buna gerilim zaman dengesi anlamına gelen “voltage-second balance” denir. Şekil 5.1’de devre şeması verilen yüksek gerilim kazançlı sarmaşık tip yükseltici dönüştürücü devresinde  $L_{m1}$  ve  $L_{m2}$  indüktörleri için gerilim zaman dengesi eşitlik 5.8’deki gibi ifade edilir (Kianpour ve ark., 2016).

$$V_{in}DT = (V_{C1} - V_{C_{c1}} - V_{in})(1-D) T \quad (5.8)$$

Devre simetrik bir yapıya sahip olduğundan ve  $C_1$  ve  $C_2$  kapasitörleri benzer kabul edildiğinden kapasitör gerilimleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V_{C1} = V_{C2} = V_C = \frac{V_o - V_{in}}{2} \quad (5.9)$$

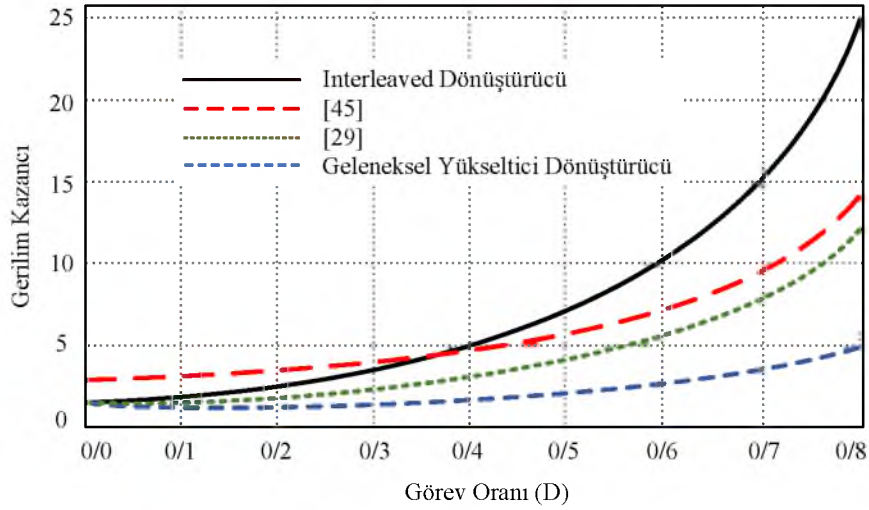
Mod 3’e göre clamp kapasitörleri olarak bilinen  $C_{C1}$  ve  $C_{C2}$  kapasitörleri, kaçak indüktansın neden olduğu enerjiyi geri kazanmaktadır. Kirchhoff’un gerilimler kanunu uygulanarak  $C_{C1}$  ve  $C_{C2}$  kapasitör gerilimleri eşitlik 5.10’deki gibi elde edilir.

$$V_{C_{C1}} = V_{C_{C2}} = V_{C_c} = \frac{V_{C1} - V_{in}}{1+n} = \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (5.10)$$

Eşitlik 5.9 ve eşitlik 5.10, eşitlik 5.8’de yerine konularak yüksek gerilim kazançlı sarmaşık tip dönüştürücünün gerilim kazancı eşitlik 5.11’deki gibi elde edilir. Burada  $n$  sarım oranıdır.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1+(1+2n)D}{1-D} \quad (5.11)$$

Elde edilen bu gerilim kazancı ile diğer çok katlı yükselten tip da-da dönüştürücülerin gerilim kazançları şekil 5.6’da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Karşılaştırmaların eşit şartlarda olması için sargıların dönüştürme oranı 2 olarak seçilmiştir. Eşitlik 5.11 ve şekil 5.6’dan görüleceği gibi  $D$  görev oranı, dönüştürücü gerilim kazancını ve dönüştürücü çıkış gerilimini etkileyen en önemli parametredir.



Şekil 5.6 Farklı tip da-da dönüştürücülerin gerilim kazançlarının karşılaştırılması.

Bu tez çalışmasında analiz edilen sarmaşık tip dönüştürücü yapısı, (Chao and Yang, 2014; Zhang and Shen, 2015) kaynaklarda verilen geleneksel çok katlı da-da dönüştürücü yapılarından daha yüksek gerilim kazancına sahiptir. Kaynak (Li and He, 2011)' de verilen çok katlı da-da dönüştürücü yapısı ise 0.4 görev periyodunun altında daha yüksek gerilim kazancına sahiptir. Görev periyodunun 0.4' ün üstünde olduğu yüksek kazançlı uygulamalarda ise analiz edilen dönüştürücü yapısı kaynak (Sathyan ve ark., 2015)' dan daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu nedenle yüksek kazançlı uygulamalarda kullanılmak için uygundur.

### 5.3. Yarıiletken Elemanlar Üzerindeki Gerilim Stresi

Devredeki  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarları üzerindeki gerilim stresi eşitlik 5.12 ile,

$$V_{S1} = V_{S2} = \frac{V_o}{1+(1+2n)D} \quad (5.12)$$

$D_{C1}$  ve  $D_{C2}$  clamp diyotları üzerindeki gerilim stresi eşitlik 5.13 ile,

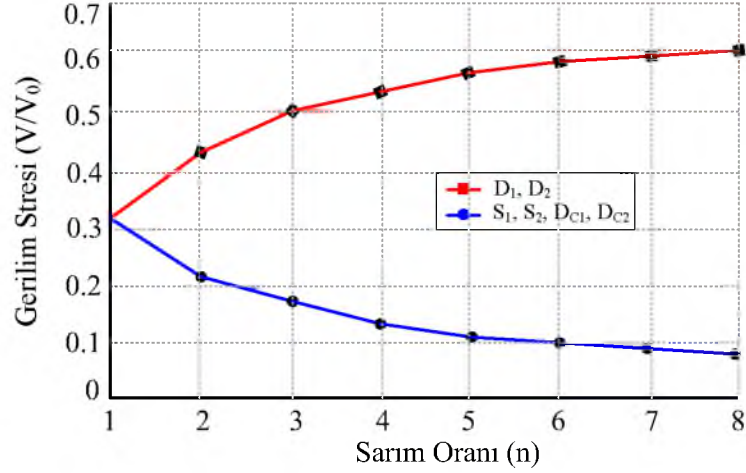
$$V_{Dc1} = V_{Dc2} = \frac{V_{in}}{1-D} = \frac{V_o}{1+(1+2n)D} \quad (5.13)$$

İfade edilir.  $D_1$  ve  $D_2$  çıkış diyotları üzerindeki gerilim stresi ise eşitlik 5.14 ile tanımlanır.

$$V_{D1} = V_{D2} = \frac{nD}{1-D} V_{in} = \frac{nV_o}{1+(1+2n)D} \quad (5.14)$$

Kuplaj indüktörlerinin sarım oranına bağlı olarak yarıiletken elemanlar üzerinde oluşan gerilim streslerinin normalize edilmiş grafiği şekil 5.7'de gösterilmiştir. Kuplaj

indüktörlerinin sarım oranı arttıkça,  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarları ile  $D_{C1}$  ve  $D_{C2}$  clamp diyotları üzerindeki gerilim stresinin azaldığı diğer yandan  $D_1$  ve  $D_2$  çıkış diyotları üzerindeki gerilim stresinin arttığı görülmektedir. Bu bakımdan kuplaj indüktörlerinin sarım oranı yarıiletken elemanlar üzerindeki gerilim stresini en aza indirecek şekilde belirlenmelidir.



Şekil 5.7 Yarıiletken elemanlar üzerindeki gerilim stres diyagramı.

