

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**Z-KAYNAK EVİRİCİ TEMELLİ FOTOVOLTAİK
GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ**

Zeynep Mine ALÇİN

Yüksek Lisans Tezi
Anabilim Dalı: Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi
Programı: Elektronik Eğitimi
Danışman: Prof. Dr. Servet TUNCER

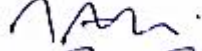
AĞUSTOS-2017

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Z-KAYNAK EVİRİCİ TEMELLİ FOTOVOLTAİK
GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Zeynep Mine ALÇİN
(111131102)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 27.07.2017
Tezin Savunulduğu Tarih: 18.08.2017

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Servet TUNCER (F.Ü.) 
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hanifi GÜLDEMİR (F.Ü.) 
Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÜSTÜNDAĞ (B. Ü.) 

AĞUSTOS -2017

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Bilgisayar Eğitim Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programında hazırlanmıştır.

Yüksek Lisans eğitime başladığım günden tez çalışmasının hazırlanması ve yazımı süresince karşılaştığım her türlü sorunun çözümü için sürekli destek veren, tecrübelerini benimle paylaşan, bilimsel katkılarıyla bana yardımcı olan ve değer katan danışman hocam Prof. Dr. Servet TUNCER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Bana hayatımın her aşamasında maddi manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve sevgili eşim Ömer Faruk ALÇİN'e en içten teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Yüksek Lisans eğitimim süresince sürekli desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Hanifi GÜLDEMİR'e ve tez yazım aşamasında bilgi ve görüşlerine başvurduğum saygıdeğer Dr. Muzaffer ASLAN, Volkan KAYA ve Arş. Gör. Ferhat UÇAR'a ayrıca teşekkür ederim.

Bu yüksek lisans tezinin ülkemizde Fotovoltaik güç üretim sistemi konusunda çalışma yapacak olanlara katkıda bulunmasını dilerim.

Zeynep Mine ALÇİN
ELAZIĞ- 2017

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	IX
KISALTMALAR LİSTESİ	X
SİMGELER LİSTESİ.....	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI VE FOTOVOLTAİK SİSTEMLER.....	6
2.1. Yenilenebilir enerji kaynakları	6
2.1.1 Güneş enerjisi	6
2.1.2 Rüzgâr enerjisi.....	6
2.1.3 Biyoenerji	7
2.1.4 Jeotermal enerji	7
2.1.5 Hidroelektrik enerji	7
2.1.6 Hidrojen enerjisi	8
2.1.7 Dalga enerjisi.....	8
2.1.8 Gel-Git enerjisi	8
2.2. FV Enerjinin gelişimi	8
2.3. FV hücre	13
2.3.1. FV hücre eşdeğer devresi	14
2.3.2. FV hücrenin I-V ve P-V karakteristikleri.....	16
2.3.3. FV sistemlerin verimlilikleri	17
2.3.4. FV sistem kayıpları	18
2.3.4.1. Işıksal kayıplar	18
2.3.4.2. Elektriksel kayıplar.....	18
2.3.4.3. Akım kayıpları.....	18

2.3.4.4. Açık devre gerilimi.....	19
2.3.4.5. Direnç kayıpları.....	19
2.3.4.6. Verim kayıpları.....	19
2.4. FV enerji üretim sistemleri.....	19
2.5. FV enerji üretim sistem birimleri	20
2.5.1. FV panel ve dizi	21
2.5.2. DA-AA eviriciler.....	21
2.5.3. Aküler.....	23
2.6. FV sistem tipleri	26
2.6.1. Şebeke bağlantılı FV sistemler.....	26
2.6.2. Şebekeden bağımsız FV sistemler.....	27
2.6.3. Karma yapılı (Hybrid) FV sistemler	28
3. EVİRİCİLER.....	30
3.1. Evirici çeşitleri	30
3.1.1. Gerilim kaynaklı eviriciler	31
3.1.2. Akım kaynaklı eviriciler (AKE).....	32
3.2. Evirici devrelerinde kullanılan anahtarlar	33
3.3. Evirici çıkışının kontrol edilmesi	34
4. Z-KAYNAK EVİRİCİ	36
4.1. Z-kaynak dönüştürücü devre yapısı	36
4.2. Z-Kaynak Eşdeğer Devre, Çalışma Prensipleri ve Kontrol.....	38
4.3. Z-kaynak evirici devresinin analizi ve çıkış dalga şeklinin elde edilmesi	40
4.4. Empedans ağındaki kondansatörler ve indüktanslar	44
5. FOTOVOLTAİK SİSTEMİN MODELLENMESİ VE BENZETİM SONUÇLARI.....	45
5.1. Üç fazlı Z-kaynak eviricinin benzetimi.....	45
5.2. FV güç üretim sisteminde kullanılan panel	54
5.3. Tüm sistemin modellenmesi.....	58
5.4. Benzetim sonuçları	60
6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	71

ÖZET

Fosil enerji kaynaklarının tükenmesi ve çevreye zararlı etkileri yüzünden Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK) popüler olmakta ve fazla dikkat çekmektedir. Diğer YEK'ler ile karşılaştırıldığında Fotovoltaik (FV) enerji üretim sistemleri doğaya ve hayvanlara zararsız olması, düşük bakım maliyeti ve düşük gürültü kirliliği gibi avantajlara sahiptir. Şebeke bağlantılı FV sistemleri, güneş enerji sistemlerinin yaygın kullanım alanlarından biridir. FV sistemlerde istenilen frekans ve genlikte çıkış elde etmek için ise eviricilere ihtiyaç vardır. Ayrıca şebeke bağlantılı FV sistemler, sabit güç sağlamak için yükseltme ve alçaltma yeteneğine sahip olmalıdır. Günümüzde geleneksel eviricilerin kısıtlamalarının üstesinden gelmek ve evirici yapısındaki anahtar sayısını azaltmak için Z-kaynak eviriciler yaygın bir şekilde çalışılmaktadır. Z-kaynak eviricinin bir aşamada alçaltma/yükseltme ve evirme yeteneğine sahiptir. Z-kaynak eviricini anahtarlanması, sinüsoidal darbe genişlik modülasyon tekniği ile yapılmıştır. FV panel 100 paralel 8 seri FV hücre ile oluşturulmuştur. Benzetim sonuçları Z-kaynak eviricinin FV güç üretim sistemleri için uygun ve verimli olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik güç üretim sistemleri, eviriciler, Z-kaynaklı eviriciler, sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu.

SUMMARY

Z-Source Inverter Based PV Power Generation System

Due to the depletion of fossil energy resource and its harmful effects to the environment, the renewable energy systems become popular and draw attention. When compared to the other renewable-energy sources, photovoltaic (PV) energy has advantages such as no harmful effects to environment and animals, minimum maintenance cost and minimum noise pollution. Grid-connected PV energy is the most common usage areas of solar energy. PV system needs an inverter to obtain an output with the desired frequency and amplitude. Also, grid-connected PV energy system should have buck and boost ability to provide steady power. Nowadays, Z-source inverter (ZSI) has been widely studied since proposed to overcome restrictions of conventional inverter and reduce number of switching device. ZSI topology can carry out buck/boost and invert in one step. In this thesis, ZSI based grid-connected PV energy generation system with three phase has been modelled in Matlab/Simulink environment. Sinusoidal pulse width modulation scheme used for the switching elements of ZSI. In model, PV array is formed 100 parallel and 8 series connected PV cell. Simulation results has been showed that ZSI is suitable and efficient for PV power system.

Keywords: PV power systems, inverter, Z-source inverter, Sinusoidal pulse width modulation.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Fotovoltaik sistemin genel blok diyagramı	2
Şekil 2.1. Güneş enerjisi potansiyel atlası	9
Şekil 2.2. Türkiye güneşlenme süreleri (saat bazında)	10
Şekil 2.3. Dünyada birincil enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımı-2013.....	11
Şekil 2.4. Yeni politikalar senaryosu dikkate alındığında dünya elektrik üretiminde enerji kaynaklarının payları (2000-2040)	11
Şekil 2.5. Konya Kızören güneş enerji santrali	13
Şekil 2.6. FV hücrenin içyapısı	14
Şekil 2.7. FV panel eşdeğer devresi	15
Şekil 2.8. Yeterli ve yetersiz ışık seviyeleri için I-V karakteristiği	16
Şekil 2.9. FV panel güç karakteristiği	17
Şekil 2.10. FV sistemin genel yapısı	20
Şekil 2.11. FV hücre, modül, panel ve dizi yapısı	21
Şekil 2.12. Bir fazlı yarım köprü evirici.....	22
Şekil 2.13. Bir fazlı tam köprü evirici	23
Şekil 2.14. Tipik bir şebeke bağlantılı FV sistemin blok şeması.	27
Şekil 2.15. Şebekeden bağımsız FV sistem blok şeması.....	27
Şekil 2.16. Tipik bir hibrit FV sistem.....	29
Şekil 3.1. Gerilim kaynaklı evirici	31
Şekil 3.2. Geleneksel akım kontrollü evirici	32
Şekil 4.1. Z-kaynak dönüştürücünün genel devre yapısı.....	36
Şekil 4.2. Anahtarlama elemanlarında ters paralel bağlı diyot bulunduran empedans kaynaklı dönüştürücü yapısı.....	37
Şekil 4.3. Anahtarlama elemanlarına seri bağlı diyot bulunduran empedans kaynaklı dönüştürücü yapısı	38
Şekil 4.4. DA baradan bakıldığında empedans kaynaklı eviriciye ait eşdeğer devre	39
Şekil 4.5. DA baradan kısa devre sıfır konumunda bakıldığında empedans kaynaklı eviriciye ait eşdeğer devre.....	39
Şekil 4.6. DA baradan kısa devre sıfır olmayan konumlarda bakıldığında empedans kaynaklı eviriciye ait eşdeğer devre.....	40
Şekil 4.7. Geleneksel DGM kontrolü	43

Şekil 4.8. Aktif vektörler sabit durumda kısa devre sıfır konumlarını içeren DGM kontrolü	43
Şekil 5.1. Üç fazlı Z-kaynak eviricinin Matlab benzetim modeli	46
Şekil 5.2. Z-kaynak evirici için anahtarlama sinyallerinin benzetim modeli.....	47
Şekil 5.3. Z-kaynak evirici için anahtarlama sinyallerinin alt sistem benzetim modeli....	48
Şekil 5.4. Z-kaynak eviricinin anahtarlama sinyalleri.....	49
Şekil 5.5. Z-kaynak eviricinin bir fazına ilişkin filtresiz çıkış hat gerilimi.....	51
Şekil 5.6. Z-kaynak eviricinin bir fazına ilişkin filtreli çıkış hat gerilimi.....	51
Şekil 5.7. Z-kaynak eviricinin bir fazına ilişkin filtresiz çıkış faz gerilimi.....	52
Şekil 5.8. Z-kaynak eviricinin bir fazına ilişkin filtreli çıkış faz gerilimi.....	52
Şekil 5.9. Z-kaynak eviricinin bir fazına ait hat yük akımı	53
Şekil 5.10. Üç fazlı Z-kaynak eviricinin filtreli çıkış hat gerilimi	53
Şekil 5.11. FV panel Matlab/Simulink bloğu.....	54
Şekil 5.12. FV hücrenin eşdeğer devresi	54
Şekil 5.13. FV hücrene ait I-V eğrisi ile P-V eğrisi	55
Şekil 5.14. SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV panelinin farklı sıcaklık değerleri seçilerek elde edilen a) I-V eğrisi b) P-V eğrisi	56
Şekil 5.15. SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV panelin verimlilik grafiği	57
Şekil 5.16. Z-Kaynak evirici temelli fotovoltaiik güç üretim sistemi benzetim modeli	59
Şekil 5.17. FKD ölçüm bloğu.....	60
Şekil 5.18. FKD ölçüm bloğu eklenmiş SDGM anahtarlama modeli	60
Şekil 5.19. SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV Panel gerilimi (V_{fv}).....	61
Şekil 5.20. SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV Panel akımı	62
Şekil 5.21. Z-Kaynak evirici temelli FV güç üretim sistemine ait faz gerilimi	62
Şekil 5.22. Z-Kaynak evirici temelli FV güç üretim sistemine ait hat gerilimi	63
Şekil 5.23. Yükün bir fazına ait a) Çıkış hat akımı b) Harmonik spektrumu.....	63

TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Türkiye’de bölgelere göre güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süreleri dağılımı	10
Tablo 5.1. Z-kaynak evirici için kullanılan sistemin parametreleri.....	47
Tablo 5.2. Darbe genişliğinde yapılan değişiklik ile elde edilen faz gerilimi, faz akımı ve çıkış hat gerilim değerleri ve THD sonuçları (DG=0.05-0.4).....	50
Tablo 5.3. Darbe genişliğinde yapılan değişiklik ile elde edilen eviricinin hat gerilimi tepe değeri (v_{ac}), B yükseltme faktörü, B_B düşürme-Yükseltme faktörü değerleri (DG=0.05-0.4).....	50
Tablo 5.4. SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV panelin katalog verileri (ışınım değeri: 1000W/m ² , hücre sıcaklığı: 25°C).....	57

KISALTMALAR LİSTESİ

AA	: Alternatif akım
AGM	: Akıllı güç modülü (IPM)
AKE	: Akım kaynaklı evirici
BJT	: Bipolar jonksiyonlu transistör
DA	: Doğru akım
DG	: Darbe genişliği
DGM	: Darbe genişlik modülasyonu
EMG	: Elektromanyetik girişim
FV	: Fotovoltaik
GKE	: Gerilim kaynaklı evirici
GTO	: Kapı sönmümlü tristör
IGBT	: Kapıdan izoleli iki kutuplu transistör
KGK	: Kesintisiz güç kaynakları
MGN	: Maksimum güç noktası
MGNI	: Maksimum güç noktası izleyicisi
MOSFET	: Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör
QZSI	: Yarı Z-kaynaklı evirici
SCR	: Silisyum kontrollü doğrultucu
SDGM	: Sinüsoidal darbe genişlik modülasyonu
YEK	: Yenilenebilir enerji kaynakları
Z-kaynak	: Empedans kaynak
ZSI	: Empedans kaynaklı evirici

SİMGELER LİSTESİ

$\hat{V}_i$	: Evirici köprüsü üstündeki ortalama DA hat geriliminin tepe değeri
$\hat{V}_{ac}$	: Eviricinin tepe faz gerilimi
A	: Eğri uydurma katsayısı
B	: Kısa devre sıfır konumundan dolayı oluşan yükseltme faktörü
B_B	: Z-kaynak düşürücü-yükseltici faktörü, (buck-boost faktör)
C_1, C_2	: Z-ağı kondansatörleri
F	: Hücrenin ideal faktörü
f_s	: Anahtarlama frekansı
$f_{\text{ş}}$	: Şebeke frekansı
I	: FV modül çıkış akımını
I_L	: Işığın ürettiği akımı
I_D	: Diyot doyum akımı
I_d	: diyot akımı
I_{ea}, I_{eb}, I_{ec}	: a, b, c fazı evirici akımı
I_{eabc}	: 3 faz evirici akımı
I_{fv}	: FV dizi akımı
I_{mp}	: FV panel maksimum güçteki akımı
I_{nom}	: Nominal güçte akım
I_o	: Ters sızıntı akımı
I_p	: Paralel kol direncinden geçen akım
I_{ph}	: Işık fotonlarıyla üretilen akım veya kısa devre akımı
I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}	: a, b, c fazı şebeke akımı
I_{sabc}	: Üç faz şebeke akımı
I_{sc}	: Kısa devre akımı
I_{ya}, I_{yb}, I_{yc}	: a, b, c fazı yük akımı
I_{yabc}	: Üç faz yük akımı
K	: Boltzman sabiti
K_i	: İntegral kazancı
K_p	: Oransal kazanç
L_1, L_2	: Z-ağı indüktansları

M	: Modülasyon indeksi
P	: Gücün sıcaklık katsayısı
P_{fv}	: FV panel gücü
P_m	: FV panel maksimum gücü
P_{nom}	: Nominal güç,
P_y	: Yük gücü
Q	: Elektron yükü
R_s	: Çıkış akımına karşı gösterilen seri iç direnç
R_{sh}	: Paralel kol direnci
R_y	: yük direnci
T	: Z-kaynak anahtarlama periyodu
T_0	: Z-kaynak kısa devre sıfır konum süresi
T_{FV}	: Mutlak sıcaklık sabiti
V	: Yük akımı sıfır iken PV hücre gerilimi
V_s	: Z-kaynak DA kaynak gerilimi
V_{C1}, V_{C2}, V_C	: Z-kaynak kondansatör gerilimleri
V_d	: Z-kaynak Diyot gerilimi
V_{fv}	: FV dizi gerilimi
V_i	: Evirici köprüsü üzerindeki ortalama DA gerilim
V_{L1}, V_{L2}, V_L	: Z-kaynak bobin gerilimleri
V_{mp}	: FV panel maksimum güçteki gerilimi
V_{nom}	: Nominal güçte gerilim
V_{oc}	: Açık devre gerilimi
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	: a, b, c fazı anlık şebeke gerilimi
V_{sabc}	: Üç faz şebeke gerilimi
η	: Verimlilik

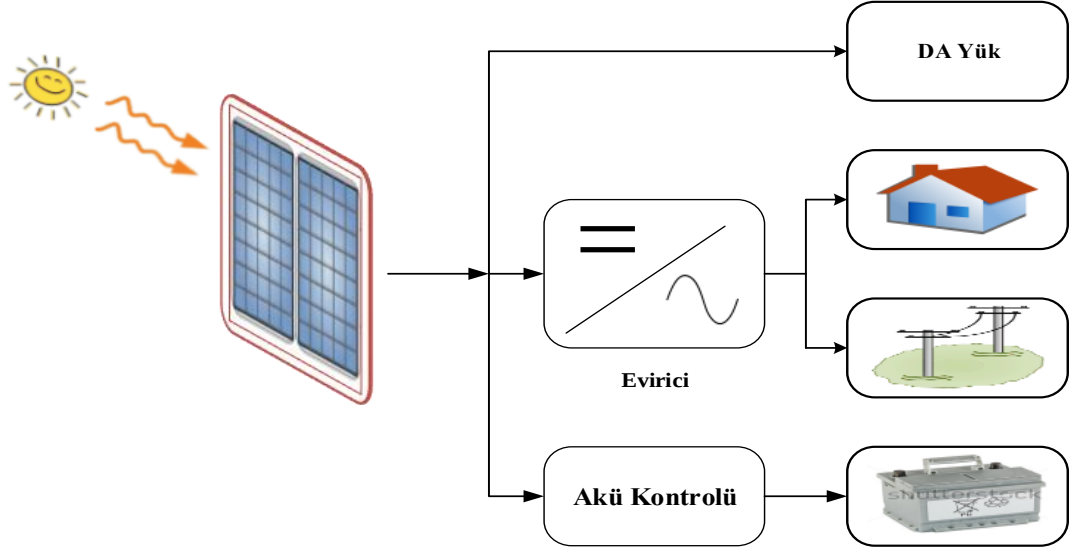
1. GİRİŞ

Bilinen enerji kaynaklarının hızla tükenmeye başlaması, ham madde fiyatlarının artması, bu enerji kaynaklarının kullanımındaki bazı zorluklar, çevre ve insan sağlığı üzerindeki zararlı etkileri düşünüldüğünde Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK) üzerine çalışmaları hızla artırmaktadır. Dünyanın artan enerji ihtiyacının temiz, ekonomik ve güvenli bir biçimde karşılanabilmesi için yapılan çalışmalar neticesinde güneş, rüzgâr ve yakıt hücreleri temelli YEK'in önemi artmaktadır. Güneş enerjisi YEK içinde önemli bir yer tutmaktadır. Güneşten ışıınım yoluyla dünyaya yılda yaklaşık olarak 173 milyar MW enerji ulaşmaktadır. Ulaşan bu güneş enerjisi ise dünyadaki fosil kaynaklı rezervlerin yaklaşık 160 katına eşdeğerdir. Tüm bu bilgiler ışığında fotovoltaiik (FV) enerji kaynakları da alternatif enerji kaynakları arasındaki saygın ve önemli yerini almıştır [1-3].