#### 5.4. Pasif Elemanların Tasarımı

Sürekli durum modunda mıknatıslanma indüktörleri üzerinde arzu edilen  $\Delta I_{Lm}$  akım dalgalanmasını elde edebilmek için  $L_{M1}$  ve  $L_{M2}$  indüktansları eşitlik 5.15'deki gibi hesaplanır.

$$L_{M1} = L_{M2} = \frac{DV_{in}}{f_s \Delta I_{Lm}} \quad (5.15)$$

Kuplaj indüktörlerinin kaçak indüktansı,  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarlarının sıfır akımda anahtarlama (zero current switching-ZCS) altında açılmasına neden olur. Bu nedenle ZCS koşulunu gerçekleştirmek için  $L_{lk1}$  ve  $L_{lk2}$  kaçak indüktansları eşitlik 5.16'daki gibi hesaplanır.

$$L_{lk1} = L_{lk2} \geq \frac{DV_{Llk} \cdot t_r}{2\Delta I_s} \quad (5.16)$$

Burada  $t_r$  anahtarlama elemanı üzerindeki akımın yükselme zamanını,  $\Delta I_s$  ise iletme geçme süresi boyunca akımdaki değişimin genliğini ifade eder. Dönüştürücü çıkış gerilimindeki dalgalanmanın minimum olması arzu edilir. Bu bakımdan  $\Delta V_c$  gerilim dalgalanması çıkıştaki kapasitörlerin değerinin belirlenmesinde en önemli faktördür. Dolayısı ile çıkış kapasitörleri olan  $C_1$  ve  $C_2$  nin uygun değeri eşitlik 5.17 ile elde edilir.

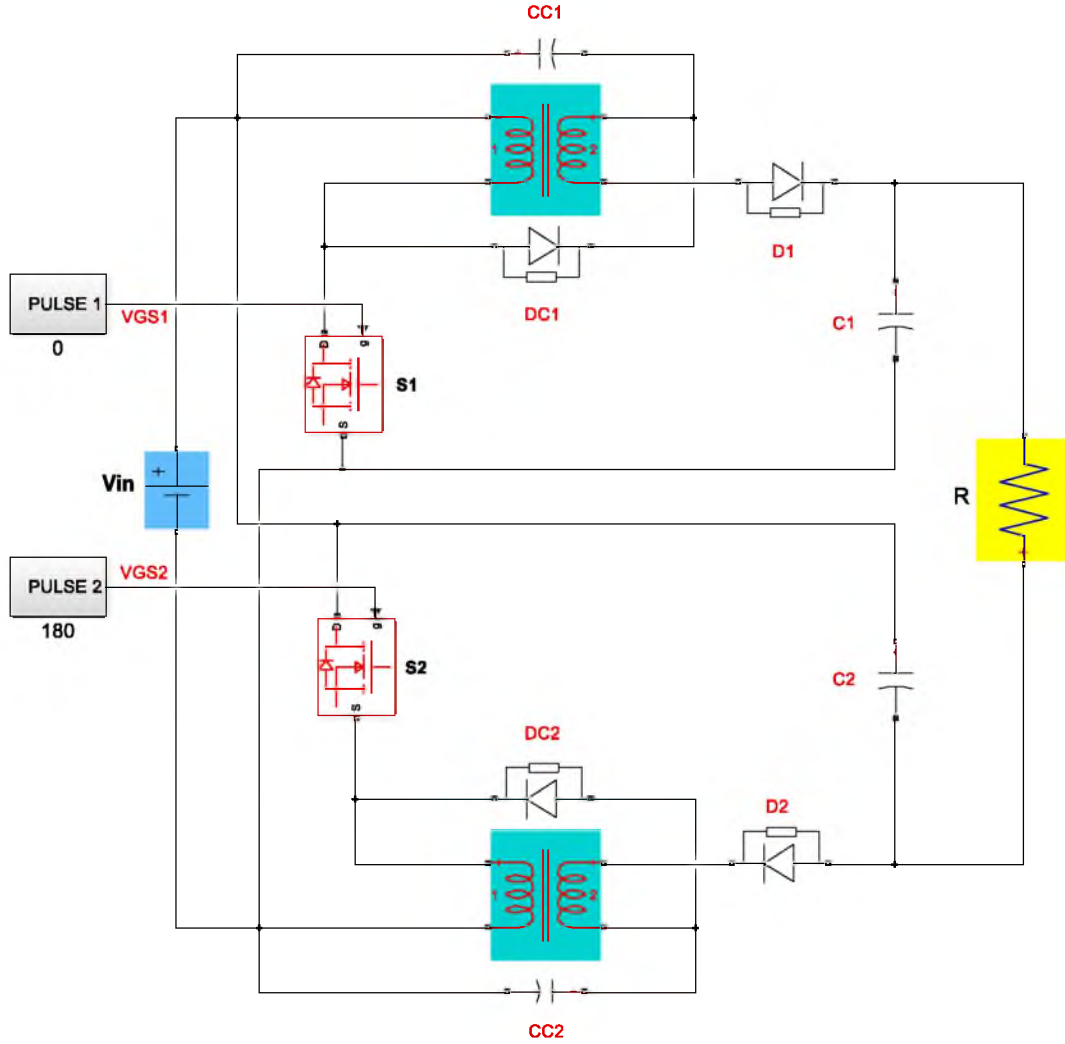
$$C_1 = C_2 \geq \frac{V_o (1-D)}{f_s R_L \Delta V_c} \quad (5.17)$$

$C_{C1}$  ve  $C_{C2}$  clamp kapasitörlerinin değeri;  $C_C$  ve  $L_{lk}$  arasında oluşturulan rezonans periyodunun yarı süresi,  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarlarının kesime girme süresinden büyük olacak şekilde eşlik 5.18'deki gibi belirlenir.

$$C_{c1} = C_{c2} \geq \frac{(1-D)^2}{\pi^2 f_s^2 |L_{lk}|} \quad (5.18)$$

## 6. BENZETİM ÇALIŞMASI VE SONUÇLAR

Beşinci bölümde elektriksel ve matematiksel modeli oluşturulan yüksek gerilim kazançlı sarmaşık tip yükseltici dönüştürücünün MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan benzetim modeli şekil 6.1’de verilmiştir.



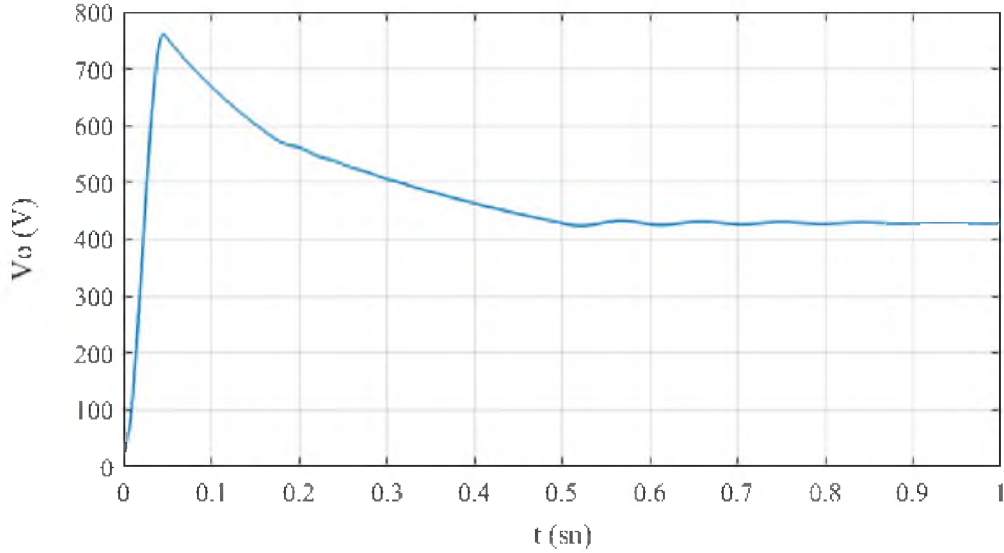
Şekil 6.1 Sarmaşık tip yükseltici dönüştürücünün MATLAB/Simulink modeli.

Devredeki  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarlarının tetikleme sinyalleri arasında  $180^\circ$  faz farkı vardır. Anahtarlama frekansı 20 kHz olarak belirlenmiştir. Benzetim çalışmalarında örnekleme zamanı  $1\mu s$  olarak alınmıştır. Örnekleme zamanının düşük seçilmesi ölçüm sonuçlarının doğruluğunu artırmaktadır. Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda anahtarlama elemanları üzerine düşen gerilim ve akan akımlar ile dönüştürücü çıkış gerilimleri aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.