Nükleer yakıtlara dayalı enerji üretim türleri çevreye zarar vermektedir. Hiçbir atığı olmayan rüzgâr santralleri kurulum aşamasında emniyet, görsel kirlilik, gürültü, vahşi yaşam ve doğal bitki örtüsü üzerine olumsuz etkileri dikkate alındığında, bu santrallerin kurulumundan vazgeçilmektedir. Bu da güneş temelli enerji kaynaklarına verilen önemi daha da arttırmaktadır [1].

Her şeyden önce FV sistemler çevreye ve canlılara zararı olmayan, doğrudan atık üretmeyen temiz bir enerji üretim çeşididir. Aynı zamanda FV sistemler modüler olma özelliği ile de ihtiyaca göre istenilen yere monte edilebilirler. İşletme ve bakım maliyetleri ise diğer enerji üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında yok denecek kadar azdır. Güneş enerji teknolojisindeki gelişmelerle birlikte güneş modüllerinin fiyatları ise önemli ölçüde düşmüştür [1-5,6].

FV sistemlerde öncelikle FV paneller aracılığıyla güneş enerjisi elektrik enerjisine çevrilmektedir. FV panel, Doğru Akım (DA) gerilim üretir. Böylece DA veya Alternatif Akım (AA) ile çalışan yük beslenebilir [1,5]. Fakat alternatif akım ile çalışan yük beslenecek ise sistemde bir eviriciye ihtiyaç vardır. Şekil 1.1'de FV sistemin genel blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 1.1. Fotovoltaik sistemin genel blok diyagramı

Gün içerisinde güneş ışığı sürekli ya da kararlı olarak yayılmaz. Güneş ışınlamı günün belirli saatlerinde veya mevsim şartlarına göre değişiklik gösterir. Buna bağlı olarak ihtiyaç fazlası olan enerji akülere depolanarak güneş ışığının az veya kısmen kesilmesinin önüne geçilmiş olur [1-4].

FV sistemlerinin gerilimi sıcaklık ve radyasyona bağlı olarak değişir. Değişen gerilim değerlerini düzeltmek, istenilen genlik ve frekansta gerilim üretmek için FV uygulamalarında eviriciler kullanılmaktadır [4].

Eviriciler, DA kaynaklardan yüke farklı frekans ve genlikte AA güç sağlayan elektronik devrelerdir. Evirici devrelerinde hedef istenilen frekans ve genlikte alternatif gerilim üretmektir. Eviricilerin girişlerinde aküler, güneş pilleri ve yakıt hücreleri gibi DA kaynaklar kullanılabilir [5].

Eviriciler endüstride;

- Değişken hızlı asenkron motor sürücü devreleri,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- DA iletim sistemleri,
- Endüksiyonla ısıtma sistemleri,
- AA gerilim regülatörleri gibi alanlarda kullanılmaktadır [3].

FV sistem uygulamalarında geleneksel eviricilerin kullanılması; maliyetin azaltılmasının yanı sıra düşük verimlilik ve bileşen sayısının artmasına yol açar. Bu durum empedans-kaynaklı (Z-kaynak) eviriciler ile aşılabılır [5]. Z-kaynaklı eviricilerde bulunan

empedans ağı geleneksel eviricilerin üstesinden gelemediği sorunları ortadan kaldırmaktadır [5]. Z-kaynak evirici konsepti ile tüm DA-AA, AA-DA, AA-AA ve DA-DA güç dönüşümlerini yapabilmektedir. Yalnız bir aşamada gerilimi yükseltmek ve evirme yeteneğine sahip olması Z- kaynaklı eviricilerin avantajıdır. Bu avantaj Z-kaynak eviricilerin FV sistem uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmasını neden olmuştur [5].

Literatürde FV sistemler ve Z-kaynak tabanlı FV ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar aşağıdaki sıralama baz alınarak değerlendirilmiştir.

- Geleneksel eviriciler,
- Geleneksel evirici temelli YEK sistemleri,
- Z-kaynaklı eviriciler,
- Z-kaynak evirici temelli YEK sistemleri
- Z-kaynak evirici temelli FV sistemleri

Çolak ve Kabalcı güç gereksinimlerini ve çıkış sinyali temel alarak bir ve üç fazlı evirici topolojilerinin sınıflandırmasını yapmışlardır. Ayrıca evirici çıkış sinyali iyileştirilmesi için kullanılan yapılara yer verilmiştir [7].

Çelik ve arkadaşları, şebeke bağlantılı YEK’de kullanılan yükselten tip kıyıcı ile H5 tipi evirici topolojisinde maksimum güç noktası ve histerisis gibi kontrol yapılarını irdelenmişlerdir. Ardından benzetim çalışmaları ile çeşitli karşılaştırmalar yapılmıştır [8].

Çalıkoğlu ve arkadaşları, şebeke bağlantılı FV güç sistemlerini açıklamakta ve şebeke bağlantısında dikkat edilmesi gereken önemli hususlara değinmişlerdir. Ayrıca şebeke bağlantı problemlerini azaltmaya ve güç kalitesini artırmaya yönelik yapıları incelemişlerdir [9].

Sefa ve Altın [10]’da FV sistemli ve şebeke etkileşimli YEK’de kullanılan eviriciler üzerine genel bir bakış sunmuşlardır ve evirici yapılarının tarihi gelişimi, günümüz topolojileri, gelecekteki beklenti ve eğilimleri ortaya koymuşlardır. Ayrıca incelenen evirici topolojileri arasında verim, boyut, güvenilirlik ve maliyet gibi ölçütler açısından karşılaştırmaya yer verilmiştir.

Peng [5] numaralı çalışmasında, geleneksel akım ve gerilim kaynaklı eviricilerin sınırlılıkları üstünde durarak Z-kaynak evirici üzerinde deneyler yapmıştır. Z-kaynak eviricilerin geleneksel topolojilere kıyasla daha az bileşen ile gerilimi arttırdığını kanıtlamıştır. Böylece bileşen sayısındaki düşüş sistem maliyetine olumlu yansyarak, sistemin verimi artırılmıştır [5].

Li ve arkadaşları ise Z-kaynaklı eviriciden türetilen ve yeni bir topoloji olan yarı Z-kaynak evirici üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar ile yeni topolojinin Z-kaynaklı eviricinin tüm avantajlarını devralarak; tek bir aşamada azaltma/yükseltme, ters çevirme ve güç koşullandırmayı gerçekleştirebildiğini kanıtlamışlardır [11].

Kaya [12] numaralı çalışmasında, üç fazlı Z-kaynak eviriciyi MATLAB Simulink ortamında modellemiştir. Sinusoidal Darbe Genişlik Modülasyon (SDGM) anahtarlama tekniği ile Z-kaynak eviricinin benzetimi yapılmıştır. Aynı şartlar altında Z-kaynak evirici üstünlüklerini göstermek amacıyla geleneksel gerilim kaynaklı evirici yapısı ile bazı ölçütleri dikkate alan bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırmada Z-kaynak eviricinin farklı anahtarlama parametreleri altında, evirici çıkış büyüklükleri (akım, gerilim) ve bu büyüklüklere ilişkin toplam harmonik bozulma açısından üstünlüğü gösterilmiştir [12].

[4] numaralı çalışma; Z-kaynak evirici tabanlı yakıt pili uygulamalarına odaklanmaktadır. Bu yapıya ilişkin benzetim ve deneysel çalışma sonuçlarına yer verilmiştir. Benzetim çalışmaları ile deneysel çalışma sonuçları benzerlik gösterdiğinden bu yapının uygulanabilirliği kanıtlanmıştır. Z-kaynak evirici ile giriş beslemesi %30 azaltıldığı vurgulanarak yakıt pili uygulamaları için Z-kaynak evirici uygunluğu belirtilmiştir.

Supatti ve Peng; Z-kaynaklı eviricinin rüzgâr güç üretim sistemlerine uygunluğunu araştırmışlardır [13]. Önerilen yapının düşük bileşen sayısı ve maliyet, verimlilik ve yüksek performans gibi avantajları olduğunu belirtmişlerdir.

Tang ve Li; Z-kaynak evirici temelli şebekeye bağlı bir FV sistem üzerinde çalışmalar yapmış ve bu çerçevede şebeke bağlantılı akım kontrolü, DA gerilim kontrolü, maksimum güç noktası izleme üzerinde durmuşlardır. Simülasyon ve deneysel sonuçlar neticesinde önerilen sistemin geniş bir giriş voltaj aralığı ile FV sistemlerinde uygulanabilir olduğunu doğrulamışlardır [3].

Vidhyarubini ve Rohini; şebeke bağlantılı FV sistemler için Z-kaynak evirici topolojisi üzerine deneysel çalışma yapmış olup çalışmalarında senkronize darbe genişlik modülasyon tekniğini kullanmışlardır. Benzetimler tek ve üç faz olarak incelenmiş ve Z-kaynaklı eviricinin giriş geriliminden daha büyük çıkış gerilimi ürettiğini ortaya koymuşlardır [6].

Huang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yeni bir yöntem deneyerek tekli güç kademesinde maksimum güç izleme ile yükseltme ve evirme gerçekleştirmiş bu sayede anahtarlama sayısını minimuma indirmişlerdir. Böylelikle güvenilir güç kontrol sistemini oluşturmuşlardır [14].

Z-kaynaklı evirici topolojisine dayanan şebeke bağlantılı FV sistemler üzerine Tang ve arkadaşları çalışmalarda bulunmuşlardır [15]. Bu çerçevede şebeke bağlantılı akım kontrolü, DA gerilim kontrolü ve maksimum güç noktası izleme üzerinde durmuşlardır. Benzetim ve deneysel çalışma sonuçları ile önerilen yapının doğruluğu ve geçerliliğini göstermişlerdir.

Sezen doktora çalışmasında şebekeye bağlı üç fazlı aktif güç filtreleme yeteneğine sahip FV sistemin uygulanabilirliğini incelemiştir [16]. Bu amaçla tasarlanan deneysel düzenekte Saptır-Gözlemle ve maksimum güç noktası takibi algoritması kullanmıştır. Sistemin etkinliği öncelikle Matlab/Simulink ortamındaki benzetim çalışmalarıyla gösterilmiş sonrasında laboratuarda dSPACE DS1103 gerçek zamanlı denetleyici üzerinden gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla doğrulamıştır.

Bu tez çalışmasında, şebeke bağlantılı üç fazlı Z-kaynak evirici temelli FV güç üretim sisteminin benzetimi amaçlanmıştır. Hazırlanan modelde pratik uygulamalarda yaygın kullanılan SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV panelinin Matlab/Simulink modeli kullanılmıştır. Model pratik uygulamalara uygunluğu açısından üç fazlı şebeke bağlantılı olarak hazırlanmıştır. Z-kaynak eviricinin güç anahtarları olarak IGBT'ler seçilmiştir. Bu güç anahtarını sürmek için SDGM tekniği kullanılmıştır. Gerçekleştirilen modelin kapsamı:

- Z-kaynak evirici temelli FV sistemleri çeşitli gerçek uygulama öncesi ön bilgi ve maliyet tasarrufu sağlama,
- Mühendislik eğitiminde öğrencilere bilgisayar ortamında deney ortamı sağlama şeklindedir.

Bu tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde tez konusu hakkında giriş yapılmıştır. İkinci bölümde YEK'ler kısaca anlatılıp FV enerjinin gelişimi, FV hücre, FV hücre özellikleri, karakteristikleri, güç ilişkileri, FV verim, kayıpları ve bir FV sistemin birimleri incelenmiştir. Üçüncü bölümde geleneksel eviriciler özetlenmiştir. Ardından dördüncü bölümde Z-kaynak eviriciler ve devre topolojileri, Z-kaynak eşdeğer ve devre analizi detaylandırılmıştır. Beşinci bölümde şebeke bağlantılı Z-kaynak evirici temelli FV güç üretim sisteminin benzetim modeli MATLAB/Simulink ortamında hazırlanmıştır. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Altıncı bölümde ise sonuçlar değerlendirilerek ve ileriye yönelik önerilerde bulunulmuştur.

2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI VE FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

2.1. Yenilenebilir enerji kaynakları

Günümüzde kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlileri ve kullanım oranları şunlardır;

- Güneş enerjisi
- Rüzgâr enerjisi
- Biyoenerji
- Jeotermal enerji
- Hidroelektrik enerji
- Hidrojen enerjisi
- Dalga enerjisi
- Gel-git enerjisi

2.1.1 Güneş enerjisi

Kullanımı giderek artış gösteren güneş enerjisinin en önemli özellikleri temiz masrafsız ve sınırsız olmasıdır. Önceki yıllarda daha çok ısı enerjisi olarak kullanılan güneş teknolojinin gelişmesi ile başta elektrik enerjisi olmak üzere farklı alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Güneş panelleri veya FV panel aracılığıyla elektrik enerjisi elde edilmektedir. Dünyada güneş; güneş enerjisi ile çalışan arabalar, güneş ocakları ve güneş enerjisinde sıcak su elde etme gibi çok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Ayrıca güneş enerjisi dış kaynaklara bağımlı değildir ve her ülke kullanabilmektedir sadece tüm yıl boyunca kararlı değildir. Güneş enerjisi mevsimsel ya da gece-gündüz değişimine göre kesilmeler göstermektedir [2,16,17,18]. Tez konusu FV enerji üretim sistemi olduğundan bu konu Bölüm 2.2'den itibaren detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

2.1.2 Rüzgâr enerjisi

Güneş ışınlarının dünya üzerine düşme açısındaki farklılıklardan dolayı oluşan basınçlar ve dünyanın dönüş hareketine bağlı olarak oluşan rüzgârlardan elde edilen

enerjidir. Temiz ve yenilenebilen enerji kaynağı olan rüzgârdan günümüzde modern türbinler aracılığıyla elektrik enerjisi elde edilmektedir. Dünya rüzgâr enerjisi üretiminin %26'sına ABD tek başına sahiptir. İkinci sırada %22,4 ile Çin, üçüncü sırada ise %7,9 ile Almanya yer almaktadır [13,17,18].

2.1.3 Biyoenerji

Biyokütle enerjisi olarak adlandırılan bu enerji çeşidi doğal organik ürünlerden elde edilmektedir. Biyoenerji üretilirken bitki ve hayvan atıklarından faydalanılır. Başlıca biyoenerji kaynakları şunlardır; hayvansal atıklar, bitkisel atıklar, sanayi atıkları, bazı yağlı tohumlu bitkiler(ayçiçeği, kolza, soya fasulyesi vb), odun, elyaf bitkileri(keten, kenevir vb), karbonhidratlı bitkiler(patates, buğday, mısır vb). Dünyada Çin ve Hindistan'da biyogaz üretimi çok önemlidir. Çin'de insan ve hayvan atıklarının kullanıldığı yedi milyon biyogaz üretim ünitesi mevcuttur. Brezilya ise mısır ve şeker kamışından alkol elde etmekte, bu alkol ise motor yakıtı olarak kullanılmaktadır. Almanya ise kurdukları çöp santralinde saatte 70 ton çöp yakılarak enerji üretmektedir. Biyoetanol, biyodizel, piroliz ürünleri, mikrobiyal yakıt hücreleri ve biyogaz, son zamanlarda yaygınlaşan biyokütle enerjisi ile geliştirilen enerji kaynaklarıdır [17,18].

2.1.4 Jeotermal enerji

Yerkabuğunun derinliklerindeki fay hatlarından sıcak suyun veya buharın kendiliğinden ya da sondajlarla çıkartılmasıyla elde edilen enerjiye jeotermal enerji denir. Dünya üzerinde jeotermal enerji kapasitesinin 12.594 Megawatt civarında olduğu tahmin edilmektedir. Jeotermal enerjiden ısıtma, soğutma, elektrik üretimi ve mineral üretimi gibi farklı amaçlarla yararlanılmaktadır. Aynı zamanda bu enerji türü kaplıcalar yardımı ile turizm sektörüne de yardımcı olmaktadır [17,18].

2.1.5 Hidroelektrik enerji

Kaynağı su olan hidroelektrik enerjisinde akan suyun kinetik enerjisi türbin ve jeneratörler aracılığıyla elektrik enerjisine çevrilmektedir. Hidroelektrik santralleri termik santraller gibi çevreye zarar vermemektedirler sadece yapılacak alanın sular altında kalması

ile çevrede değişiklikler meydana gelmektedir. Dünyada elektrik üretiminin %16,3'ü hidroelektrik santralleri tarafından karşılanmaktadır [17,18].

2.1.6 Hidrojen enerjisi

Hidrojen enerjisi, doğada bileşikler şeklinde bulunan hidrojen gazının işlenmesi ve dönüştürülmesi ile elde edilen enerji kaynağıdır. Doğal enerji kaynağı değildir fakat sürdürülebilir ve alternatif enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Bünyesinde karbon içermediğı için zararlı gaz salınımı gibi tehlikesi yoktur. Temiz enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahip olan hidrojen enerjisi gelecekte özellikle otomobiller için önemli bir yakıt kaynağı olma niteliğindedir [17,18].

2.1.7 Dalga enerjisi

Dalga enerjisi, denizlerde oluşan rüzgâr hareketinden ve dalgaların oluşturduğu basınçtan elde edilen enerji türüdür. Dalga enerjisi suya yerleştirilen tribünlerle veya dalgaların kıyıya çarptıkları yerlerde kullanılan merceklerle elde edilir. Çevreye ve doğaya zararı olmayan dalga enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en az kullanılanıdır. Bütün dünyada dalgalardan 200 milyon ton taşkömürünün vereceğı enerjiye karşılık enerji elde edileceğı öngörülmektedir [17,18].

2.1.8 Gel-Git enerjisi

Gel-Git enerjisi Ay'ın hareketinden dolayı okyanuslardaki suyun alçak ve yüksek olduğu zamanlar arasındaki farktan doğan enerjidir. Rusya'da 400, Çin'de 10, Kanada'da 18 MWh enerji üreten tesisler mevcuttur. Bu santraller kuruluş aşamasında oluşan geçici de olsa hava, su ve toprağı kirliliğine sebep olmaktadır. Buna karşın santralin çevresindeki alanlarda tarımsal ve balıkçılık faaliyetleri gelişme göstermektedir [17,18].

2.2. FV Enerjinin gelişimi

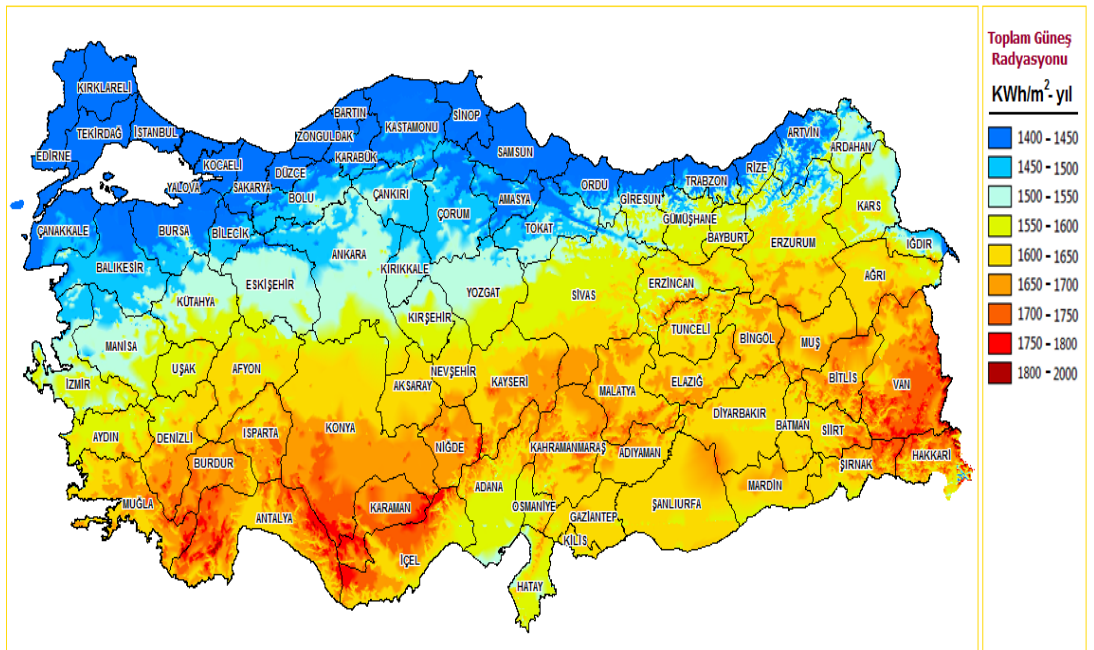
Günümüzde kullanılan fosil kaynaklı yakıtlar artan dünya nüfusu karşısında hızla tükenmektedir. Mevcut enerji kaynaklarının hızla tükenme eğilimi içine girmesi, hammadde

fıyatlarının artması, çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri ve kullanım alanlarındaki bir takım zorluklar son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde yapılan çalışmaları arttırmaktadır [1].

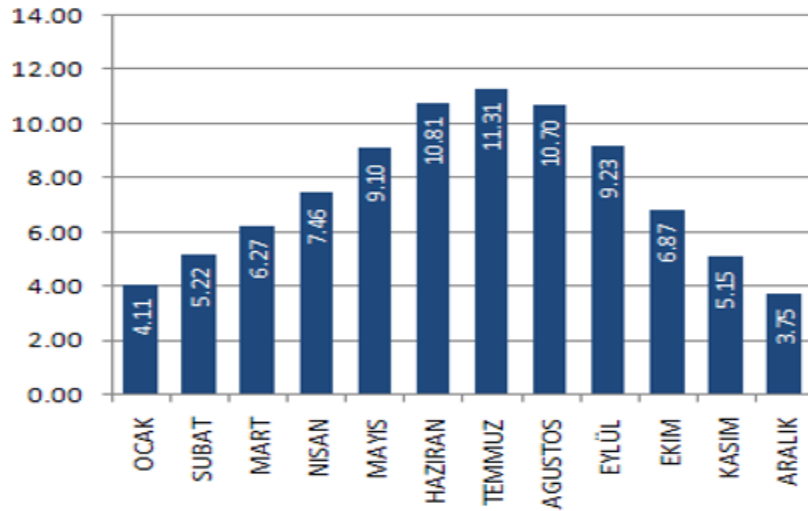
“FV etki” ilk olarak 1839 yılında Edmund Becquerel tarafından bulunmuştur [1]. William G. Adams ve Richard E. Day tarafından 1876 yılında silisyum kristalleri bulunmuştur. 1905'te ise FV etki tanımını yapan Albert Einstein 1921 yılında Nobel Ödülünü kazandırmıştır [16]. Ardından 1954'te ilk silikon güneş hücreleri Bell Laboratories tarafından üretilince FV enerji alternatif enerji çeşitleri arasındaki yerini almıştır [1, 16].

FV sistemlerin kullanımının yaygınlaşmasını sağlayan 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kanunu 29/12/2010 yılında revize edilmiş ve 2013'de mevzuat çalışmaları tamamlanmıştır. Son yıllarda FV sistemlerin maliyetlerin düşmesi ve verimliliğin artması ile de kullanımı hızla artış göstermiştir [19].

Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Elektrik İşleri Etüt (EİE) idaresi tarafından hazırlanan, Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına göre, yıllık toplam güneşlenme süresi 2737 saat (günlük toplam 7,5 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisi 1527 kWh/m²-yıl (günlük toplam 4,2 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir [19]. Şekil 2.1'de Güneş enerjisi potansiyel atlasına ait harita verilmiştir.



Şekil 2.1. Güneş enerjisi potansiyel atlası [20].



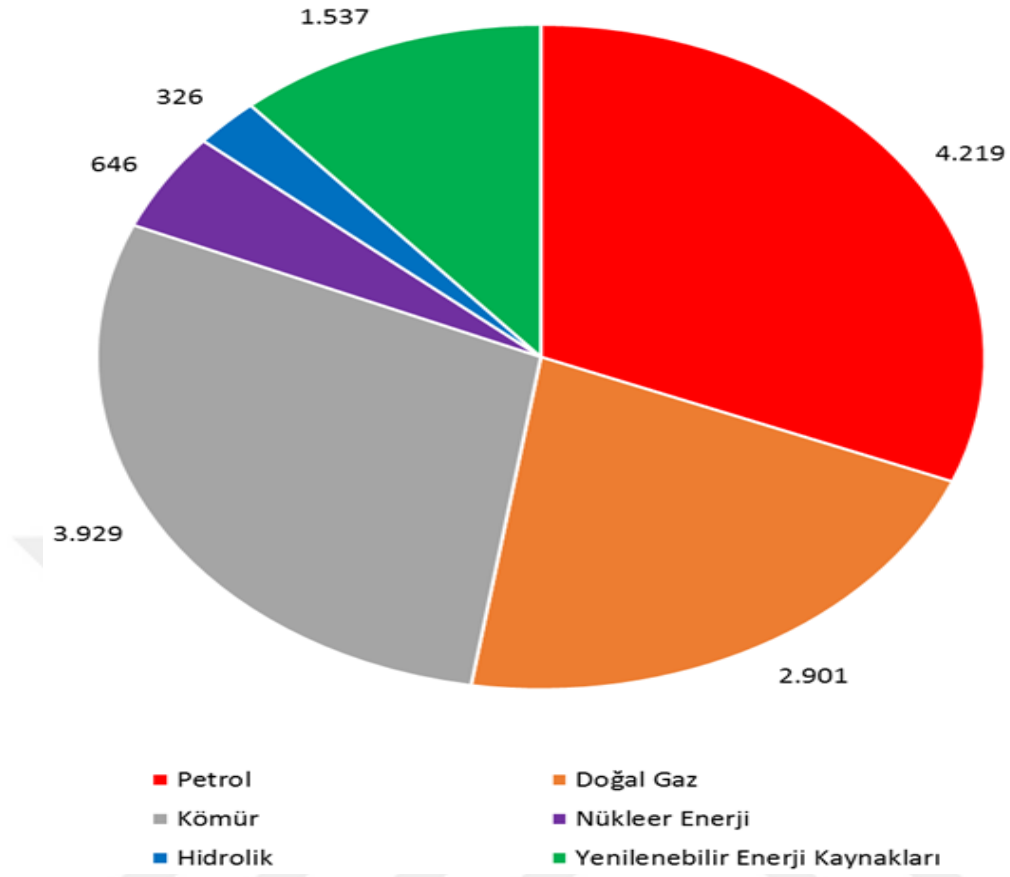
Şekil 2.2. Türkiye güneşlenme süreleri (saat bazında) [20].

Türkiye’de bölgelere göre güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süreleri dağılımı Tablo 2.1’de verilmiştir [16,19]. Şekil 2.1 ve Tablo 2.1’den görüldüğü gibi Türkiye’nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güneydoğu Anadolu Bölgesidir. İkinci sırada ise Akdeniz Bölgesi yer almaktadır [16,20]. Türkiye güneşlenme süreleri (saat bazında) ise Şekil 2.2’de verilmiştir [20]. Tüm bu verilere göre FV panellerinden elektrik üretimi ülkemizde hızla gelişim göstermesi beklenmektedir.

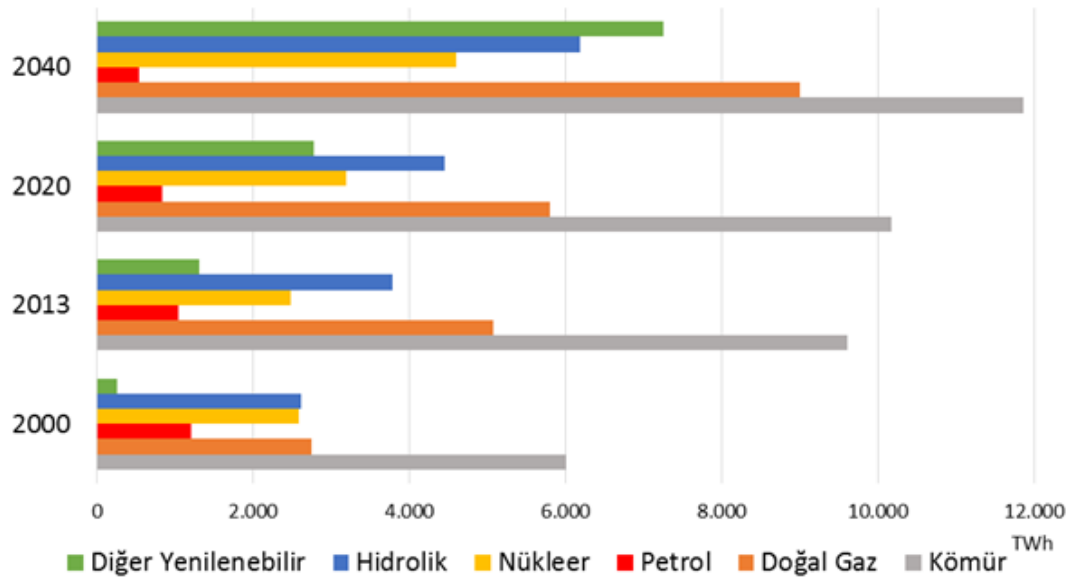
Tablo 2.1. Türkiye’de bölgelere göre güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süreleri dağılımı

Bölgeler	Toplam Güneş Enerjisi (kWh/m ² -yıl)	Güneşlenme Süresi (Saat/yıl)
Güneydoğu Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
Doğu Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

Günümüzde dünya genelinde kullanılan alternatif enerji kaynakları ve kullanım alanları Şekil 2.3’de gösterilmektedir. Şekil 2.4’de ise yeni politikalar senaryosu dikkate alındığında dünya elektrik üretiminde enerji kaynaklarının payları grafik olarak verilmiştir [17].



Şekil 2.3. Dünyada birincil enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımı-2013 [17].



Şekil 2.4. Yeni politikalar senaryosu dikkate alındığında dünya elektrik üretiminde enerji kaynaklarının payları (2000-2040) [17].

Şekil 2.3 dikkate alındığında dünyada yaygın olarak öncelikli petrol kömür ve doğalgaz gibi yenilenemeyen enerji kaynakları kullanılmaktadır. Dünya enerji tüketiminde YEK'ler dördüncü sırada yer almaktadır. Şekil 2.4'den görüleceği gibi 2000-2040 öngörü senaryosunda YEK'lere artan bir eğilim söz konusudur.

FV enerji her şeyden önce, temiz, çevreye ve canlılara zarar vermeyen, hiçbir atık içermeyen bir enerji üretim yöntemidir. Nükleer yakıtlara dayalı enerji üretim çeşitlerinin çevreye verdiği zararlar bellidir [1]. Hiçbir atığı bulunmayan rüzgâr santrallerinin bile kurulum aşamasında emniyet, görsel kirlilik, gürültü, vahşi yaşam ve doğal bitki örtüsü üzerine etkisi gibi kriterler dikkate alınmakta ve çoğu zaman bu kriterler yüzünden santrallerin kurulumundan vazgeçilmektedir. Çevre dostu olmasının yanı sıra FV sistemler, ihtiyaca göre ve istenilen yere monte edilebilir. İhtiyaç durumunda sisteme yeni FV modüller kısa sürede ve kolaylıkla monte edilebilir. Diğer enerji üretim kaynakları için bu avantajlar söz konusu değildir [2].

FV sistemlerin işletme ve bakım maliyetleri, diğer enerji üretim sistemlerine göre son derece düşük, hatta yok denecek kadar azdır. İşletme ve bakım maliyetlerini düşüren en önemli özellik rüzgâr jeneratörlerinde olduğu gibi hareketli parçaların olmayışıdır. Geçmişte FV santrallerin kurulum bütçesi diğerlerine nispeten fazla olduğu söylenebilir. Bundan dolayı çok fazla yaygınlaşamamıştır. Fakat günümüzde FV sistemler panel fiyatlarının düşmesi ve verimlerinin artması ile daha fazla yaygınlaşmaktadır. Maliyetin oldukça düşmesi, verimin artırılması, gelecek için yapılan çalışmalar ışığında FV sistemlerin daha ucuz ve daha verimli olacağını rahatlıkla ortaya koymaktadır. 1984-1994 arası dönemde FV endüstrisi % 30 yıl büyüme göstermiştir. Bu süre içinde verimlilik %70 ve güneş hücrelerin tahmini ömrü %50 artmıştır bu gelişmelerle birlikte maliyet %40 azalmıştır [16].

Ülkemizde de FV santrallerin sayısı her geçen gün artmaktadır. Güneş enerjisi konusunda büyük bir potansiyele sahip olan ülkemizde FV enerji santrali ilk olarak Trakya bölgesinde inşa edilmiştir. Lisanssız elektrik üretim santrallerinin kurulmasıyla birlikte 2016 yılı Eylül ayı sonu itibarıyla güneş enerjili santral sayısı 861 olarak görülürken bu santrallerin toplam kurulu gücü ise 660.2 MW'dir [19]. Şekil 2.5'de Türkiye'nin en büyük FV enerji santrali olan Konya Kızören güneş enerji santraline ait görsel bulunmaktadır [21].



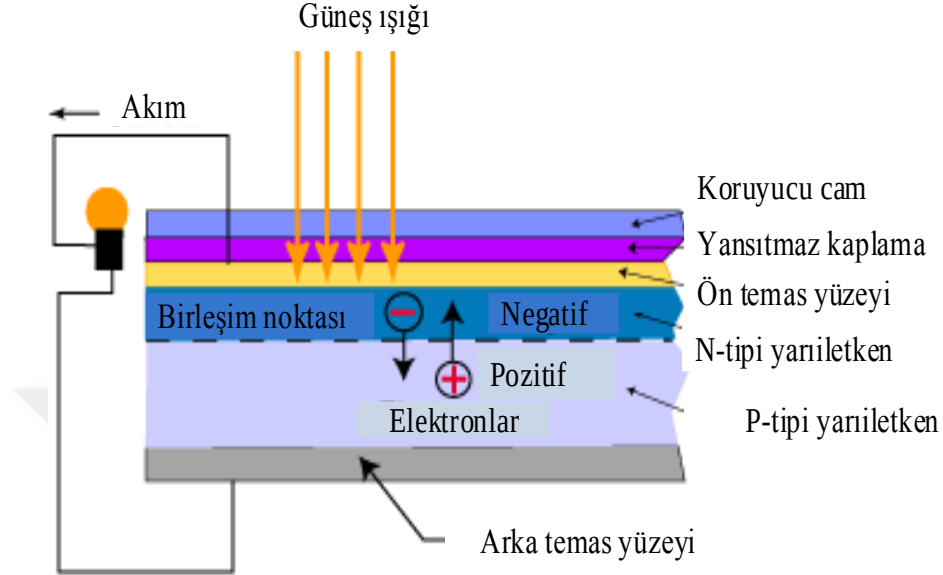
Şekil 2.5. Konya Kızören güneş enerji santrali [21].

2.3. FV hücre

Bir FV hücre ile bir P-N yüzey birleşmeli diyot arasında fiziksel özellikler bakımından pek fark bulunmamaktadır. Birleşme yüzeyi tarafından ışık absorbe edildiğinde, emilen fotonların enerjisi, malzemenin elektron sistemine aktarılır. Birleşme yüzeyinde mevcut olan yük taşıyıcıları, absorbe edilen enerji ile hareketlendirilir. Oluşan bu taşıyıcı hareketi, elektrik akımını meydana getirmektedir. Daha sonra oluşan bu akım, başka bir devreye iletilerek kullanılabilir. Bu sırada kalan bir takım foton enerjisi hücrelerin sıcaklığını artırır [2,14,15].