Kuplaj indüktörleri, dönüştürme oranı 1.7 olan bir transformatör olarak modellenmiştir. Dönüştürücünün giriş gerilimi 25V ve sarım oranı  $n=1.7$  dir. Anahtarlama frekansı 20 kHz ve görev periyodu  $D=0.75$  olarak belirlenmiştir. Eşitlik 5.11 yardımı ile dönüştürücünün gerilim kazancı 17.2 bulunmuştur. Sürekli rejimde yüksüz durum için çıkış gerilimi yine eşitlik 5.11 yardımı ile;

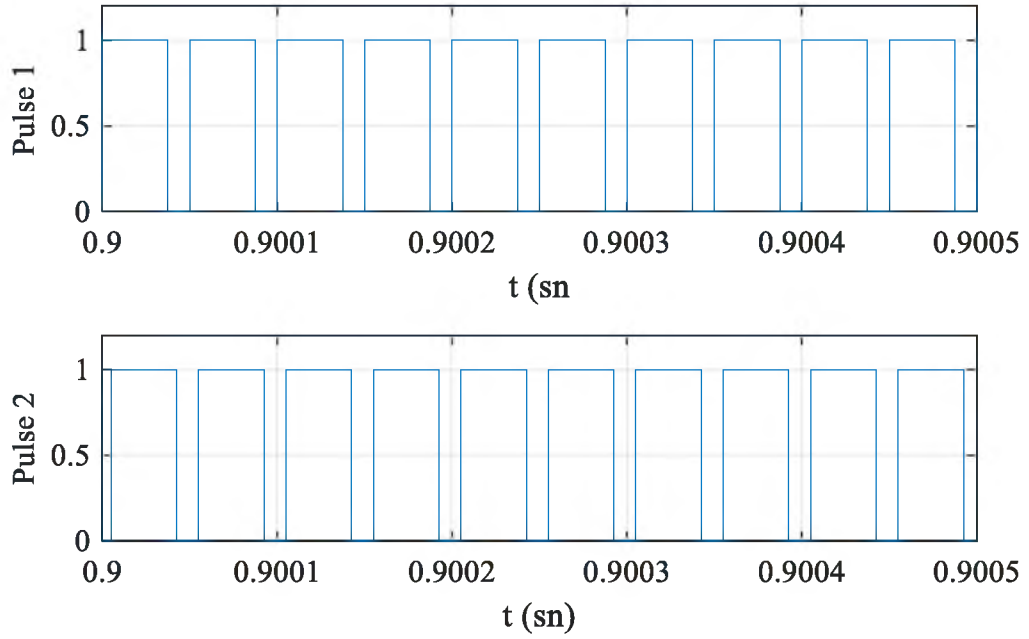
$$V_0 = V_{in} \frac{1+(1+2n)D}{1-D} = 25 * \frac{1+(1+2*1.7)*(0.75)}{1-0.75} = 25 * (17.2) = 430 V \quad (5.19)$$

olarak elde edilmiştir. Çıkış gerilimin grafiği şekil 6.2’de verilmiştir.  $t=0$  anında indüktörlerin ve kapasitörlerin devreye girmesiyle birlikte başlangıçta çıkış geriliminde kısa süreli gerilim yükselmesi oluşmaktadır. Ancak çıkış geriliminin 0.5 inci saniyede sürekli duruma ulaştığı görülmektedir. Grafikten görüleceği gibi 25V giriş gerilimi altında yüksek gerilim kazancına sahip dönüştürücü çıkışından 430V gerilim elde edilmiştir. Gerilim kazancının çok yüksek olması ve çıkış gerilimin sürekli duruma çok hızlı bir şekilde ulaşması sarmaşık tip dönüştürücü yapısının avantajlarından biridir.



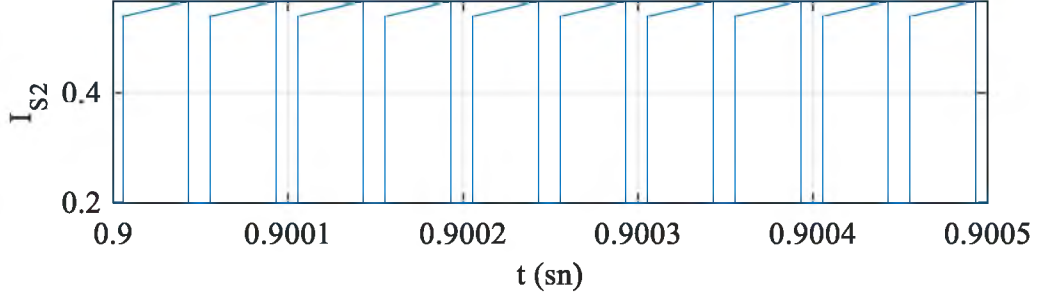
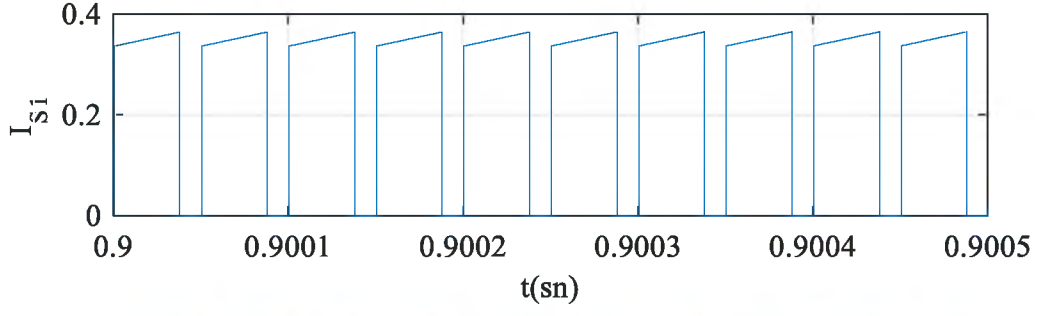
Şekil 6.2 Boş çalışmadaki dönüştürücü çıkış gerilimi

Şekil 6.3’ de  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarlarının birbirinden  $180^\circ$  kaydırılmış tetikleme sinyalleri yer almaktadır. Anahtarlama elemanı olarak, düşük iletim direnci ve yüksek anahtarlama frekansından dolayı MOSFET tercih edilmiştir.

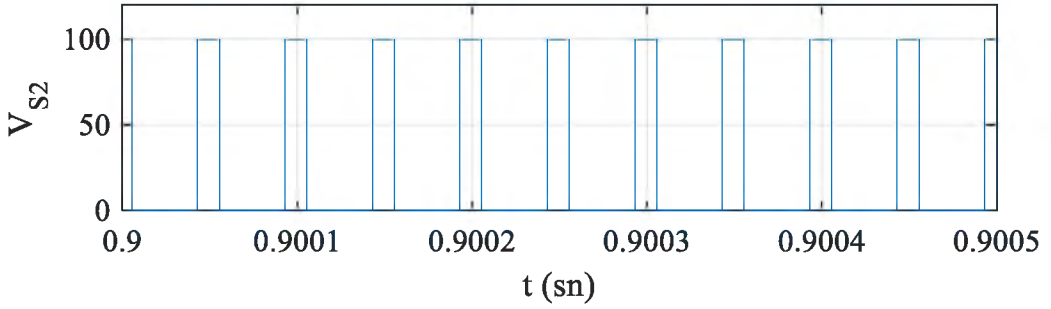
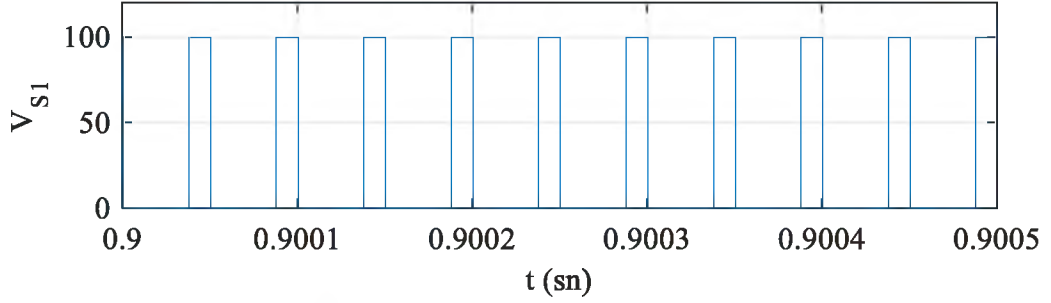


Şekil 6.3  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarlarının tetikleme sinyalleri

Şekil 6.4 ve şekil 6.5’de sırası ile  $S_1$  ve  $S_2$  anahtar akımları ile bu anahtarlar üzerinde düşen gerilimlerin dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 6.4’de verilen  $I_{S1}$  ve  $I_{S2}$  akımları düşük değerli akımlar olup sadece yüksüz çalışan dönüştürücüdeki indüktör ve kapasitör akımlarının toplamı kadardır. Anahtarlar üzerinde düşen  $V_{S1}$  ve  $V_{S2}$  gerilimleri ise yaklaşık 100V’tur. 400V çıkış gerilimi altında  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarları üzerinde düşen gerilimin 100V olması anahtarlar üzerindeki gerilim stresinin düşük olduğunu göstermektedir. Dönüştürücü devre simetrik yapıya sahip olduğundan  $V_{S1}$  ve  $V_{S2}$  gerilimleri ile  $I_{S1}$  ve  $I_{S2}$  akımları yaklaşık olarak aynıdır. Bu durum grafiklerde görülmektedir.