FV hücrenin yapısında, foto akımını başka bir devreye iletebilen metal temas yüzeyleri bulunmaktadır. Ön yüzeydeki yansıma engelleyici kaplama daha fazla ışık emilmesini sağlamaktadır. Böylece yansıma en aza indirilir. En üstteki koruyucu cam ise olası darbelere karşı koruma içindir. Güneş hücreleri son derece kırılgan olduğu için böyle bir koruma,

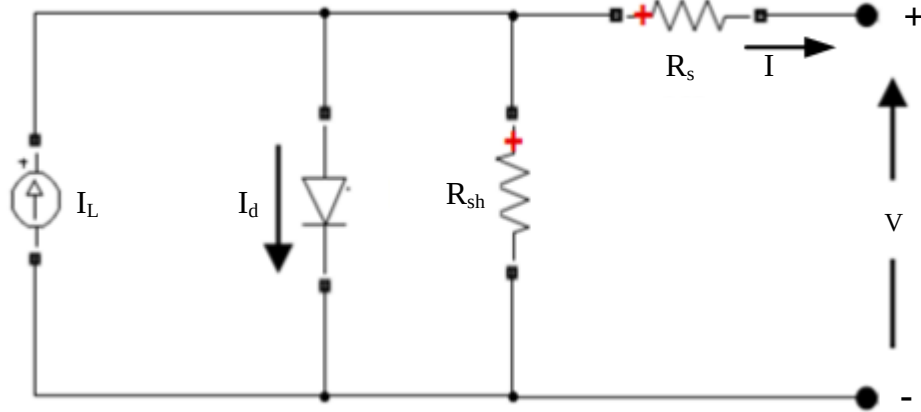
çatlama ve kırılmaları önlemek açısından gereklidir. Böylece güneş ışığından elde edilecek verim de artmaktadır [2,14,22]. Şekil 2.6’da bir FV hücrenin içyapısı görülmektedir.



Şekil 2.6. FV hücrenin içyapısı

2.3.1. FV hücre eşdeğer devresi

FV hücre eşdeğer devresi Şekil 2.7’de verilmiştir. Şekil 2.7’de I çıkış akımı, I_L ışığın ürettiği akımı, seri direnç R_S ise çıkış akımına karşı gösterilen iç direnci ifade etmektedir ve R_S değeri birleşme yüzeyinin yapısına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Paralel direnç R_{SH} sızıntı akımını temsil etmektedir. İdeal bir FV hücrede $R_S = 0$ ve $R_{SH} = \infty$ olarak kabul edilir. Gerçekte ise 1 in^2 ’lik kaliteli bir FV hücrede $R_S = 0.05 - 0.10 \Omega$ ve $R_{SH} = 200 - 300 \Omega$ civarındadır. R_S üstünde oluşabilecek herhangi küçük bir artış, çıkışı gerilimini önemli ölçüde azaltabilir. Bu yüzden ki FV enerjinin verimi R_S direncine duyarlıdır. Akımın sıfır ve gerilimin en yüksek olduğu nokta ise, açık devre gerilimi (V_{OC}) olarak adlandırılır. V_{OC} yükün devrede olmadığı durumda elde edilecek çıkış gerilim değerini vermektedir. Yük akımı sıfırken hücre gerilimi olan V , V_{OC} açık devre gerilimine eşittir [2,11,16].



Şekil 2.7. FV panel eşdeğer devresi [23].

$$V_{OC} = V + I \cdot R_{SH} \quad (2.1)$$

Diyot akımı ise I_d ;

(2.2)

Formülü ile ifade edilir. Denklem (2.2)'de

I_D : Diyot doyum akımı,

Q : Elektron yükü ($1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulombs),

A : Eğri uydurma katsayısı,

K : Boltzman sabiti ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Joule/ 0K),

T : Mutlak sıcaklık sabiti (0K)'dir.

Yük akımı I ;

(2.3)

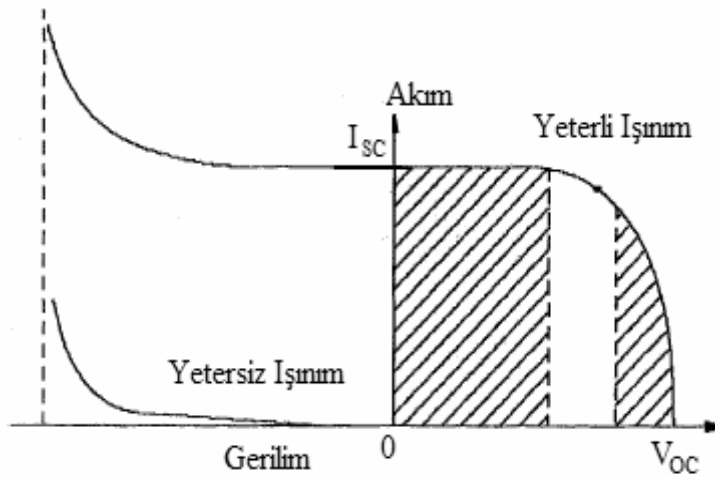
Denklem (2.3)'de son parametre olan sızıntı akımı (V_{OC}/R_{SH}) gerçek uygulamalarda I_L ve I_D 'ye göre küçük olduğundan ihmal edilir. Bu nedenle ışığın az olduğu ya da karanlık ortamlarda FV panel elektrik üretmez. Bu durumlarda hücrede diyotun doyum akımı ölçülür. Bu akıma ise karanlık akımı veya ters diyot akımı adı verilir [2, 16,24].

2.3.2. FV hücrenin I-V ve P-V karakteristikleri

Güneş panellerinin beş ana değeri vardır. Bu değerler ve sembolleri aşağıda verilmiştir:

- V_{oc} : Açık devre gerilimi
- I_{sc} : Kısa devre akımı
- P_m : Maksimum güç değeri
- V_m : Maksimum güç noktası gerilimi
- I_m : Maksimum güç noktası akımı [16].

Genel olarak bir FV hücrenin elektriksel karakteristiği I-V eğrisi ile gösterilir. Şekil 2.8’de bir FV hücrenin, yeterli ve yetersiz ışınım seviyeleri için elde edilen I-V eğrisi verilmiştir. Eğri incelendiğinde gerilimin sıfır, akımın maksimum olduğu noktada I_{sc} ’nin oluştuğu görülmektedir. Akımın sıfır, gerilimin maksimum olduğu noktada ise V_{oc} oluşmaktadır ve yükün devrede olmadığı durumda elde edilebilecek çıkış gerilim değeri verilmektedir. Taralı kısımdaki az miktardaki gerilim artışına karşılık akım büyük miktarda düşüş göstermektedir. Işınım seviyesi taralı bölgede iken FV hücre iç direnci olan bir sabit gerilim kaynağı gibi davranmaktadır. Taralı alanlar arasındaki boşluk ise hücreden çekilebilecek en fazla gücü göstermektedir [2,14,16].

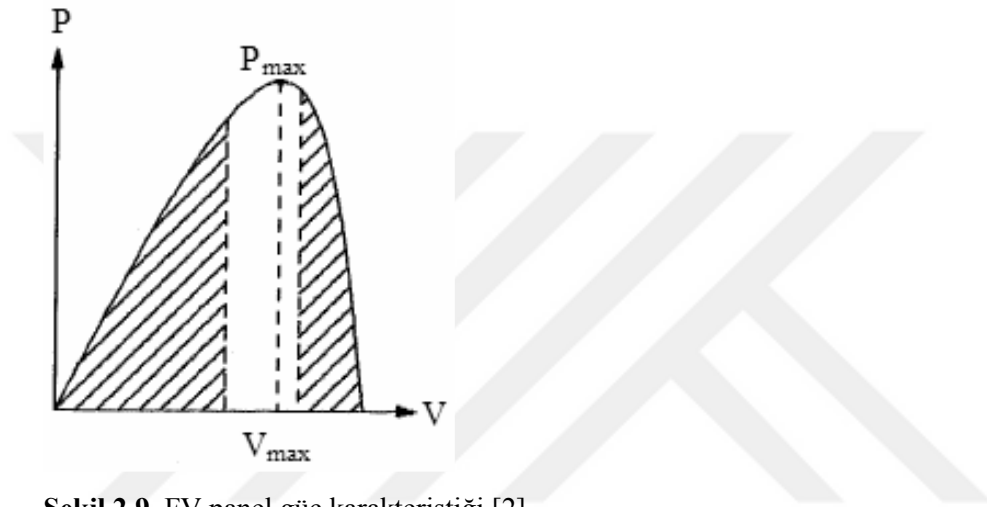


Şekil 2.8. Yeterli ve yetersiz ışık seviyeleri için I-V karakteristiği [2].

Sisteme dışarıdan ters yönlü bir gerilim uygulanması halinde birleşme yüzeyi bozulur ve hücre diyot özelliğini kaybeder. Buna bağlı olarak akım yükseliş gösterir. Aynı olay

yetersiz ışınlm seviyesinde gerçekleşirse akım sıfır değeriinde olurken, gerilim kırılma gerilimine yükselir [2, 16].

Şekil 2.9’da FV panele ait güç-gerilim ilişkisi verilmiştir. Bir FV panelin çıkış gücü çıkış akım ve gerilime bağlı olarak değışir. Yetersiz ışınlm seviyelerinde I-V karakteristiğinde akım ya da gerilim sıfır olduğunda güç de sıfır olur. Panelden en çok güç alınınca verim de en üst düzeyde olmaktadır. Bu sebeple FV sistemler panellerden en fazla güçü elde edecek şekilde tasarlanır [1-4,16].



Şekil 2.9. FV panel güç karakteristiği [2].

2.3.3. FV sistemlerin verimlilikleri

Aşağıda FV sistemlerin verimini etkileyen durumlar sıralanmıştır;

- FV sistem üzerindeki yansıma kayıpları,
- Toplama kayıpları,
- Foton enerjisinin tümünün elektron-hole çiftinin oluşturulmasında kullanılamaması,
- FV panelin kalınlığı,
- Tam olmayan soėurma,
- FV panelin eğim etkeni,
- FV panelin yüzeyinin kirlenmesi,
- FV panelin sıcaklığı,
- Sistemde bulunan iç dirençten doğan kayıplar

Tüm bu durumların önüne geçildiėinde sistemden maksimum düzeyde verim elde edilebilir [2,16].

2.3.4. FV sistem kayıpları

FV sistemler kayıplardan dolayı düşük verimle çalışmaktadır. Bu kısımda kayıpların nereden kaynaklandığı üstünde durulacaktır. FV sistemlerde oluşan kayıplar sırasıyla aşağıdaki gibidir [2].

2.3.4.1. Işıksal kayıplar

FV sistemlerde üretilen akım, üretilen azınlık taşıyıcıları ve soğurulan güneş ışığı fotonlarının sayısı ile belirlenir. Bu kayıplar, her kısımda gerçekleşen yansıma kayıpları ve ara yüzlerde oluşan dış soğrulma kayıpları olarak incelenir [2,22].

2.3.4.2. Elektriksel kayıplar

Toplanarak çoğunluk taşıyıcılarına dönüştürülemeyen azınlık taşıyıcıları, akım kayıplarını belirler. Ancak, açık devre geriliminin beklenen değerin altında olması ise gerilim kayıplarını belirler. Seri ve paralel dirençlerden kaynaklanan kayıplar ile zayıf diyot karakteristikleri elde edilecek akım ve gerilim değerini azaltır [2,4].

2.3.4.3. Akım kayıpları

FV sistemlerdeki azınlık taşıyıcı kaybı birçok yolla gerçekleşebilir. Işınım ile üretilen ve panel yüzeyine doğru yayılıma uğrayan taşıyıcılar, yüzey etkileri önlenmediğinde veya taşıyıcıların yüzeye ulaşmaları engellendiğinde yüzeyde kaybolur. Fakat yüzeyde bir oksit tabakası oluşturularak, yüzey koşullarının etkisi ve bundan kaynaklanan taşıyıcı kayıpları önlenmiş olur.

Yüzey yakınlarına yapılacak heterojen bir ekleme işlemi, yüzeyde bir elektrik alanı oluşturarak azınlık taşıyıcılarının yüzeyden uzaklaşmasına ve akım kayıplarının azaltılmasına yardımcı olur. Yapılan bu işlem sistemde % 0-5 arasında bir farklılık gösterir [1-4].

2.3.4.4. Açık devre gerilimi

Açık devre gerilimini kontrol eden ve etkileyen ek parametreler bant aralığı ve eklem P ve N kısımlarının karıştırılma seviyeleridir. Bu tür kayıplar %4 - %5 arasında değişir [1-4].

2.3.4.5. Direnç kayıpları

Seri direnç ve paralel iletkenlik FV sistemlerde istenmeyen bir durumdur. Paralel direncin değeri açık devre gerilimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. İdeal bir FV sistemde paralel direnç değeri sonsuza yakın olmalıdır. FV sistemlerde paralel iletkenlik ve seri direnç kayıpları %0 - %10 arasındadır [1,2].

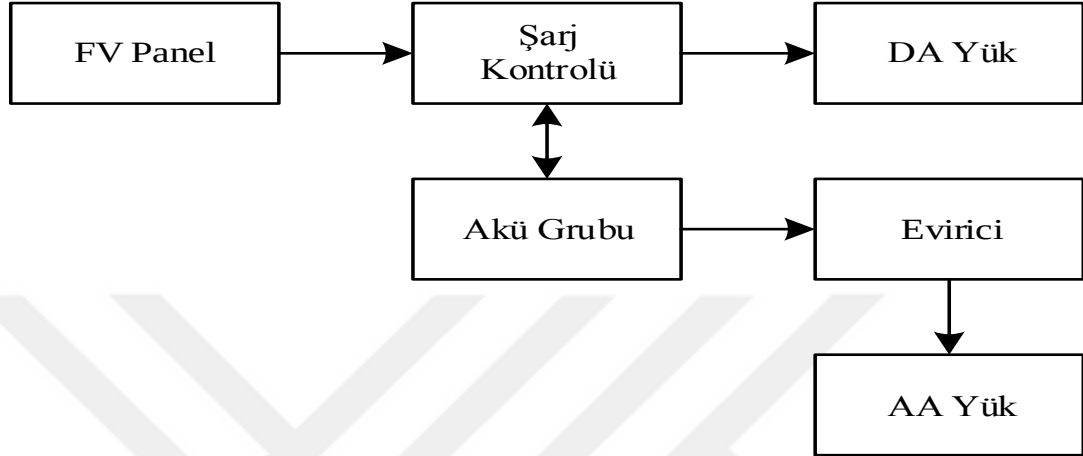
2.3.4.6. Verim kayıpları

FV sistemlerde maliyetin düşürülebilmesi akülerin ömrünün uzun olabilmesi ile mümkündür. Günümüzde FV sistemlerin ömrüne ilişkin belirsizlikler vardır. Fakat genel olarak %10 veya %20 arası verimde düşüş hedeflenir. Çıkış gücündeki azalmanın belli başlı birkaç nedeni vardır. Bu da panelin dış yüzeyinde güneş ışığını engelleyen toz ve kirlerin birikmesi gibi nedenlerle gerçekleşir [2, 4].

2.4. FV enerji üretim sistemleri

FV sistemler, güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirerek, AA ya da DA ile çalışan yükü beslerler. Sistem, FV paneller yardımıyla güneş enerjisini DA elektrik enerjisine çevirir. Buradan da DA ile çalışan yükler beslenir. Güneş ışınları kararlı ve sürekli değildir. Mevsimlere göre ve günün belirli saatlerine göre farklılıklar gösterir. Güneş ışınlarının, yükü beslemede yetersiz kaldığı zamanlar olabileceği gibi, sistemin ihtiyacından daha fazla olduğu zamanlarda oluşabilmektedir. İşte bu ihtiyaç fazlası elektrik enerjisi akülerde depolanabilir. Bu sayede güneş ışınlarının yetersiz olduğu zamanlarda yükün beslenmesi sırasında oluşabilecek kesinti kısmen veya tamamen engellenebilir. Fakat çalışması istenilen yük AA ile çalışıyor ise böyle durumlarda DA'yı AA'ya çevirecek bir evirici kullanmak gerekir [1-4].

Yerleşim yerlerinden uzak yerlerde bulunan elektrik yüklerinin beslenilmesi isteniyorsa kurulacak FV sistemler yerel şebekeden bağımsız olarak inşa edilir. Fakat yerel elektrik şebekesine yakın ise şebekeye elektrik enerjisi aktarabilecek şekilde de düzenlenebilir [9,16]. Şekil 2.10'da FV bir sistemin genel yapısı verilmiştir.



Şekil 2.10. FV sistemin genel yapısı

2.5. FV enerji üretim sistem birimleri

FV sistemler iklim koşulları, kişisel ihtiyaçlar, hava durumları, güç ihtiyaç tahminleri ve yerleşim yerleri gibi etkenlere bağlı olarak seçilebilecek çeşitli birimlerden oluşur. Sistemin temel elemanlarını belirleyen en önemli özellik işlevsellik ve işlemsel karakterleridir. Bir FV sistem genel olarak; [2,9,16].

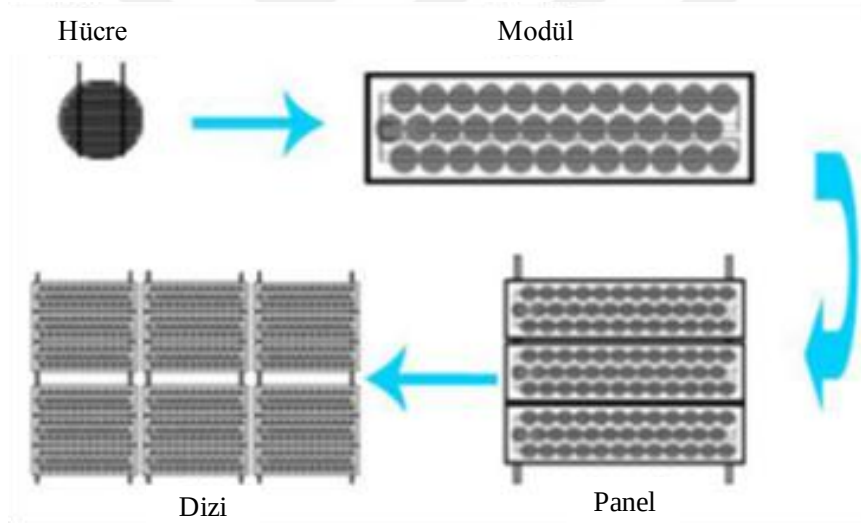
- FV paneller
- DA- AA eviriciler
- Yük
- Aküler
- Kontrol ve koruma elemanları

Olmak üzere beş ana bölümden oluşabilir. Bu bölümler aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

2.5.1. FV panel ve dizi

FV hücre, bir FV güç sisteminin temel birimidir. Bu hücreler solar hücre olarak adlandırılır. Solar hücreler, genellikle yarı iletken silikondan 100 cm^2 yüzey alanlı ve milimetreyle ifade edilebilecek kalınlıkta ince plakalar şeklinde üretilmektedir. Ayrıca yüksek güneş ışığı altında, bir solar hücre teorik olarak 0,5-3A' e kadar akım üretebilir. Üretilen bu akım, bir FV sistem için yeterli değildir. Bu yüzden daha yüksek güç elde edebilmek için çok sayıda solar hücre seri ya da paralel olarak bağlanır. Hücrelerin seri ya da paralel bağlanması ile elde edilen birime ise FV panel (modül) adı verilir [14,16].

Bazen çok sayıda sistem için panel gücünde yetersiz kalabilir o zaman ise paneller seri ya da paralel bağlanarak FV dizi elde edilerek gerekli güç sağlanmaya çalışılır. Şekil 2.11'de FV hücre, modül, panel ve dizi yapıları gösterilmiştir.



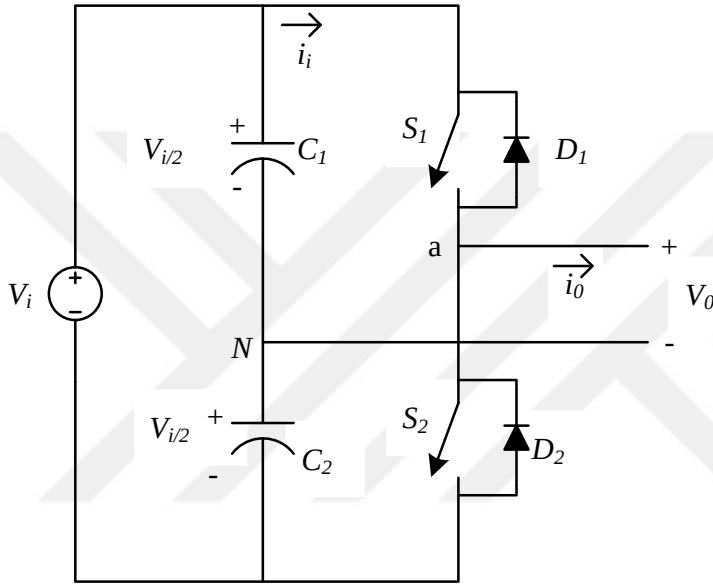
Şekil 2.11. FV hücre, modül, panel ve dizi yapısı [16].

2.5.2. DA-AA eviriciler

FV güç sistemlerinde sistem çıkışındaki DA enerji ile direkt olarak bir DA yük beslenebilir. Fakat kullanılan yük AA ile besleniyorsa bu durumda DA/AA dönüşümü yapabilen bir eviriciye ihtiyaç duyulur. Eviriciler FV enerji dönüşüm sistemlerinin ana bileşenlerinden biri olmakla beraber, panelden veya DA/DA dönüştürücünün çıkışından elde edilen DA'yı, AA'ya çevirirler. Bu sayede AA yükler ve AA şebeke iletim hattı kolaylıkla

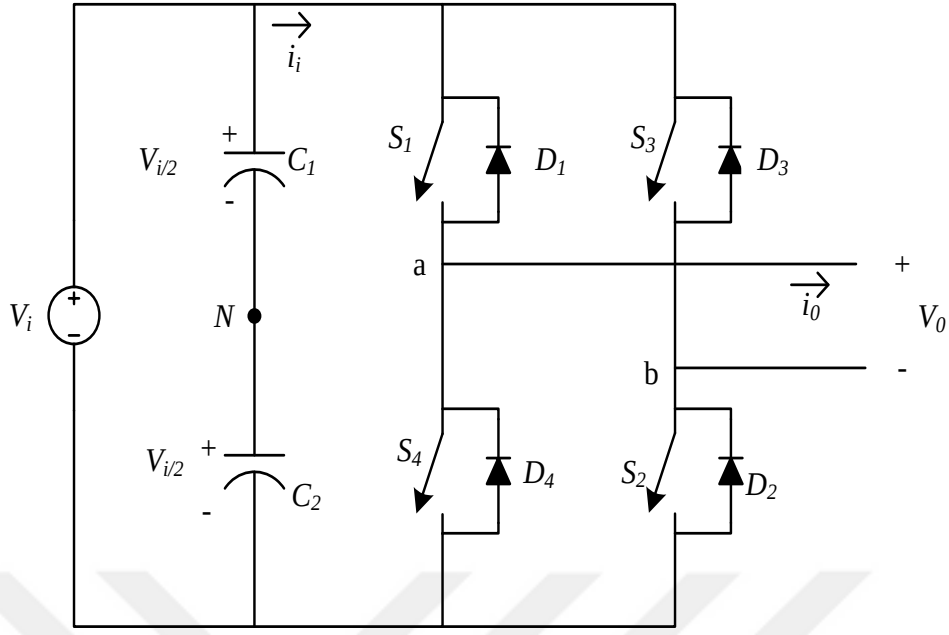
beslenebilmektedir. Eviriciler çalışma şekillerine göre iki guruba ayrılmaktadır. Bunlar; yarı kontrollü ve tam kontrollü eviriciler olarak adlandırılır [5,7,13].

Yarı kontrollü eviriciler, yarı iletken anahtarların kapama zamanlarını ayarlayabilen fakat açılma sürelerini kontrol edemeyen yapılardır. Yarı kontrollü eviricilerde tristör gibi anahtarlama elemanları kullanılır. Tristörün açılması akımın sıfıra düştüğü anda gerçekleşmeli ve bunu sağlamak için yardımcı devreler kullanılır. Şekil 2.12’de yarım köprü eviricinin devre şeması gösterilmiştir [5,12].



Şekil 2.12. Bir fazlı yarım köprü evirici [7].

Tam kontrollü eviricilerde ise, anahtarlama elemanı olarak IGBT ve MOSFET kullanılmaktadır. IGBT ve MOSFET’in açma kapatma durumları kolayca kontrol edilir. Tam kontrollü eviriciler yardımıyla AA tarafındaki akım ve gerilim dalga şekilleri kolay denetlenir, güç katsayıları ayarlanabilir ve harmonikler temizlenir. Tam kontrollü eviriciler parazitleri önlemede oldukça iyidir. FV sistemlerde ise tam kontrollü eviriciler yaygın olarak kullanılır. Şekil 2.13’de tam köprü evirici devre şeması gösterilmiştir [5,7].



Şekil 2.13. Bir fazlı tam köprü evirici

Tam kontrollü eviricilerin, gerilim kontrollü ve akım kontrollü olmak üzere iki çeşidi mevcuttur. Gerilim kontrollü eviriciler, teoride DA kısmında sabit genliğe sahip bir gerilim kaynağı bulunan, AA tarafında değişken genlik elde edilebilen bir sistemdir. Akım kontrollü eviriciler ise DA kısmında sabit genliğe sahip bir akım kaynağı bulunduran ve AA tarafında ise değişken genlik elde eden yapılardır. FV diziler bir gerilim kaynağı gibi davrandığından FV sistemlerde yaygın olarak gerilim kontrollü eviriciler kullanılır. Bu tarz eviriciler kontrol kısmı değiştirilerek AA kısmında hem akım hem de gerilim kaynağı gibi çalışırlar [12,13].

FV sistemlerde enerji miktarı mevsimsel ve gece-gündüz durumlarına göre değişiklik gösterir. Bu nedenle FV sistem uygulamalarında istenen aralıkta gerilim üretmek için DA-DA kıyıcılar kullanılmaktadır. Bu ise hedefe karşı düşük verimlilik, maliyet ve bileşen sayısının artmasına yol açmaktadır. Z-kaynak eviriciler tek bir aşamada gerilimi yükseltmek ve evirme yeteneğiyle FV sistemlerde kullanılması daha uygundur [1-16]. Eviriciler ve Z-kaynak eviriciler 3. bölümde daha ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

2.5.3. Aküler

Güneş ışınları kararlı ve sürekli olmadığından FV sistemlerinde yükü beslerken kesintiler olmaktadır. Bu nedenle yeterli veya ihtiyaçtan fazla ışık varken sistemden elde

edilen DA enerjisinin fazlasının depolanması gerekir. Bu sayede sistem, ışığın yeterli olmadığı zamanlarda depolanmış olan bu enerji kullanılır ve böylece kesintiler engellenebilir. Bu nedenle FV sisteminde kullanılacak enerji depolama aygıtı DA enerjiyi depolamaya ve talep edildiğinde kullanmaya izin verebilen bir yapıya sahip olmalıdır. Buna en uygun yapılar ise akülerdir [2,25].

Aküler; elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolayan ve gerektiğinde bu kimyasal enerjiyi tekrar elektrik enerjisine dönüştürebilen enerji depolama aygıtlarıdır. Elektrik enerjisinin kimyasal enerjiye dönüştürülmesi olayına şarj, kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi olayına ise deşarj denir. Yalnızca deşarj olan aküler primer akü (tek kullanımlık piller), hem şarj hem de deşarj olan aküler ise sekonder akü (şarj edilebilir piller) olarak adlandırılır.

Aküler, elektrik enerjisini en verimli şekilde başka enerji türlerine dönüştürürler. Bu nedenle de çok fazla talep edilirler. Örnek olarak %100'e yakın bir verimle mekanik enerjiye, %100'e yakın verimle ısı enerjisine dönüştürebilirler. Aküler, Kesintisiz Güç Kaynağı (KGK) sisteminde yedek güç kaynağı olarak da kullanılır. FV panelin giriş gerilimi ve frekansı normal çalışma koşullarındayken şarj edilir (normal mod), ışınımın yetersiz ya da karanlık olduğu durumlarda ise deşarj olmaya (akü mod) başlar [25,26].

Akü, güneş ışınlarının kesintilerinde kullanılacak ise tekrar-tekrar kullanılabilen bir tür olmalıdır. Tekrar doldurulabilen aküler yapı olarak 6 çeşittir. Bunlar;

- Kurşun –Asit (Pb- Acid)
- Nikel- Kadmiyum (NiCd)
- Nikel- Metal Hidrür (NiMH)
- Lityum-İyon (Li-İon)
- Lityum- Polimer
- Çinko-Hava akülerdir.

Kurşun–asit yapılı aküler, bir veya birden çok hücreden meydana gelen; hücresinde bir elektrolit ve bir pozitif bir diğeri negatif olmak üzere iki adet de elektrot bulunur. Enerji kimyasal olarak bu elektrotlarda depo edilir. Akü başta bir yüke bağlandığında elektrolit üstünden elektrotlar arasında bir etkileşim gerçekleşir ve kimyasal enerji elektrik enerjisine çevrilir. Pozitif elektrottan yüke oradan da negatif elektroda geçecek şekilde bir akım oluşur.

Bu aküler, hafiflik, dayanıklılık, küçük boyutluluk, düşük enerji yoğunluğu ve tekrar doldurulabilen aküler arasında en çok kullanılanlardır [25,26].

Nikel-kadmiyum aküler, kadmiyumdan oluşan pozitif elektrot ve nikel hidroksitten oluşan negatif elektrotları bulunan hücrelerden oluşur. Elektrotlar naylon ayırıcılar yardımıyla birbirinden ayrılmış olup paslanmaz çelik bir kutu içindeki potasyum-hidroksit elektroliti içinde yer alır. Kurşun-asit akülerin yarı ağırlığındadır. Bu yüzden tüketici amaçlı olarak çok yaygın olarak kullanılır. Dayanıklı ve kurşun-asit akülere göre daha iyi sıcaklık değerine sahiptir. Fakat kurşun-asit yapılara göre daha pahalıdır [25,26].

Nikel-metal hidrür aküler, nikel-kadmiyumun içindeki enerji yoğunluğunun artırılması hedeflenip nikel-kadmiyumdan türetilmiştir. En temel farkı içindeki anot elemanının metal hidrürden yapılmış olmasıdır. Bu yolla kadmiyumun çevresel değişkenlere bağımlılığının önüne geçilmiş olur. Fakat yüksek kapasiteli ani güç isteyen yapılarda zayıf kalmaktadır. Ayrıca kendi kendine boşalma dezavantaj oluşturmaktadır ve aşırı yüklenmelerde çabuk bozulabilir [2,25].

Lityum-iyon yapılı aküler, yeni üretilmeye başlanmış bir yapıdır. Kurşun-asit yapılı akülerden üç kat daha fazla enerji yoğunluğuna sahiptir. Diğer akülere göre yüksek hücre gerilimine sahiptir. Seri bağlı birkaç hücre ile istenen gerilim elde edilebilir ve ucuzdur. Lityumda oluşan negatif elektrot sıvı elektrolit ile tepkime oluşturarak, pasif bir tabaka oluşturur. Hücre boş olarak şarj edildiğinde lityumun oluşturduğu tabaka soyularak elektrolit üzerinde başka bir tabaka oluşmasına ortam hazırlanır. Ayrıca dayanıklılık süresini uzatmak için kalın elektrotlar kullanılmıştır. Fakat bu özellikten dolayı nikel-kadmiyum yapılı akülere göre pahalılık arz eder [25,26].

Lityum-polimer aküler, lityum akülerin katı polimer elektrolitli yapılarından oluşmuştur. Katı polimer ince bir yüzey olarak metal lityum tabakası içerisine yerleştirilmiş bu sayede katı polimer hem ayırıcı hem de elektrolit olarak tepki vererek hücrenin enerjisini arttırılmıştır [25].

Çinko-hava aküler ise, negatif elektrot çinkodan, pozitif elektrot havaya maruz bırakılmış karbondan; elektrolit ise potasyum hidroksitten imal edilmiştir. Boşaltma sırasında havadaki oksijen karbon elektrotu azaltır ve çinko elektrolit oksitlenmeye başlar. Dolu sırasında oksijen oluşturulur. Bu çeşit akülerde havanın verimli olarak kullanılması gerekmektedir [2, 25,26].

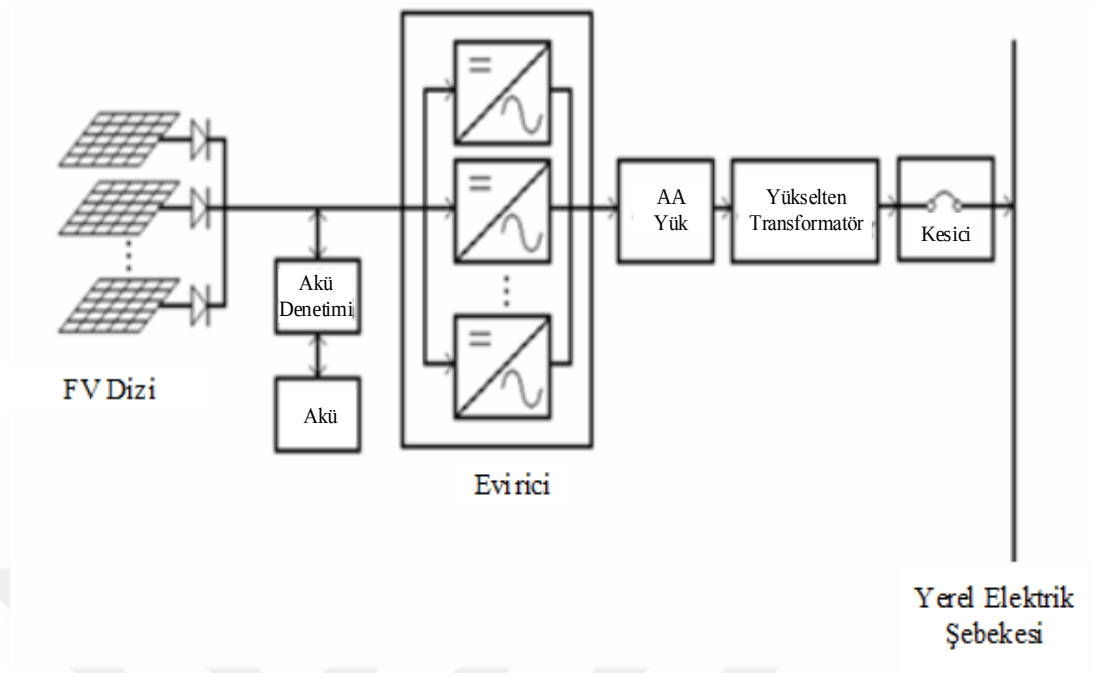
2.6. FV sistem tipleri

FV sistemler, ihtiyaç duyulan enerji miktarı, maliyet, yerleşim alanındaki konumu gibi nedenlerden dolayı farklı yapılarda oluşturulabilir. FV sistemler genel olarak üç gruba ayrılır.

- Şebeke bağlantılı FV sistemler
- Şebekeden bağımsız FV sistemler
- Karma yapıli FV sistemler (Hybrid sistemler) [2,16].

2.6.1. Şebeke bağlantılı FV sistemler

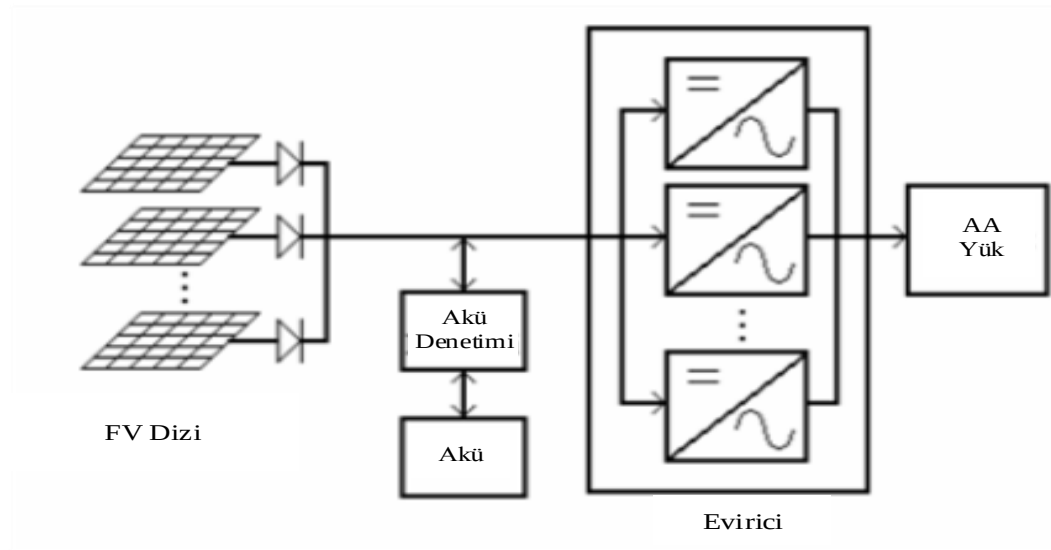
Bu sistemler “grid-connected” olarak da adlandırılmaktadır. Güneş ışınımı yeterli miktarda ve kurulum alanı yerel şebekeye yakın noktalarda ihtiyaç fazlası olan enerjiyi şebekeye aktaran sistemler olarak tasarlanır. Ayrıca şebekede enerji fazlalığı olduğu durumlarda fazla olan bu enerjiyi üzerine çekerek depolar. FV gücün yetersiz veya gece olduğu durumda tamamen veya kısmen yükler şebeke tarafından beslenir [9]. Dünyanın çeşitli yerlerinde elektrik dağıtım şirketleri bu uygulamayı desteklemektedir. FV sistemler, şebekeden bağımsız sistemlerden şebekeye bağlantılı sistemlere dönüştürülmeye çok elverişlidir. Fakat bütün sistemlerde olduğu gibi FV sistemlerinde de maliyet ve verim konularına dikkat edilmelidir. Şebeke bağlantılı FV sistem uygulamalarının bazı avantajları şunlardır: FV panel maliyetlerindeki azalma, çevre kirliliği oluşturmaması, AA yükleri besleyebilme yeteneği, FV sistemden şebekeye aktif güç aktarabilme yeteneği ve depolama gereksiniminin olmayışıdır. Şekil 2.14’de şebeke bağlantılı sistemlerin blok diyagramı görülmektedir [2,9,27].