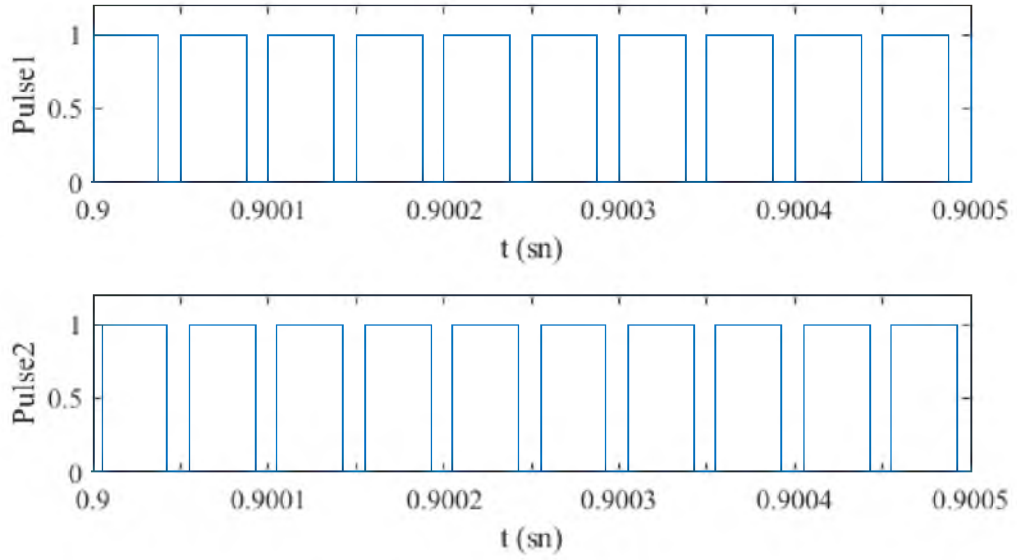


Şekil 6.4  $S_1$  ve  $S_2$  anahtar akımları



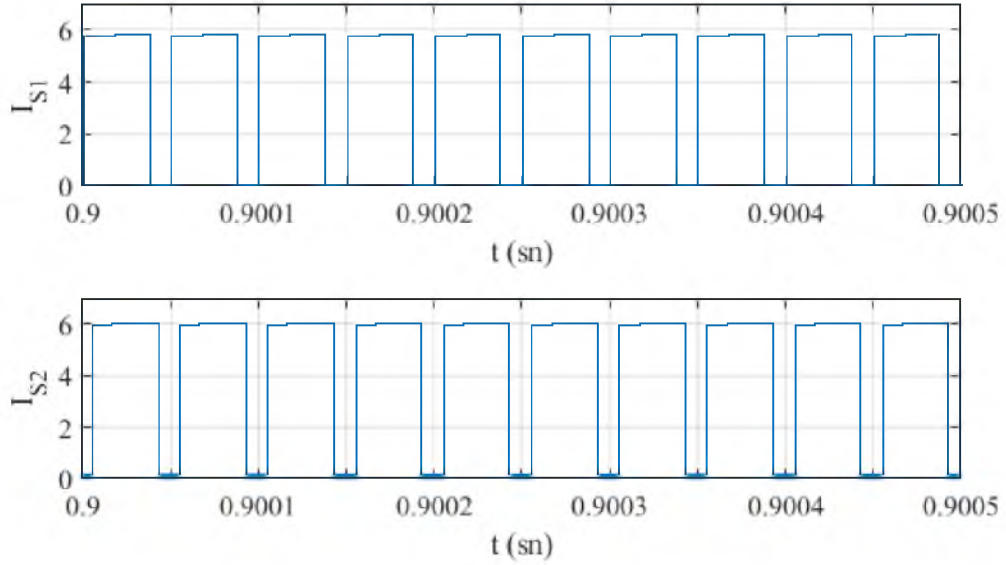
Şekil 6.5  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarları üzerine düşen gerilim

Yüklü çalışma durumuna ilişkin akım, gerilim, güç ve tetikleme sinyallerine ait grafikler aşağıda detaylı olarak verilmiştir. Yüklü durumda da anahtarlama frekansı 20 kHz ve görev periyodu  $D=0.75$  olarak belirlenmiştir. Dönüştürücü çıkışına  $R=800 \Omega$ 'luk bir direnç yükü bağlanmıştır. Şekil 6.6' da  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarlarının birbirinden  $180^\circ$  derece kaydırılmış tetikleme sinyalleri görülmektedir.

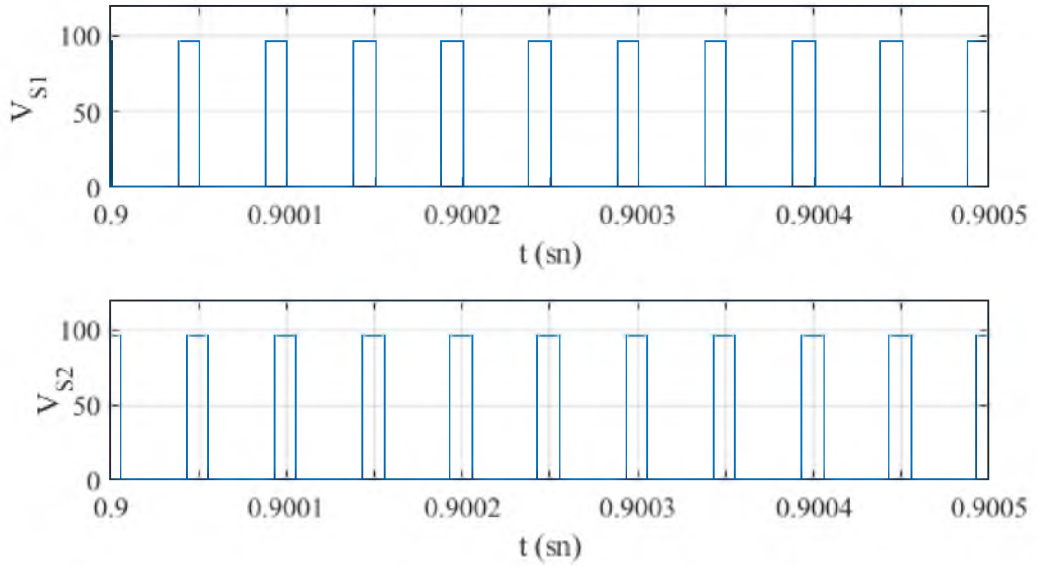


Şekil 6.6  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarlarının tetikleme sinyalleri

Şekil 6.7 ve şekil 6.8’de sırası ile  $S_1$  ve  $S_2$  anahtar akımları ile bu anahtarlar üzerinde düşen gerilimlerin dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 6.7’de verilen  $I_{S1}$  ve  $I_{S2}$  akımları yükün etkisi ile yüksek değerler almıştır. Anahtarlar üzerindeki  $V_{S1}$  ve  $V_{S2}$  gerilimleri yüksüz çalışmada olduğu gibi yine yaklaşık olarak 100V’dir. Dönüştürücü devre simetrik yapıya sahip olduğundan  $V_{S1}$  ve  $V_{S2}$  gerilimleri ile  $I_{S1}$  ve  $I_{S2}$  akımları yaklaşık olarak aynıdır.

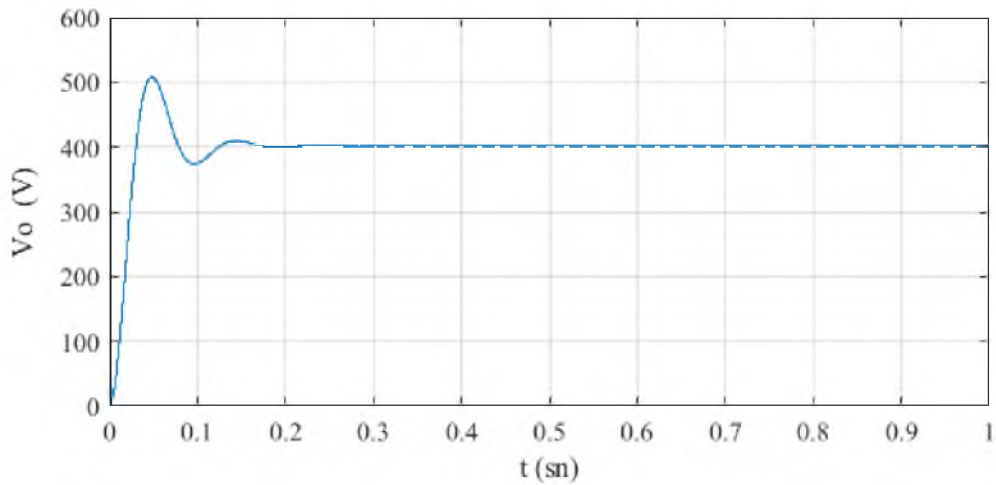


Şekil 6.7  $S_1$  ve  $S_2$  anahtar akımları

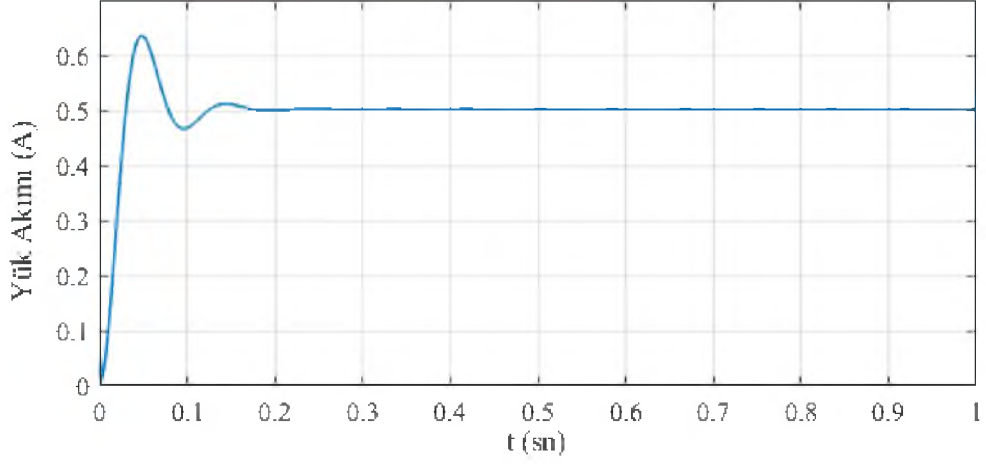


Şekil 6.8  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarları üzerine düşen gerilim

Anahtarlama frekansı 20 kHz ve görev periyodu  $D=0.75$  iken sürekli rejimde yüklü durum için dönüştürücü çıkış gerilimi 400V ve çıkış akımı yaklaşık olarak 0.5A olarak elde edilmiştir. Dönüştürücü çıkış gerilimi ve çıkış akımı grafikleri şekil 6.9 ve şekil 6.10'da verilmiştir.  $t=0$  anında indüktörlerin ve kapasitörlerin devreye girmesiyle birlikte başlangıçta çıkış gerilimi ve çıkış akımında kısa süreli yükselmeler oluşmaktadır. Ancak 0.25 inci saniyede gerilim ve akım sürekli duruma ulaşmıştır. Bu yükselme yüksüz çalışmadaki yükselme miktarından daha düşüktür. Bunun nedeni dönüştürücü çıkışına yükün bağlı olmasıdır. Dönüştürücü çıkışına bağlanan yük saf direnç yükü olduğundan akımın genel formu gerilime benzemektedir.

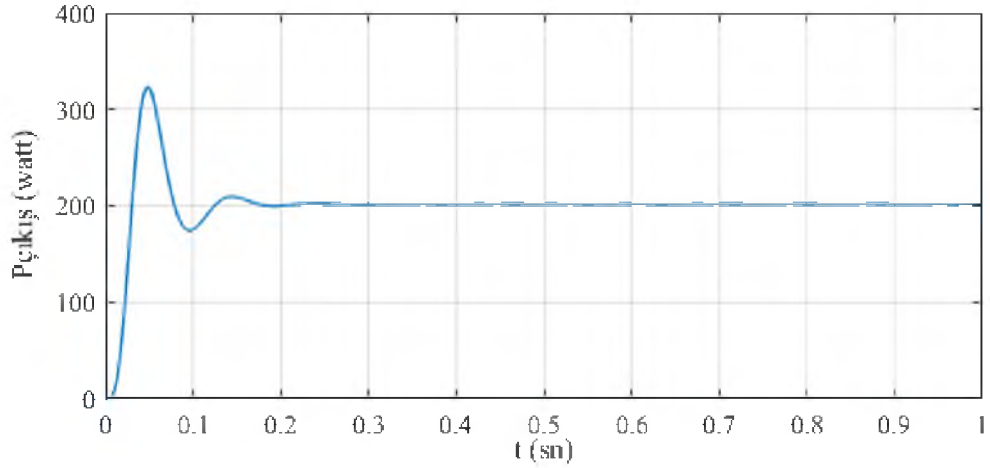


Şekil 6.9 Yüklü çalışmada dönüştürücü çıkış gerilimi.



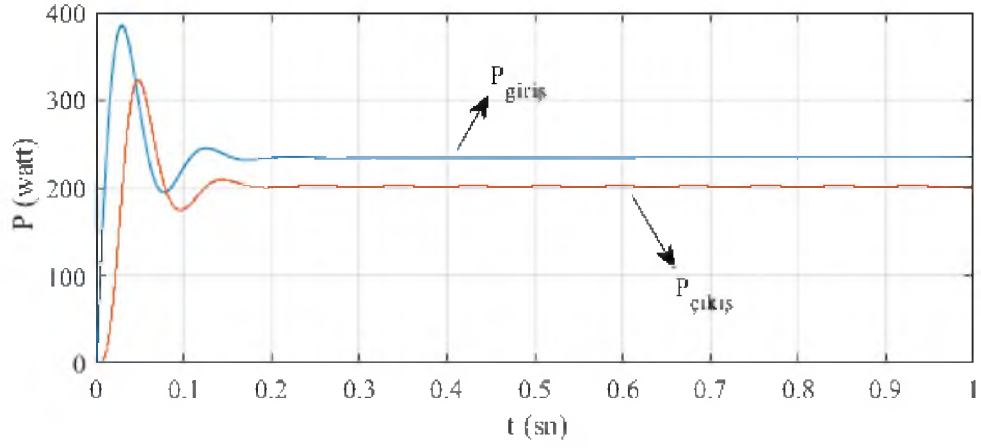
Şekil 6.10 Yüklü çalışmada dönüştürücü çıkış akımı

Dönüştürücü çıkışına bağlanan  $R=800 \Omega$ 'luk yükün, dönüştürücüden çektiği güç ait grafik şekil 6.11'de verilmiştir. Bu güç, dönüştürücünün verebileceği maksimum güçtür. Şekil 6.9 ve şekil 6.11 ile elde edilen gerilim ve güç değerleri, dönüştürücü tasarım aşamasında yapılan matematiksel hesaplama ve modellemelerin doğruluğunu ayrıca göstermektedir.



Şekil 6.11 Dönüştürücü tarafından yüke aktarılan güç.

Yüksek frekanslı anahtarlama devrelerinde anahtarlama kayıplarının yüksekliği ve değişken yükler verimi olumsuz yönde etkiler. Bu tez çalışmasında tasarımı gerçekleştirilen sarmaşık tip yükseltici dönüştürücü sabit değerli bir R yükünü beslemektedir. Bu yükün dönüştürücüden çektiği güç ile dönüştürücünün kaynaktan çektiği güçler şekil 6.12'de gösterilmiştir.



Şekil 6.12 Dönüştürücü giriş ve çıkış güçleri.

Dönüştürücü giriş gücü 234W, çıkış gücü ise 202W olarak ölçülmüştür. Bu giriş ve çıkış güçleri yardımı ile dönüştürücü verimi,

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} = \frac{202}{235} = 0.8632$$

$$\eta = \% 86.32$$

olarak hesaplanmıştır.