Şekil 2.14. Tipik bir şebeke bağlantılı FV sistemin blok şeması [2].

2.6.2. Şebekeden bağımsız FV sistemler

Bu tür sistemler, yerel şebekeden uzak olduklarından hat bağlantısı hem zor hem de pahalı olmaktadır. Güneş ışığı gün içinde ve mevsim şartlarına göre sürekli ve kararlı olmadığından ihtiyaç fazlası enerji depolanmalıdır. Depolanan enerji ise yetersiz ışık durumlarında kullanılabilir [2,9,16]. Şekil 2.15’de standart bir şebekeden bağımsız bir FV sistem görülmektedir.



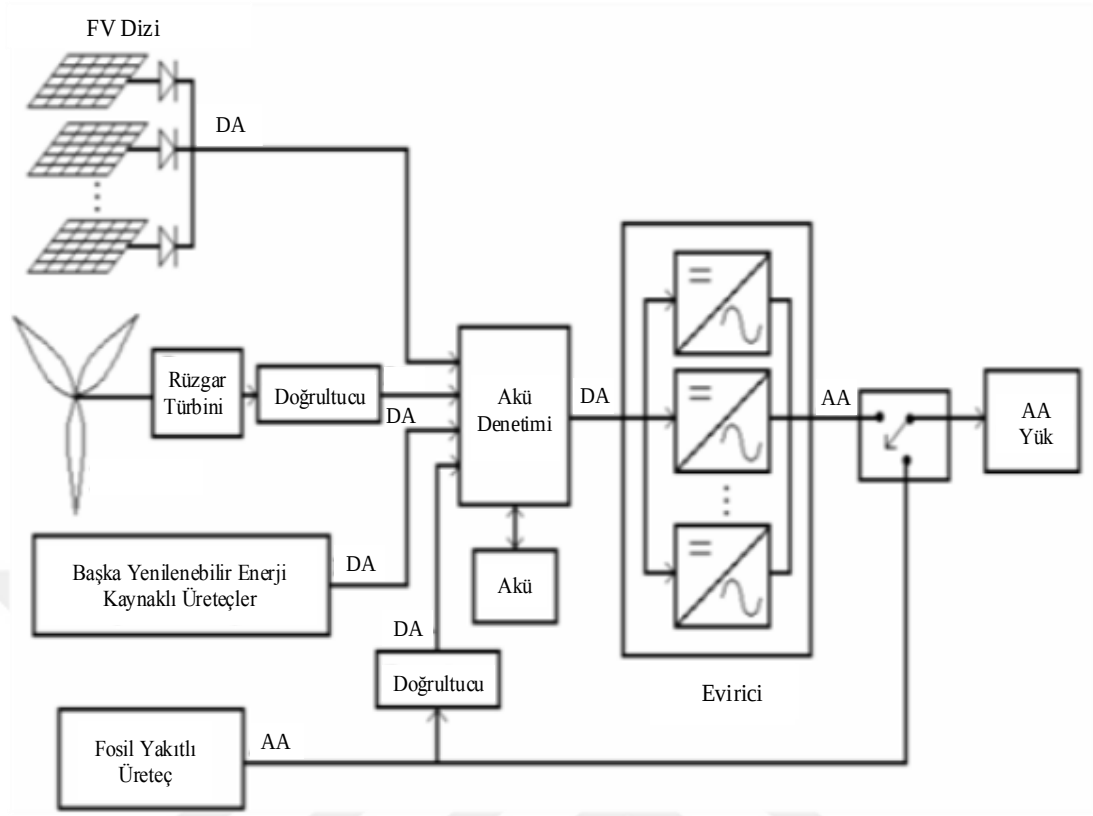
Şekil 2.15. Şebekeden bağımsız FV sistem blok şeması [2].

Bu sistemler; FV diziler, aküler ve eviricilerden oluşur. Güneş ışığının yeterli olduğu sürelerde sistemden hem yük beslenir hem de akü şarj edilir. Işığın yetersiz olduğu durumlarda ise FV diziden gelen enerji yükü besleyemediğinden aküdeki enerji ile yük beslenebilir. Sistemdeki evirici, FV dizi ve akülerden aldığı akımı 50-60Hz AA'ya dönüştürür. Günümüzde %85-95'e kadar verim ve büyük güç kapasitelerine sahip eviriciler bulunmaktadır [8,10,16].

Herhangi bir sebeple dizilerden birinin bozulması, diğerlerinin de bozulmasına neden olabilir. Bu durumdan akü ve eviricide etkilenebilir. Bu tür olumsuzlukları ortadan kaldırmak için, FV diziler birer yalıtım diyotu ile birbirinden ayrılmıştır. Ayrıca evirici kısmında ortak çalışan birden çok evirici olarak da tasarlanabilir. Bu sayede eviricilerden biri bozulduğunda yükün enerjisi kesilmemiş olur. Arızalı parçanın yenilenmesi veya değiştirilmesi için gerekli zaman süresince yük diğer eviriciler sayesinde çalışmasını sürdürebilir. Aynı tasarım aküler için de yapılabilir [9,10,16].

2.6.3. Karma yapılı (Hybrid) FV sistemler

Karma Yapılı (Hybrid) sistemler birkaç çeşit elektrik üreticinin bir araya gelmesinden oluşur. FV sistemlere ek olarak rüzgâr türbinleri, biyogaz üreteçleri, su kaynaklı üreteçler, ısı üreteçler veya fosil yakıtlı üreteçler ilave edilebilir. Şekil 2.16'da karma sistemlerin blok şeması görülmektedir. Bu çeşit sistemlerde akü kontrolü tamamen bağımsız FV sistemlerdeki gibi gerçekleştirilir [2,10,16]. Eğer karma sistem, istendiğinde sistemi besleyecek bir güç üreticisine sahip ise durum değişir. Genel olarak sistemi besleyecek güç üreteçleri için fosil yakıtla çalışan üreteçler kullanılır. FV sistemin yükü besleyemediği durumlarda bu tarz üreteçler devreye girerek sistemin yük üstündeki kayıplarını sıfıra düşürür [6]. Fakat farklı elektrik üreteçleri farklı seviyelerde DA ürettiğinden şarj sırasında akülere zarar verebilirler veya ömrünü kısaltabilirler. Bunu engellemek için akü denetimini iyi yapmak gerekir. Ayrıca sistemde fosil yakıtlı bir üreteç bulunması halinde bakım ve yakıt maliyetlerini düşürmek için gerekli düzenlemeler yapılmalıdır.



Şekil 2.16. Tipik bir hibrit FV sistem [2].

3. EVİRİCİLER

Eviriciler, DA bir kaynaktan yüke değişken frekans ve genlikte AA sağlayan güç elektroniği devreleridir [28]. Çıkışta elde edilen AA dalga şekli için; genlik, frekans ve faz gibi parametreler kontrol edilebilir olmalıdır. Evirici devrelerinde asıl hedef; istenilen frekans ve genlikte alternatif gerilim üretmek ve bunun yanı sıra düşük harmonikler elde etmektir. Harmonikler, elektrik sistemlerinde büyük problemlere sebep olmaktadır. Harmonikler ya kaynağa ya da yüke bağlı olarak oluşur. Ayrıca harmonikler gerilim kaynaklı ya da akım kaynaklı olmak üzere iki çeşide ayrılır. Bu harmonikler AA motor sürücü devrelerinde güç kayıplarına, elektromanyetik sistemlerde titreşime, enerji iletim ve dağıtım kayıplarına, darbeli tork oluşumlarına, mikroişlemcinin hatalı çalışmasına neden olurlar. Bu kayıpları engellemek için ise eviriciler kullanılmaktadır [7,28].

Eviriciler endüstriyel alanlarda;

- Kesintisiz güç kaynakları (KGK),
- Değişken hızlı asenkron motor sürücü devreleri,
- İndüksiyonla ısıtma sistemleri,
- Yüksek gerilimde doğru akım iletim sistemleri,
- AA gerilim regülatörleri

gibi alanlarda kullanılır [28].

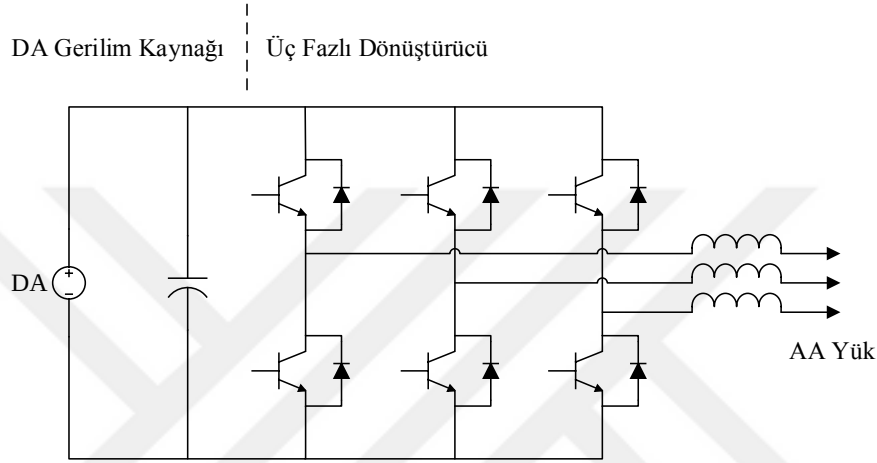
Geleneksel eviricilerin çıkış dalga şeklinin sinüzoidal olması beklenir. Ancak oluşan harmoniklerden dolayı dalga şekli sinüzoidal olmamaktadır. Düşük ve orta güçlü uygulamalarda kare dalga veya basamaklı kare dalga biçimindeki gerilim dalga şekilleri çıkış olarak kabul edilebilir. Fakat büyük güçlü uygulamalarda mümkün olduğu kadar bozukluğu az sinüzoidal bir dalga biçimi gerekmektedir [12].

3.1. Evirici çeşitleri

Eviriciler besleme kaynaklarına göre Gerilim Kaynaklı Eviriciler (GKE) ve Akım Kaynaklı Eviriciler (AKE) olarak iki kısma ayrılır [7,12,28].

3.1.1. Gerilim kaynaklı eviriciler

Piyasadaki eviricilerin yaklaşık %90'ını gerilim kaynaklı eviriciler oluşturur. Bu eviricileri besleyen kaynaklar gerilim kaynaklarıdır. Yük harmonik akımlara yüksek empedans gösteriyorsa bu yükün gerilim beslemeli bir evirici ile sürülmesi gereklidir. Bu eviricilerde giriş empedansı çok küçük ve çıkış geriliminin dalga şekli tamamen yükten bağımsızdır [12,28].



Şekil 3.1. Gerilim kaynaklı evirici

Şekil 3.1'da 3 fazlı gerilim beslemeli dönüştürücü gösterilmektedir. Değeri çok büyük bir kondansatör ile desteklenen DA güç kaynağı, 3 fazlı köprü dönüştürücü devresini beslemektedir. Bu tür güç kaynakları, bir pil gurubu, yakıt pili modülü, diyotlu doğrultucu veya bir kondansatör olabilir. Devrede 6 adet anahtarlama elemanı mevcut olup, her biri bir transistör ve ona ters paralel bağlanmış olan diyottan oluşmaktadır. Bu sayede çift yönlü akım akışı sağlamakla beraber tek yönlü olarak gerilim tutma gerçekleştirilir. En çok gerilim kontrollü dönüştürücü kullanılmaktadır [4,5].

Ayrıca GKE'ler kavramsal ve teorik bazı sınırlılıklara sahiptir. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- Geleneksel dönüştürücülerde; AA çıkış gerilimi, DA giriş geriliminden küçük olmalı veya DA giriş gerilimi, AA giriş geriliminden daha büyük olmalıdır. Dolayısıyla gerilim kontrollü dönüştürücü, DA-AA dönüşümü için düşürücü, AA-DA dönüşümü için yükseltici görevi görmektedir. DA giriş gerilimi istenilen yükseklikte değilse; istenilen AA çıkış için

devreye bir DA-DA yükseltici dönüştürücü ilave edilir. Eklenen dönüştürücü gücü arttırmakla beraber maliyeti yükseltir aynı zamanda da verimin düşmesine neden olur [4,5].

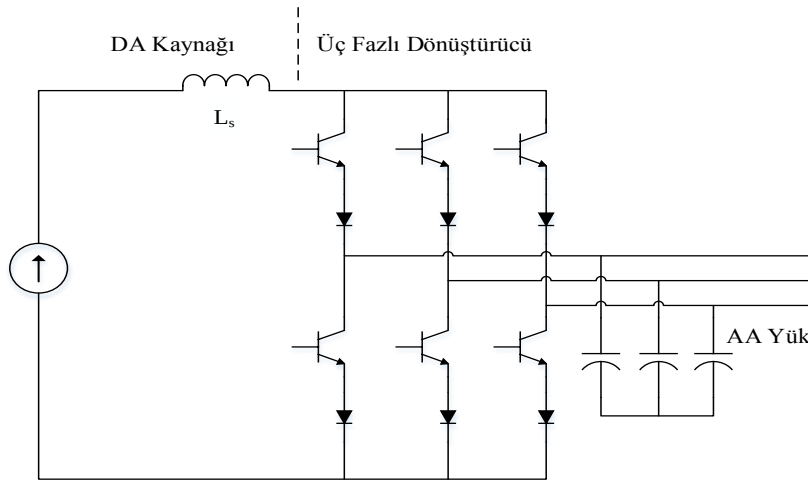
- Dönüştürücüdeki her bir faz kolunda bulunan üst ve alt sıra güç elemanlarına bazen yanlışlıkla, bazen ise Elektromanyetik Girişim (EMG) gürültüsünden kaynaklı oluşabilecek bir anahtarlama sinyali verilmemelidir. Aksi takdirde faz kolunda kısa devre olup elemanların zarar görmesine neden olur [4,5]. EMG gürültüsünden kaynaklı yanlış anahtarlama sinyallerinden oluşan kısa devre problemleri sistemin güvenilirliğini etkiler.

- Ayrıca gerilim kontrollü eviricilerde zorunlu olarak üst ve alt sıra elemanlarının anahtarlama sinyalleri arasına konulan ölü zaman ise dalga şekillerinde bozulmaya neden olmaktadır [4,5].

3.1.2. Akım kaynaklı eviriciler (AKE)

Bu tür eviriciler akım kaynaklarından beslenir. AKE'ler çok büyük güçlerde tercih edilirler. Fakat yükün harmonik akımlara düşük empedans gösteren bir özelliği varsa bu yükün akım kaynaklı bir evirici ile sürülmesi daha uygun olacaktır. Akım kaynaklı çeviricilere kaynaktan çekilen akımın değerinin sabit kalması için değeri oldukça yüksek bir indüktans (L) bağlanmalıdır. Devrede öncelikle giriş gerilimi doğrultulur daha sonra ise seri bir indüktans üzerinde sabit bir akım kaynağı oluşturularak DA akım beslemesi yapılır [16].

Akım kontrollü dönüştürücülerde çıkışta sinüzoidal sinyal elde edilebilmek için çıkış kısmına LC filtre ilave edilmelidir. Fakat bu ise sistemde güç kaybına ve karmaşıklığa sebep olur. Aşağıda 3 fazlı akım kontrollü dönüştürücü yapısı gösterilmektedir [5,12].



Şekil 3.2. Geleneksel akım kontrollü evirici

Bu dönüştürücü yapısında DA kaynak, 3 fazlı köprü yapısındaki ana dönüştürücü katını besler. Bu DA kaynak; pil, yakıt pili, diyotlu doğrultucu ya da tristörlü dönüştürücü gibi güç kaynağından beslenen yüksek değere sahip bir DA indüktans olabilir. Devrede 6 adet anahtar bulunmaktadır. Her biri ters yönde gerilim tutma özelliğine sahip GTO, SCR ya da bir güç transistörü ile bu elemanlara seri bağlı, tek yönlü akım akışını ve çift yönlü gerilim tutma özelliğini sağlayan diyotlardan oluşur [4,5]. Bununla beraber bu dönüştürücüde teorik olarak bir takım engel ve kısıtlamalar bulunmaktadır. Bunlar;

- Akım kontrollü dönüştürücülerde; AA çıkış gerilimi, DA indüktansı besleyen DA gerilimden daha büyük değerde olmalıdır veya üretilen DA gerilim daima AA giriş geriliminden küçük olmalıdır. Dolayısıyla akım kontrollü dönüştürücü, DA-AA dönüşümlerde yükseltici, AA-DA dönüşümlerde ise düşürücü evirici görevi görür [4,5].

- Geniş bir gerilim aralığı istendiğinde sisteme DA-DA düşürücü dönüştürücü eklenmesi gerekir. Eklenen bu dönüştürücü katı sistemin maliyetini arttırır aynı zamanda verimini de düşürür [4,5].

- Akım kaynaklı eviricilerde üst ve alt sıra elemanlar aynı anda iletme girerek çalışmaktadır. Aksi halde bir açık devre oluşur ve elemanlar zarar görür. Ayrıca EMG gürültüsünden dolayı oluşabilecek yanlış anahtarlama sinyalleri sistemin güvenilirliğini zedelemektedir [4,5].

Akım kontrollü dönüştürücülerde, ters gerilimi engellemek için kullanılan diyotlar, IGBT ve Akıllı Güç Modül'lerin (AGM) kullanılmasını engeller.