## 7. SONUÇ

Yüksek gerilim kazançlı da-da dönüştürücülerin kullanımı günümüzde giderek yaygınlaşmaktadır. Bu dönüştürücüler, fotovoltaik sistemler, kesintisiz güç kaynakları başta olmak üzere birçok farklı alanında kullanılmaktadır. Özellikle şebeke bağlantılı FV sistemlerde, şebeke entegrasyonlu evirici uygulamaları için çok uygundur. Mikro evirici uygulamaları son zamanlarda giderek yaygınlaşmaktadır. da-da dönüştürücüler mikroeviricilere sabit giriş gerilimi sağlanmasında önemli rol oynarlar. da-da dönüştürücü topolojileri, güç ihtiyacına ve giriş-çıkış arasındaki izolasyon durumuna göre değişiklik göstermektedir. Geleneksel izolasyonsuz düşürücü ve yükseltici tip da-da dönüştürücülerde yüksek iletim kayıplarından dolayı yüksek kazanç elde etmek çok zordur.

Bu tez çalışmasında ilk olarak literatür taraması yapılmış ve literatürde var olan izolasyonlu ve izolasyonsuz da-da dönüştürücü yapıları detaylı olarak incelenmiştir. Bunun neticesinde 25V/400V giriş-çıkış gerilimine sahip 200W gücünde, yüksek gerilim kazançlı, sarmaşık tip bir yükseltici da-da dönüştürücünün matematiksel analizi yapılarak tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen bu dönüştürücünün MATLAB/Simulink ortamında benzetim modeli oluşturulmuştur. Benzetim modeli üzerinden dönüştürücünün giriş-çıkış akım ve gerilimleri ile güç ve verimi analiz edilmiştir.

Elde edilen sonuçlardan dönüştürücünün; 25V giriş gerilimine karşın 400V çıkış gerilimi ve 200W çıkış gücü üretebildiği, anahtarlama elemanları üzerindeki gerilim stresinin düşük olduğu, 17.2 gibi yüksek bir gerilim kazancına sahip olduğu ve % 86.14 gibi yüksek bir verimle çalıştığı görülmektedir. Ayrıca anahtarlama yöntemi  $180^0$  derece faz kaydırmalı olduğu için oldukça basittir. Bu dönüştürücü yapısının diğer bir özelliği ise anahtarlama elemanları üzerinden geçen akımların sıfır olduğu yerlerde anahtarlama yapabilmesidir. Buda anahtarlama kayıplarını oldukça azaltmaktadır. Sonuç olarak yüksek gerilim kazancına sahip bu da-da dönüştürücünün FV sistemlerde ve mikroeviricilerde kullanılabileceği gösterilmiştir. İndüktör ve kapasitörlerin optimize edilmesi ile verimin artırılacağı öngörülmektedir. Bu çalışmanın devamında bu dönüştürücünün gerçek uygulamasının yapılması planlanmaktadır.

## Kaynaklar

- Acha, E., Agelidis, V., Anaya, O. and Miller, T. J. E., 2001, Power electronic control in electrical systems. Elsevier.
- Adragna C., Huber L., Irving B. T., Jovanović M. M., 2009, Analysis and Performance Evaluation of Interleaved DCM/CCM Boundary Boost PFC Converters around ZeroCrossing of Line Voltage, 24th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC), Washington, DC, USA, 15-19 February.
- Altuntaşoğlu, Z. T., 2012, Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi, Mevcut Durum, Sorunlar, Mühendis ve Makine Dergisi, cilt 52, sayı 617, s. 56-63.
- Amundarain, M., Alberdi, M., Garrido, A. J., Garrido ,I. and Maseda, J., 2010, Wave energy plants: Control strategies for avoiding the stalling behaviour in the Wells türbine, Renewable Energy, Vol, 35, Issue, 12, Pp,2639-2648.
- Anderson, j. Peng, F.Z., 2008, Four Quasi-Z-Source Inverters, IEEE Power Electronics Specialists Conference, Greece, 2008, 2743-2749.
- Ardavan K. and Ghazanfar S., 2017., A floating-output interleaved boost DC–DC converter with high step-up gain, *Automatika*, 58:1, 18-26.
- Arifoğlu, U., 2016 Güç Elektroniği Ders Notları
- Arslan, E., 2006, Jeotermal Enerjiden Yararlanılarak Kuyu İçi Eşanjörü Yardımıyla Konut Isıtılması ve Sıcak Su İhtiyacının Karşılanması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Aslan, M. ve Güldemir, H., 2005, Yükseltici Tip Da-Da Dönüştürücünün Kayma Mod Kontrolü, SAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9.Cilt, 2.Sayı.
- Atacak, İ. ve Bay, Ö. F., 2009, Tuning Gain Parameters Of A PI Controller Using Genetic Algorithm For Boost Dc-Dc Converter 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09), Karabük, Türkiye.
- Aydın, İ., 2013, Balıkesir’de Rüzgâr Enerjisi, *Eastern Geographical Review*, cilt 18, sayı 29, s. 29-50.
- Bedeloğlu, A., Demir, A., ve Bozkurt, Y., 2010, Fotovoltaik Teknolojisi: Türkiye ve Dünyadaki Durumu, Genel Uygulama Alanları ve Fotovoltaik Tekstiller. *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*,. 43-58.
- Bodur, H. ve Bakan, A.F., 2002, A New ZVT-PWM DA-DA Converter, *IEEE Trans. On Power Electronics*,, 17:40-47.
- Boztepe M., 2006, Enerji Depolama , EES 487 Yeni Enerji Kaynakları, <http://www.solar-academy.com/menus/Enerji-Depolama-EES-Yeni-Enerji-Kaynaklari-2006115408.pdf> [Ziyaret Tarihi: 08 Ocak 2021].

- Brown, M., 2001, Power Supply Cookbook, Newnes Press, Boston.
- Buso, S., 1999, Design of Robust Voltage Controller for a Buck-Boost Converter Using  $\mu$ -Synthesis, IEEE Transactions on Control Systems Technology. 7(2): 222–229.
- Canesin, C. A. and Gonçalves, F. A. S., 2005, A 2kW Interleaved ZCS-FM Boost Rectifier Digitally Controlled By FPGA Device, IEEE.
- Cecati, C., Dell'Aquila, A. and Liserre, M., 2004, A novel three-phase single-stage distributed power inverter. Power Electronics, IEEE Transactions on, 19(5), 1226-1233.
- Chao, K-H. and Yang M-S., 2014, High step-up interleaved converter with soft-switching using a single auxiliary switch for a fuel cell system. IET Power Electron.
- Chen, J. and Bao. Y. J., 2013, Characteristics analysis and comparison of buck boost circuit and Cuk circuit. Power Electronics Systems and Applications (PESA), 2013 5th International Conference on. IEEE.
- Chen, Y. ve Smedley, K., 2008, Three-phase boost-type grid-connected inverter. Power Electronics, IEEE.
- Chengbin M., Kazuhiro Y. and Kazuaki H., 2015, Si-IGBT versus SiCMOSFET — An isolated bidirectional resonant LLC DA-DA converter for distributed power systems, SICE, pp:894-899.
- Choi H. and Balogh L., 2012, A Cross-Coupled Master–Slave Interleaving Method for Boundary Conduction Mode (BCM) PFC Converters, IEEE Transactions on Power Electronics, 27(10), 4202-4211.
- Çakır, G., 2006, Yumuşak Anahtarlama DA-DA Boost Dönüştürücü Topolojisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çengelci, E., 1999, Anahtarlama DA-DA Güç Dönüştürücü Tasarımı, Tübitak.
- Çetinkaya, M. ve Karaosmanoğlu, M., 2003, Yakıt Pilleri. Tesisat Mühendisliği.
- Çolak, İ. ve Demirtaş, M., 2008, Rüzgâr Enerjisinden Elektrik Üretiminin Türkiye'deki Gelişimi, Türk Bilim Araştırma Vakfı (TÜBAV) Bilim Dergisi, cilt 1, sayı 2, s. 55-62.
- Çoruh, N., 2013, Yumuşak Anahtarlama Sarmışık Tip Da-Da Dönüştürücü Tasarımı Ve Uygulaması, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Do-Hyu, K., Jong-Ho, J., Joung-Hu P. and Jung-Won K., 2013, Single-Ended High-Efficiency Step-up Converter Using the Isolated Switched-Capacitor Cell, Soongsil University, Dept. of Electrical Engineering, Seoul, Korea (Journal of Power Electronics, Vol. 13, No. 5).