3.2. Evirici devrelerinde kullanılan anahtarlar

Evirici devrelerinde anahtar olarak genellikle; transistör, tristör, MOSFET, IGBT, GTO elemanları kullanılmaktadır. Transistör ve MOSFET genellikle düşük ve orta güçte olan uygulamalarda kullanılır. MOSFET hızlı anahtarlama özelliğinden dolayı yüksek frekanslı uygulamalarda da kullanılmaktadır. Tristör ve GTO anahtarlama hızları düşük olduğundan büyük güçlü uygulamalarda kullanılmaktadır [16,28].

IGBT (**Insulated Gate Bipolar Transistor**; - İzole edilmiş kapılı, iki kutuplu transistör) ise, MOSFET ve transistor ün en iyi özellikleri birleştirilerek tasarlanan bir elemandır. 4 katmandan (**P-N-P-N**) oluşur ve metal oksit yarı iletken (**MOS**) ile kontrol edilir. Günümüzde neredeyse tüm eviricilerde IGBT elemanı kullanılır [28].

3.3. Evirici çıkışının kontrol edilmesi

Eviriciler, DA-AA dönüştürücü olduğu için çıkışı alternatif bir dalga olacaktır. Çıkış alternatif dalga olduğunda ise frekans terimi ortaya çıkar. Yarım dalga ve tam dalga eviricilerin çıkışı kare dalga veya sözde kare dalgadır. Bu dalga şekilleri ise büyük oranda harmoniğe sahiptir. Küçük güçte olan sistemlerde bu dalga şekilleri çıkış olarak kabul edilebilir. Fakat büyük güçte olan sistemlerde mümkün olduğu kadar bozukluğu az olan çıkış dalga şekli istenir [28, 29].

Kısaca bir eviricinin çıkış dalga şeklinin hem genliğinin hem de frekansının ayarlanabilir, ayrıca sinüse yakın olması gerekir. Eviricinin çıkış geriliminin genlik ve frekansının kontrolü üç şekilde yapılır. Bunlar;

- Eviricinin çıkışı ile AA yük arasına AA gerilim denetleyicisi yerleştirmek,
- Kaynak ile evirici giriş uçları arasına, eviriciye giriş olarak verilen DA gerilimi denetleyecek bir devre kullanmak,
- Denetimi evirici içinde yapmak.

Birinci yöntem nadiren kullanılır. İkinci yöntem ise eviriciden önce ya kontrolsüz bir doğrultucu ile sabit bir dc gerilim elde edilir ve bu gerilim kısıyıcı ile kısıyılır. Sonrada kısıyıcının görev ve periyodu denetlenerek DA-hat gerilimi kontrol edilmiş olur ya da 3-fazlı kontrollü bir doğrultucu kullanılır ve bu doğrultucunun α tetikleme açısı kontrol edilerek DA-hat gerilimi kontrol edilir. Son yöntemde ise; eviricinin çıkış geriliminin frekans ve harmonik içeriklerinin büyüklüğü, yükün üstündeki gücü denetlemek için evirici içinde kontrol edilir. Eviricinin içinde gerilim ve frekans kontrolü için birkaç yöntem geliştirilmiştir [28].

Bunlar;

- Darbe genlik modülasyonu,
- Faz yer değiştirme kontrolü,
- Darbe genişlik modülasyonu'dur.

Eviricilerde çıkış geriliminde mevcut olan harmoniklerin içeriklerini azaltmak için yarı iletken anahtarların açma-kapama yeteneklerinden faydalanılır. Bu açma-kapama ise bir periyot süresince yapılan anahtarlamalarla çıkış gerilimine müdahale etme imkanı sağlar. Bu sayede yukarıda anlatılan iki yöntemle kare dalga çıkış, ya basamaklı kare dalga ya da çentikli darbeler şeklinde elde edilir. Bu dalga şekilleri sinüzoidal olmadığı için çok fazla

harmonik içerir. Bu ise istenmeyen bir durumdur. Bu yüzden Sinüzoidal DGM (SDGM), harmonik eliminasyon ve uzay vektör DGM gibi yeni teknikler geliştirilmiştir [12, 28].



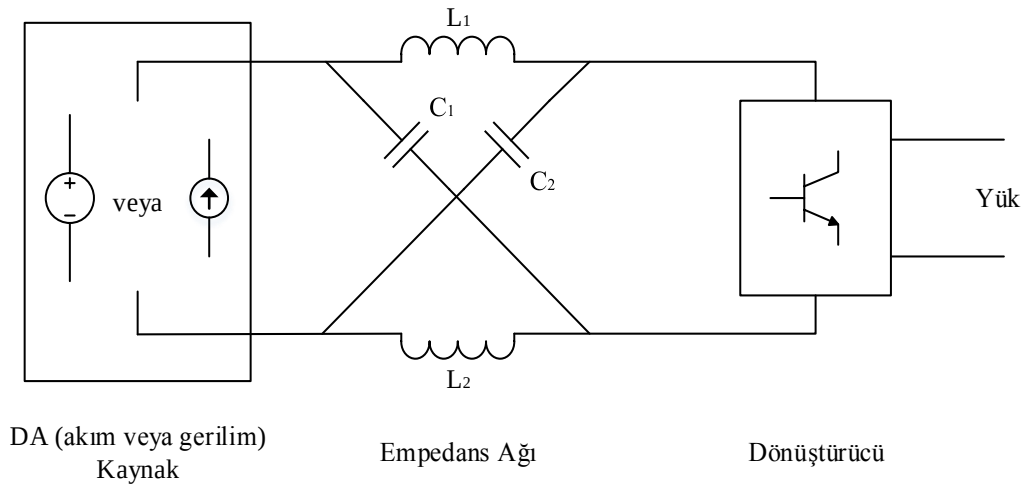
4. Z-KAYNAK EVİRİCİ

Z-kaynak eviriciler ile giriş DA gerilimi hem düşürme hem de yükseltme yapılabilmektedir. Geleneksel gerilim ve akım kaynaklı eviriciler ile gerçekleştirilemeyen bu özellik, güç kaynağı ve evirici arasına yerleştirilen bir empedans ağı ile gerçekleştirilir [12].

FV sistem uygulamalarında geleneksel eviricilerin kullanılması maliyetin azaltılmasının yanı sıra düşük verimlilik ve bileşen sayısının artmasına yol açar. Fakat Z-kaynak eviricilerde bu söz konusu değildir. Z-kaynak eviricilerin yalnız bir aşamada gerilimi yükseltmek ve evirme yeteneğine sahip olması FV sistem uygulamalarında kullanılmasının daha uygun olduğunu ortaya çıkarmıştır [5,12,16].

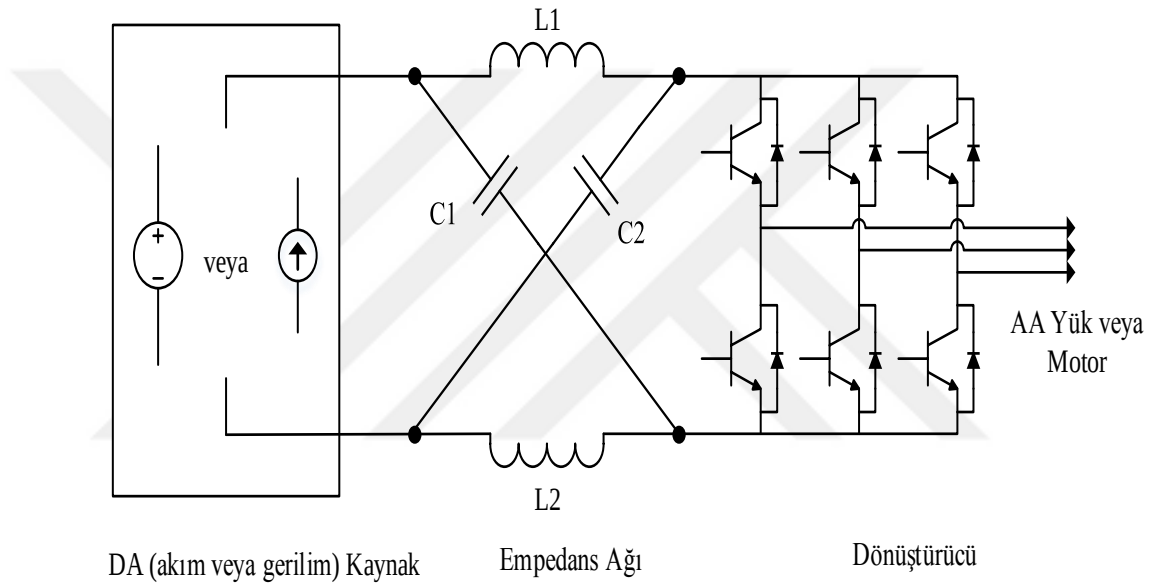
4.1. Z-kaynak dönüştürücü devre yapısı

Z-kaynak dönüştürücünün genel yapısı Şekil 4.1 'de verilmiştir. Bu yapıda tek çeşit bir empedans devresi vardır. Bu yapı ana devreyi yüke, güç kaynağına veya başka bir dönüştürücüye aktarır. Bu sayede kondansatör ve indüktans kullanan geleneksel devre yapısı özgün bir yapıya dönüşür. Z-kaynak eviriciler, geleneksel eviricilerin sahip olduğu teorik engellemelerin üstesinden gelebilen yeni bir yapıdır [4,5].



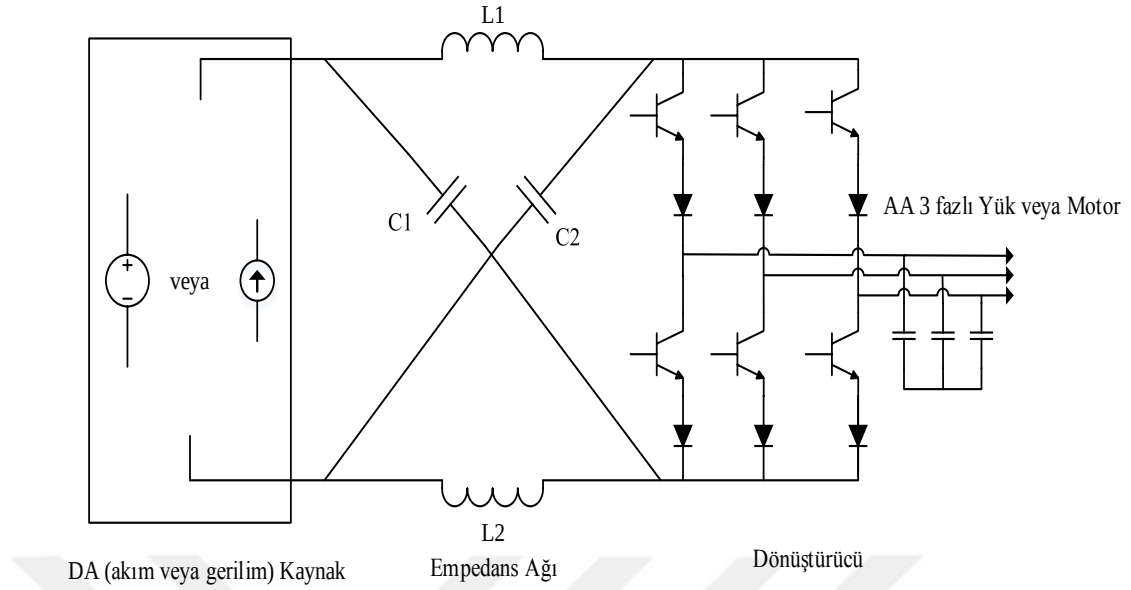
Şekil 4.1. Z-kaynak dönüştürücünün genel devre yapısı

Yukarıdaki şekilde “ X ” şeklinde bağlanmış ayırık L_1 , L_2 indüktansları ve C_1 , C_2 kondansatörlerinin oluşturduğu yapıya empedans ağı denir. Bu empedans ağı, dönüştürücünün DA kaynağa, yüke veya başka bir dönüştürücüye ne şekilde bağlanabileceğini gösterir. DA güç kaynağı, gerilim ya da akım kaynağı olabilir. Bu yüzden DA kaynak; bir pil, diyotlu doğrultucu, tristörlü dönüştürücü, yakıt pili, bir indüktans, bir kondansatör ve ya tüm elemanlardan oluşan bir birleşim de olabilir. Anahtarlama elemanlarına boşluk diyotları Şekil 4.2’deki gibi ters paralel veya Şekil 4.3’deki gibi seri bağlanabilir [2,5].



Şekil 4.2. Anahtarlama elemanlarında ters paralel bağlı diyot bulunduran empedans kaynaklı dönüştürücü yapısı [4].

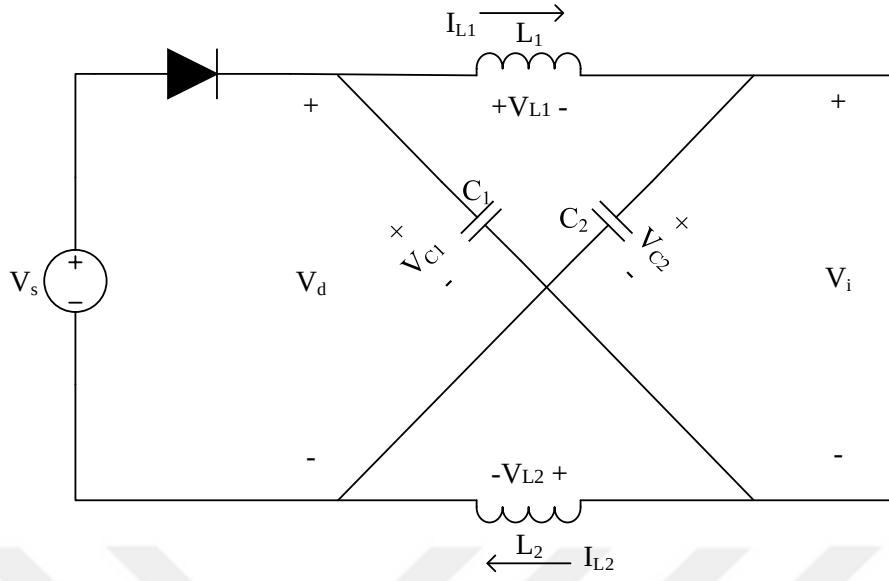
Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te 2 adet 3 fazlı empedans kaynaklı evirici yapısı verilmiştir. L_1 ve L_2 indüktansları aynı nüve üstünde sarılı iki ayırık indüktanstan oluşabileceği gibi 2 adet ayrı indüktans da olabilir.



Şekil 4.3. Anahtarlama elemanlarına seri bağlı diyot bulunduran empedans kaynaklı dönüştürücü yapısı

4.2. Z-Kaynak Eşdeğer Devre, Çalışma Prensibi ve Kontrol

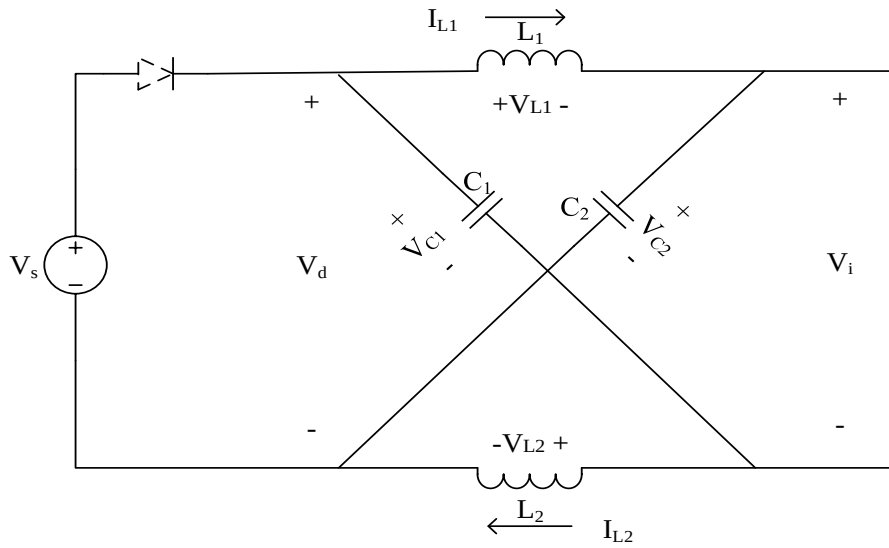
Şekil 4.4’de Z-kaynak evirici devre şeması görülmektedir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de 9 adet anahtarlama konumu vardır. Bilindiği üzere geleneksel gerilim kontrollü eviricilerde ise 8 adet anahtarlama durumu bulunmaktadır. Üç fazlı gerilim kontrollü eviricilerde DA gerilim yüke uygulanırken sırasıyla alttaki ve üstteki üçer anahtarlama elemanı kısa devre edildiğinde iki adet sıfır konum vektörü ortaya çıkar. Bu durum kollardaki üst ve alt sıra elemanlarının aynı anda kapı sinyali vererek kısa devre edilmesine tekabül eder. Üçüncü sıfır konum vektörü ise kısa devre sıfır konum vektörü olarak adlandırılır. Bu üçüncü sıfır konum vektörü yedi farklı yolla elde edilir. Yalnızca bir faz kolunun kısa devre edilmesiyle, 2 faz kolunun kısa devre birleşimiyle ve tüm faz kollarının kısa devre edilmesiyle gerçekleştirilir. Empedans ağı kısa devre sıfır konumunu mümkün kılmaktadır. Bu kısa devre sıfır durumu eviriciye hem düşürücü hem yükseltici olarak çalışma imkânı sağlar [4,5,14].



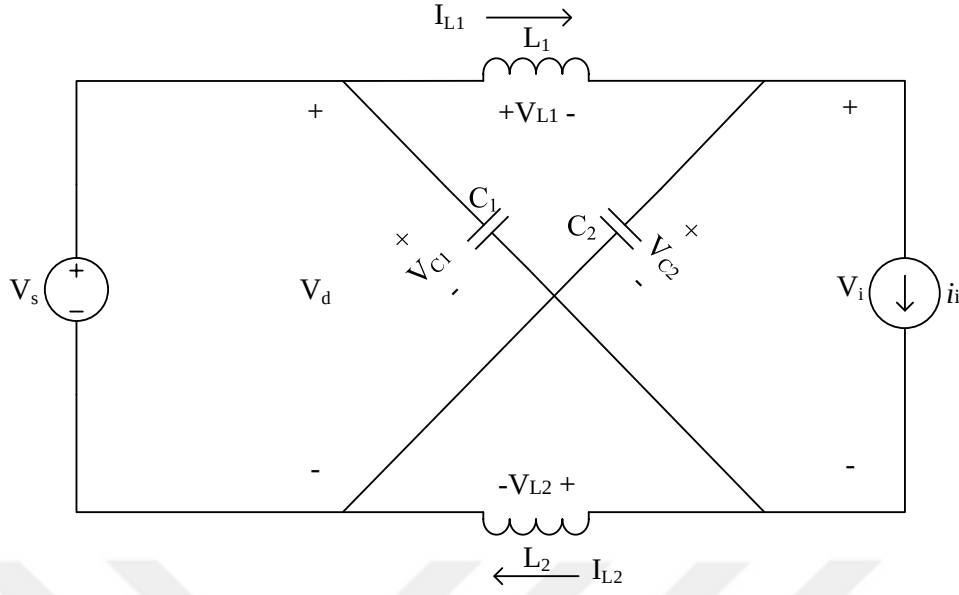
Şekil 4.4. DA baradan bakıldığında empedans kaynaklı eviriciye ait eşdeğer devre

Şekil 4.4 ile Şekil 4.5'te gösterilen empedans kaynaklı dönüştürücüye ait DA baradan görünen eşdeğer devre gösterilmiştir.