- Drew, B., Plummer, A.R. and Sahinkaya, M.N., 2009, A Review Of Wave Energy Converter Technology, Department of Mechanical Engineering, University of Bath, Bath, UK
- Dur, F., 2005, The Usage of Stochastic and Multicriteria Decision-Aid Methods Evaluating Geothermal Energy Exploitation Projects, Master Thesis, the Graduate School of Engineering and Science of Izmir Institute of Technology, İzmir.
- Erickson R.W., 1999, DA-DA Power Converters, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 5, 53-63.
- Etemoğlu, A.B., Can, M. ve Kılıç, M. 2004, Ülkemiz Jeotermal Kaynaklarının İkinci Kanun Verim Değerlerine Bağlı Sınıflandırılması, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 9, Sayı 1, Bursa.
- Evrans, F., 2012, Yüksek Gerilim Kazançlı Kuplajlı İndüktör Kullanan Z-Girişli DA-DA Dönüştürücü Topolojileri, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Falin, J., 2008, Designing DC/DC converters based on SEPIC topology, Texas Instruments, Texas.
- Garcia, M. J. P. and Gutierrez, G. J. E., 2009. Integrated Design & Control of a Buck Boost Converter, Revista Controle & Automação, 20(3).
- Genç, N., 2010, Birim Güç Katsayılı Ve Sıfır Gerilim Geçişli Yeni Bir Sarmaşık Yükselten Dönüştürücünün Tasarımı Ve Gerçeklenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ghalib, M. A., Abdalla, Y. S. and Mostafa, R. M., 2014, Design and Implementation of a Pure Sine Wave Single Phase Inverter for Photovoltaic Applications.
- Gündoğdu, A. ve Çelikel, R., 2020, ANN-Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems, Turkish Journal of Science & Technology.
- Gürdal, O., 2000, Güç Elektroniği (Analiz, Tasarım ve Simülasyon). ISBN: 975-591147-2. 2. Baskı. Nobel Yayın Dağıtım. Kızılay, Ankara.
- Hanifi, G., 2011, Modeling and Sliding Mode Control of DA-DA Buck-Boost Converter, 6. International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 475-480, 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.
- Hayli, S., 2001, Rüzgâr Enerjisinin Önemi Dünya'da ve Türkiye'deki Durumu, Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, cilt 11, sayı 1, s. 1-26.
- He, M., Xu, J., Chen, N., ve Zhou, G., 2007, Analysis of Buck Converter with Improved Digital Peak Voltage Control Technique, IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 1238-1243, 200.

- [http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics#Standalone\\_devices](http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics#Standalone_devices) [Ziyaret Tarihi: 08 Ocak 2021].
- <http://www.cevrebilinci.com/dalga-enerjisi-nedir-nasil-elde-edilir> [Ziyaret Tarihi: 08 Ocak 2021].
- <http://www.gunessistemleri.com/gunesenerjissis.php> [Ziyaret Tarihi: 08 Ocak 2021].
- <http://www.vestelsavunma.com> [Ziyaret Tarihi: 08 Ocak 2021].
- [http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/54a0872d81aa413\\_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sub](http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/54a0872d81aa413_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sub) [Ziyaret Tarihi: 29 Aralık 2020].
- <https://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/battery.htm> [Ziyaret Tarihi: 08 Ocak 2021].
- <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes> [Ziyaret Tarihi: 08 Ocak 2021].
- <https://mekanikdunyasi.wordpress.com/2014/11/03/pil-ve-pil-cesitleri-nelerdirnasil-calisir>. [Ziyaret Tarihi: 08 Ocak 2021].
- <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/analysis-of-four-DA-DA-converters-in-equilibrium/> [Ziyaret Tarihi: 08 Ocak 2021].
- <https://www.analog.com/en/technical-articles/the-low-output-voltage-ripple-zeta-dc-dc-converter-topology.html#> [Ziyaret Tarihi: 08 Ocak 2021].
- Ion F. and Predusca G., 2008, A Comparative Study of Sepic, Cuk and Zeta Converters, Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty, 1(8), 17-22.
- Iov, F., Ciobotaru, M., Sera, D., Teodorescu, R. and Blaabjerg, F., 2007, Power electronics and control of renewable energy systems. In Power Electronics and Drive Systems, 2007. PEDS'07. 7th International Conference on (pp. P-6). IEEE.
- İnce, U., 2005, A Case Study of Material Testing For Corrosion In Low Temperature Geothermal Systems, Master Thesis, the Graduate School of Engineering and Science of Izmir Institute of Technology, İzmir.
- İnger, E., Özdemir, Z., Yaşar, İ., 2006, Sodyum Bor Hidrür üretimi ve doğrudan sodyum bor hidrürlü yakıt pili üretimi ve entegrasyonu, Türkiye 10. Enerji Kongresi.
- Jozwik, J. J. and Kazimierczuk, M. K., 2013, Dual sepic PWM switching-mode DC/DC power converter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, cilt 36, no. 1, pp. 64-70, 1989.- (A. Ioinovici, Power electronics and energy conversion systems, fundamentals and hardswitching converters, John Wiley & Sons.
- Karadağ, Ç., 2011, Bor İçeren Yakıt Pilleri ve Savunma Sanayisinde Kullanılabilirliği, <http://mam.tubitak.gov.tr> [Ziyaret Tarihi: 08 Ocak 2021].

- Kaya M. C., 2008, Design, Implementation, And Control Of A Two-Stage AC/DC Isolated Power Supply With High Input Power Factor And High Efficiency, MSc Thesis, METU, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Kekezoğlu, B., 2007, Şebekeden bağımsız çalışan hibrid enerji sistemlerinde risk değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Keskin, A. O., Özgün, H. ve Verdioğlu, S., 2011, Fotovoltaik hakkında temel bilgiler semineri İzmir.
- Khalid, H.M., Taib B. I. and Nordin B. S., 2013, Boost Converter Design with Stable Output Voltage for Wave Energy Conversion System. International Journal of Information Technology and Electrical Engineering. Volume 2, Issue 1 ISSN: - 2306-708X.
- Kılınc, N., 2008, Geleceğin Yakıtı Hidrojen Enerjisi ve Hidrojene Dayalı Ürünler, Ticaret Dergisi, Cilt:3, Sayı:15-16, Niğe.
- Kianpour, A., Jabbari, M. and Shahgholian, G., 2016, High step-up floating-output interleaved-input coupled-inductorbased boost converter. Proceeding of the IEEE/ICEE; Shiraz; p. 1088–1093.
- Köroğlu, T., Teke, A., Bayındır, A.Ç. ve Tümay, M., 2010, Güneş Paneli Sistemlerinin Tasarımı. Elektrik Mühendisliği Dergisi, 439, 98-104.
- Kramer, W., Chakraborty, S., Kroposki, B. and Thomas, H., 2008, Advanced power electronic interfaces for distributed energy systems. National Renewable Energy Laboratory, Cambridge, MA Rep. NREL/Tp-581-42672, 1.
- Krishna, R., Kottayil, S. K. and Leijon, M., 2010, Direct Predictive Current Control of Grid Connected Neutral Point Clamped Inverter for Wave Power Extraction, IEEE International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Pisa, Italy , Pp, 175.
- Lee, D., Lee Y. and Hyun, B. K., 1998, A Novel Full-Bridge Zero-Voltage- Transition PWM DC/DC Converter with Zero-Voltage/Zero-Current Switching of Auxiliary Switches. PESC'98, Fukuoka, Japan, pp. 961-968.
- Li, W. and He X., 2011, Zero-voltage transition interleaved high step-up converter with built-in transformer. IET Power Electron.;4(5):523–531.
- Luo, F. L. and Ye, H., 2005, Essential DC/DC Converters. CRC Pres.
- Mirzaei R., 2007, Soft Switched Multi-phase Tapped-Boost Converter and its Control, PhD Thesis, Indian Institute of Science, Department of Electrical Engineering.
- Miwa, B. A., Otten, D. M. and Schlecht, M. F., 1992, High efficiency power factor correction using interleaving techniques, IEEE APEC'92 Conf., Boston, 557– 568.

- Mohan N., Undeland T.M. and Robbins W.P., 2003, Power Electronics, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., USA
- Nabil, A., Ahmed, K. N., Hyun-Woo, L. and Masafumi Miyatake Mutsuo, N., 2005, Novel High Frequency Planner Transformer Linked Soft Switching DA-DA Power Converter with Secondary Side-Phase Shifted PWM Active Rectifying Switches—, PEDs 2005, pp:129-135.
- Nayan, F., Ullah S., 2015, Modelling of Solar Cell Characteristics Considering the Effect of Electrical and Environmental Parameters” 3rd International Conference on Green Energy and Technology · ICGET.
- Nurlan, M., 2018, Mikro Ölçekli Şebeke Bağlantılı Bir Fotovoltaik Santralin Tasarlanması Ve Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi ,Denizli.
- Özgener, Ö., 2002, Türkiye’de ve Dünya’da Rüzgâr Enerjisi Kullanımı,, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, cilt 4, sayı13, s.159-173.
- Park, S., Cha, G. and Jung, Y., 2000, Design and Application for FV Generation System Using a Soft-Switching Boost Converter With SARC , IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57:515-527.
- Pervaiz, S., Ur Rehman, M., Asghar, A. B. and Zaffar, N., 2013, A novel singlephase soft switching microinverter for photovoltaic applications. InElectric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2013 3rd International Conference on (pp. 1-5). IEEE.
- Pressman, A.I., 1998, Switching Power Supply Design, Second Ed. McGraw-Hill, 1998, pp. 105-140.
- Quan, L. and Wolfs, P., 2008, A Review of the Single Phase Photovoltaic Module Integrated Converter Topologies with Three Different DC Link Configurations , Power Electronics, IEEE Transactions on, 23(3): 13201333, May 2008.
- Raducu, G. A., 2008, Control of grid side inverter in a B2B configuration for WT applications. PED10-1015b, Aalborg University.
- Raj N.S.S. and Urmila B., 2013, PV Fed Zeta Converter, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 3(4), 2692-2696.
- Ranabhat K., Patrikeev L., Revina A. A., Andrianov K., Lapshinsky V. and Sofronova E., 2016, An Introduction To Solar Cell Technology”, Peoples` Friendship University of Russia, Paper number: 14(4), 405, 481 – 491
- Rashid, M. H., 2014, Power Electronics Devices, Circuits and Applications, Pearson Education,,

- Rong-Jong, W., Chung-Yo, L., Rou-Yong, D. and Yung-Ruei C., 2008, HighEfficiency Power Conversion System for Kilowatt-Level Stand-Alone Generation Unit With Low Input Voltage, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 55(10):3702-3714.
- Sathyan, S., Suryawanshi, H. and Ballal, MS., 2015, Soft-switching dc–dc converter for distributed energy sources with high step-up voltage capability. IEEE Trans. Ind. Electron. 62(11):7039–7050.
- Sayar, N., 2008, Pem Yakıt Hücrelerinde Platinsiz Metal Nanokompozit Katalizörler. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Saygı, A. S., 2017, Da-Da Dönüştürücülerde Kullanılan Yumuşak Anahtarlama Tekniklerinin İncelenmesi Ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Shin H.-B., Park J.-G., Chung S.-K., Lee H.-W. and Lipo T. A., 2005, Generalized SteadyState Analysis of Multiphase Interleaved Boost Converter with Coupled Inductors, IEE Electric Power Applications, 152(3), 584-594.
- Smith, K.M. and Smedley, K.M., 2002, Properties and Synthesis of Passive Lossless Soft-Switching PWM Converters, IEEE Trans. on Power Electronics., 14,5:890899.
- Şahin, Y., 2013, Yeni Bir Yüksek Çıkışlı DA-DA Dönüştürücünün Geliştirilmesi Ve Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Şahin, Y., 2016, PWM DA-DA Dönüştürücü Ailesi İçin Yeni Bir Yumuşak Anahtarlama Hücresinin Tasarımı, Uygulaması ve Karşılaştırmalı Analizi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 442604.
- Şen, H. M., 2006, Türkiye'nin genel enerji durumu. ENKÜS 2006, İTÜ Enerji Çalıştay ve Sergisi, Bildiriler ve Sunumlar, 23-26 Haziran 2006, Enerji Enstitüsü Yayınları, No:2006/1, 10-23.
- Şenel, M. C., 2012, Rüzgâr Türbinlerinde Güç İletim Mekanizmalarının Tasarım Esasları-Dinamik Davranış, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Tabak, C., Dinçer, H., Karayazı, K., Arslan E., Yıldız, M. H., Karayazı, S., Yoğunlaştırıcı Güneş Enerjisi Sistemleri İle Elektrik Enerjisi Üretimi, [https://www.emo.org.tr/ekler/d787c069b9f2868\\_ek.pdf](https://www.emo.org.tr/ekler/d787c069b9f2868_ek.pdf) [Ziyaret Tarihi: 08 Ocak 2021].
- Tsukiyama, D. and Fukuda, Y, 2012, A Novel Type High-Efficiency High-FrequencyLinked Full-Bridge DA-DA Converter Operating under Secondary-Side Series Resonant Principle for High-Power FV Generation, IEEE ICRERA.
- Tufan Ş., 2010, Düzlemsel ve Bükülmüş Kollektörlerinin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

- Tunay, G. ve Mehmet, C., 2001, Büyük Hidroelektrik Santraller İle Küçük Hidroelektrik Santrallerin Karşılaştırılması. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 265-271, İzmir.
- Turan, O., 2015, Fotovoltaik Teknoloji Makine ve İmalat Mühendisliği Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bölüm 7: Fotovoltaik Sistem Tasarımı. <https://docplayer.biz.tr/8363316-Fotovoltaik-teknoloji-dr-osman-turan-makine-ve-imalat-muhendisligi-bilecik-seyh-edebali-universitesi.html> [Ziyaret Tarihi: 08 Ocak 2021].
- Ürgün, S., Erfidan, T. ve Çoruh, N., 2010, Design and Implementation of DC-DC Buck Converter. 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Taichung, Tayvan, ss.24-25.
- Vale R., Beira P. and Costa, J., 2007, Optimization of wave energy extraction with the Archimedes Wave Swing, Ocean Engineering ,Vol.34, Issue ,17-18, Pp. 2330 – 2344.
- Walker, G. R. and Sernia, P. C., 2004, Cascaded DA-DA converter connection of photovoltaic modules, in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 4, pp. 1130-1139.
- Weicheng Z., Qing G., Xinke W., Liu Y. and Kuang S., 2016, A 1200V/100A all-SiC power module for boost converter of EV/HEV's motor driver application, SSLChina: IFWS, pp:38-41.
- Wu, K. C., 2005, Switch-Mode Power Converters: Design and Analysis, Academic Press, 50-85.
- [www.uni-leipzig.de/~grw/expo/index.html](http://www.uni-leipzig.de/~grw/expo/index.html) [Ziyaret Tarihi: 08 Ocak 2021].
- Xiangjun, Z., Hankui L. and Dianguo X., 2003, Analysis and design of the flyback transformer, IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE Volume 1, 2-6 Page(s):715 – 719.
- Yang, I.S., 2000, A180W, 100KHz Forward Converter Using QFET, FairChild Semiconductor Corp, Application Note Number AN9015.
- Yang, Y., Ruan, G., Xiang, C., Wang, G. and Tour James, M., 2014, Flexible ThreeDimensional Nanoporous Metal-Based Energy Devices". Journal of the American, 136 (17), 6187-619.
- Yaosuo, X., Liuchen, C., Sren, B.K., Bordonau, J. and Shimizu, T., 2004, Topologies of single-phase inverters for small distributed power generators: an overview , Power Electronics, IEEE Transactions on, 19(5):1305- 1314.
- Yıldız, M.N., 2009, Güç Elektroniği Ders Notları, Ege Üniversitesi.

- Yılmaz, S., 2008, Eğilme-Burulma Bağlısımlı Rüzgâr Türbini Pala Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yiğit, Ü., 1994, Jeotermal Enerjinin Uygulama Alanları, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi, Isparta.
- Zhang, L., Xu D and Shen, G., 2015, A high step-up dc to dc converter under alternating phase shift control for fuel cell power system. IEEE Trans Power Electron. ;30 (3):1694–1703.