Şekil 4.5'te gösterildiği gibi evirici köprüsü, kısa devre sıfır konumunda kısa devre olarak gözükmemektedir. Şekil 4.6'da ise diğer 6 adet anahtarlama konumunda evirici köprüsü bir akım kaynağına dönüşmüştür. Bu şekilde empedans kaynaklı eviricinin sekiz adet kısa devre olmayan anahtarlama konumlarından herhangi birinde iken DA baradan görünen eşdeğer devre verilmiştir.



Şekil 4.5. DA baradan kısa devre sıfır konumunda bakıldığında empedans kaynaklı eviriciye ait eşdeğer devre



Şekil 4.6 DA baradan kısa devre sıfır olmayan konumlarda bakıldığında empedans kaynaklı eviriciye ait eşdeğer devre

Tüm geleneksel DGM teknikleri, Z-kaynaklı eviriciyi ve eviricinin giriş-çıkış değerlerini kontrol altında tutmak için kullanılmaktadır [4,14].

4.3. Z-kaynak evirici devresinin analizi ve çıkış dalga şeklinin elde edilmesi

L_1 ve L_2 indüktanslarının ve C_1 , C_2 kondansatörlerinin aynı indüktans ve kondansatör değerlerine sahip olduğu ve empedans ağının simetrik olduğu kabulü ile devre şemasından sırasıyla kondansatör ve indüktans gerilim değerleri [4,5];

$$V_{C1} = V_{C2} = V_C; \quad V_{L1} = V_{L2} = V_L \quad (4.1)$$

T anahtarlama periyodu, T_0 kısa devre sıfır konum süresi olarak kabul edilip Şekil 4.5'deki devreden,

$$V_L = V_C; \quad V_d = 2V_C; \quad V_i = 0 \quad (4.2)$$

ifadeleri bulunur. T periyodu boyunca evirici köprüsünün T_1 'e kadar sekiz adet kısa devre olmayan konumda olduğu düşünülerek Şekil 4.6'daki eşdeğer devreden,

$$V_L = V_S - V_C; \quad V_d = V_S; \quad V_i = V_C - V_L = 2V_C - V_S \quad (4.3)$$

Eşitliği yazılabilir. Burada V_0 , DA kaynak gerilimidir ve $T = T_0 + T_1$ durumu söz konusudur. Sürekli halde T boyunca indüktansların ortalama gerilimleri sıfır olmalıdır. Denklem (4.2) ve (4.3) 'den,

$$V_L = \bar{V}_L = \frac{T_0 \cdot V_C + T_1 \cdot (V_S - V_C)}{T} = 0 \quad \text{veya} \quad \frac{V_C}{V_S} = \frac{T_1}{T_1 - T_0} \quad (4.4)$$

olarak bulunur. Evirici köprüsü üzerindeki ortalama DA gerilim ise;

$$V_i = \bar{V}_i = \frac{T_0 \cdot 0 + T_1 \cdot (2V_C - V_S)}{T} = \frac{T_1}{T_1 - T_0} V_S = V_C \quad (4.5)$$

Şeklinde bulunur. Evirici köprüsü üstündeki ortalama DA hat geriliminin tepe değeri,

$$\hat{V}_i = V_C - V_L = 2V_C - V_S = \frac{T}{T_1 - T_0} V_S = B \cdot V_S \quad (4.6)$$

Burada B kısa devre sıfır konumundan dolayı oluşan yükseltme faktörüdür ve Denklem (4.7) hesaplanır.

$$B = \frac{T}{T_1 - T_0} = \frac{1}{1 - 2 \frac{T_0}{T}} \geq 1 \quad (4.7)$$

Eviricinin tepe faz gerilimi,

$$\hat{V}_{ac} = M \cdot \frac{\hat{V}_i}{2} \quad (4.8)$$

Burada M modülasyon indeksidir. Denklem (4.8)'den,

$$\hat{V}_{ac} = M \cdot B \cdot \frac{V_S}{2} \quad (4.9)$$

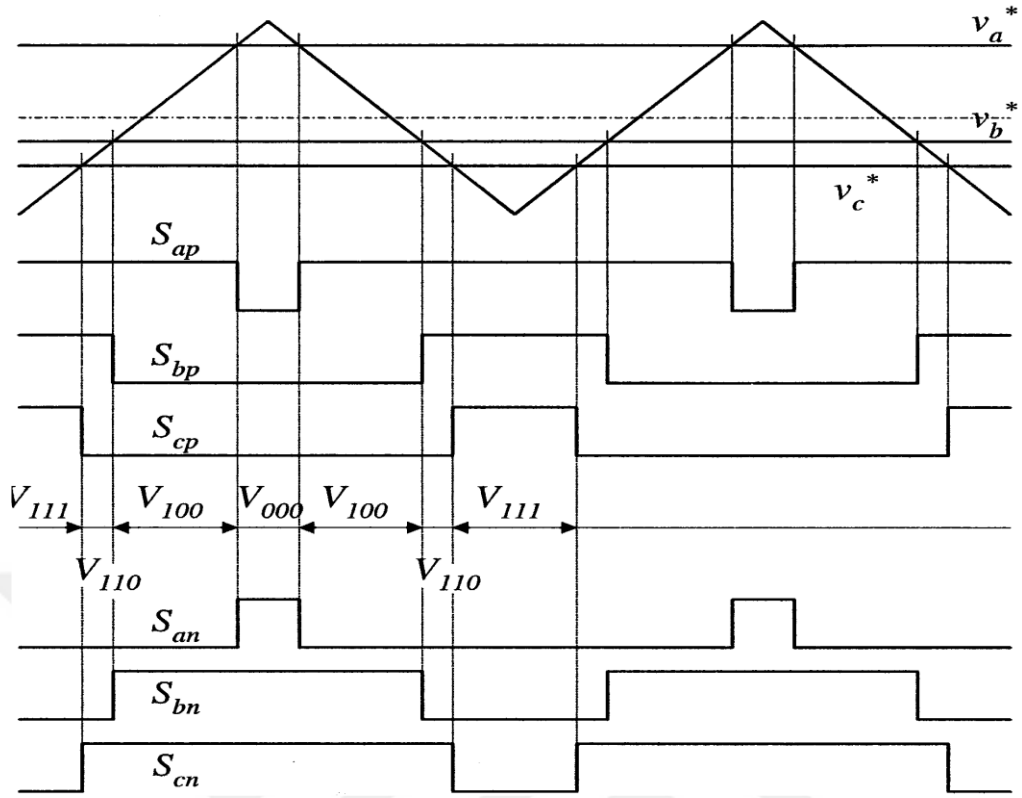
Olarak bulunur. Buradan çıkış gerilimi uygun bir B_B faktörü (düşürücü-yükseltici, buck-boost faktor) kullanılarak yükseltilebilir veya düşürülebilir.

$$B_B = M \cdot B = (0 \sim \infty) \quad (4.10)$$

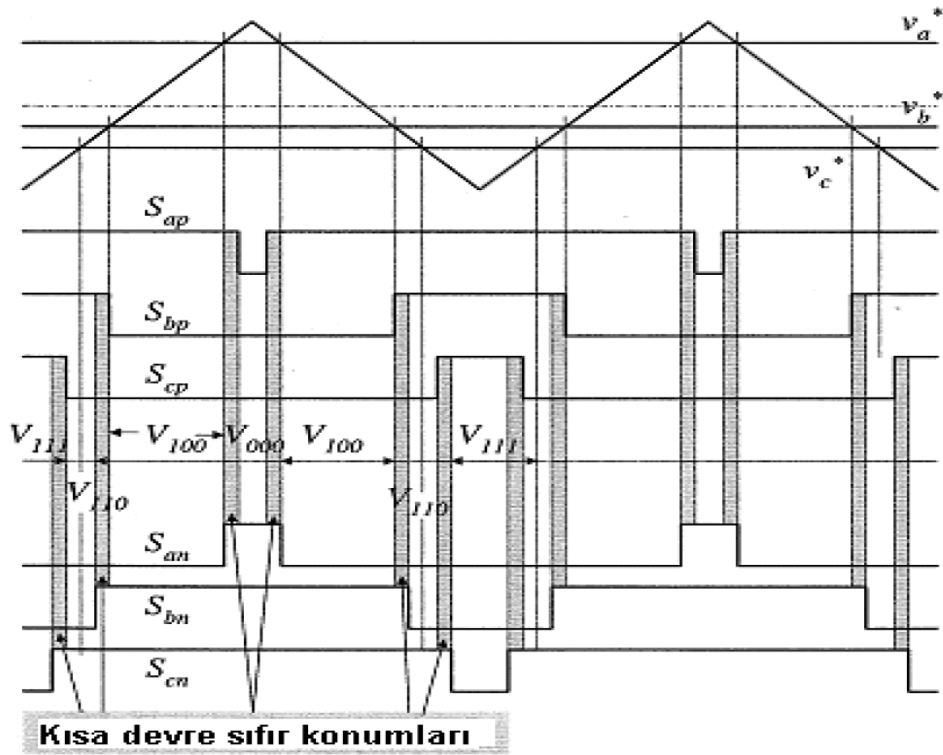
Şeklinde yazılabilir. Kondansatör gerilimi ise aşağıdaki gibi bulunur [4,5].

$$V_{C1} = V_{C2} = V_C = \frac{1 - \frac{T_0}{T}}{1 - 2\frac{T_0}{T}} V_S \quad (4.11)$$

Şekil 4.7’de, üçgen karşılaştırmalı klasik DGM anahtarlama sırası gösterilmiştir. Her anahtarlama çevriminde istenilen gerilimi elde etmek için 2 adet kısa devre olmayan sıfır anahtarlama vektörü, bir sonraki iki aktif vektör ile kullanılmıştır. Eğer DA gerilim istenilen AA gerilimi üretecek kadar büyük ise; Şekil 4.8’deki gibi klasik DGM tekniği kullanılır. Fakat DA gerilim istenilen AA gerilimi üretmek için yeteri kadar büyük değil ise; (gerilimi yükseltmek için) Şekil 4.8’de gösterilen modifiye edilmiş kısa devre sıfır konumlu DGM tekniği kullanılır [4,5]. Burada dikkat edilmesi gereken husus, bir faz bacağındaki anahtarların bir anahtarlama çevriminde sadece bir kez kesim-iletim konumuna geçmesidir. Toplam sıfır anahtarlama aralığı değiştirilmeksizin, kısa devre sıfır konumları faz kollarına yerleştirilmektedir. Böylece aktif durumlarda da değişmez. Böylelikle eviriciye giren DA giriş gerilimi de, kısa devre sıfır durumları ile yükseltilmiş olur [4].



Şekil 4.7. Geleneksel DGM kontrolü [4].



Şekil 4.8. Aktif vektörler sabit durumda kısa devre sıfır konumlarını içeren DGM kontrolü [4].

4.4. Empedans ağındaki kondansatörler ve indüktanslar

Geleneksel gerilim kontrollü eviricilerde enerji depo etmek ve gerilimdeki dalgalanmayı azaltmak için filtreleme ve geçici depo elemanı olarak kullanılan eleman kondansatörlerdir.

Geleneksel akım kontrollü eviricilerde ise; enerji depolama ve filtreleme elemanı olarak kullanılan indüktanslar, hem DA indüktans elemanı olarak kullanılır hem de dalgalanmayı önler.

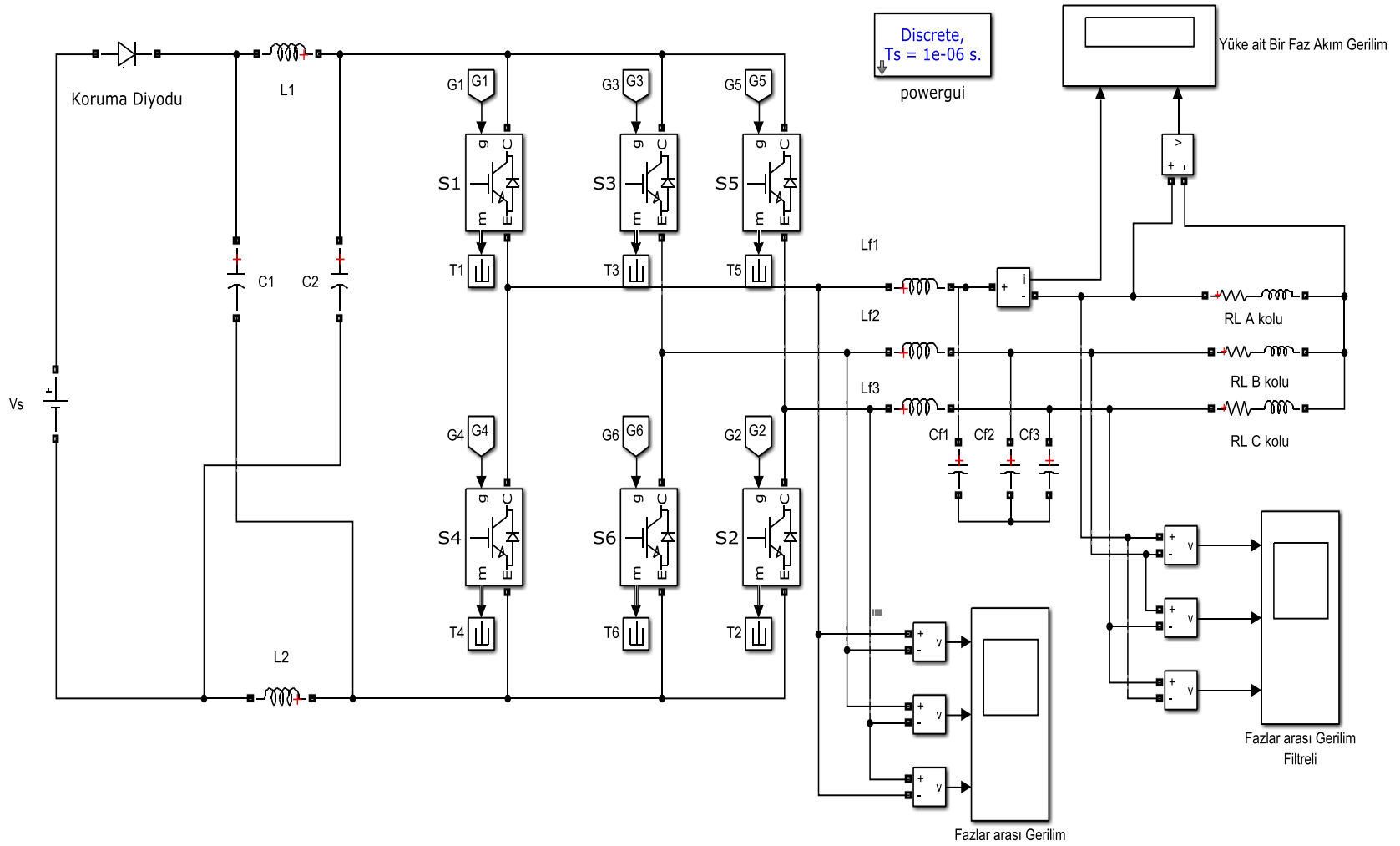
Empedans ağında, iki adet indüktans ve iki adet kondansatör kullanılır. Empedans ağı; Z-kaynak eviricinin filtre ve enerji depolama elemanıdır. Bu ağ çift katlı filtreleme vazifesi görür. Dolayısıyla geleneksel akım ve gerilim kontrollü eviricilerden 2 kat daha fazla dalgalanma oranını azalmaktadır [2,4,14].

5. FOTOVOLTAİK SİSTEMİN MODELLENMESİ VE BENZETİM SONUÇLARI

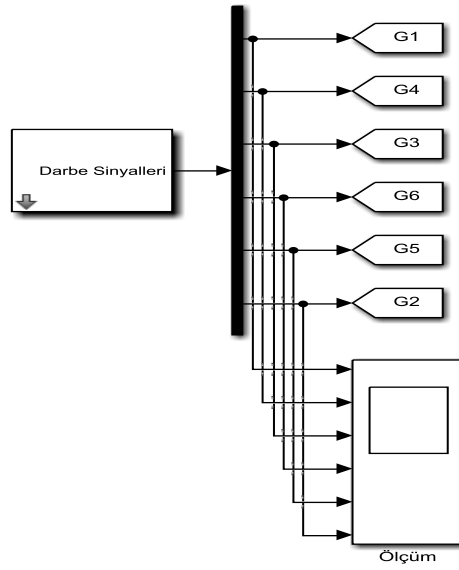
Bu bölümde sırasıyla Z-kaynak evirici modeli ve Z-kaynak evirici için düşünülen anahtarlama yöntemi modeli, FV enerji üretim sisteminde kullanılan FV panel modeli ve modelin yapısı kısaca tanıtılmıştır. Ardından Şebeke bağlantılı FV güç üretim sisteminin benzetim sonuçlarına yer verilmiştir.

5.1. Üç fazlı Z-kaynak eviricinin benzetimi

Z-kaynak evirici doğası gereği bir çeşit empedans devresi içermektedir. Bu yapı ana devreyi yüke, güç kaynağına veya başka bir dönüştürücüye aktarmaya yarar. Bu sayede kondansatör ve indüktans kullanan geleneksel eviriciye kıyasla devre yapısı özgün bir yapı sağlanmıştır. Bu kısımda örnek çalışma koşulları altında Matlab/Simulink ortamında Z-kaynak evirici modellenerek, Z-kaynak evirici konusunun daha hızlı anlaşılması ve pratik uygulamalar için altyapı oluşturması amaçlanmaktadır. Üç fazlı Z-kaynak eviricinin modeli Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Modelde Z-kaynak evirici devresi altı ana anahtardan oluşmaktadır. Şekil 5.1 Üç fazlı Z-kaynak evirici modelinde bulunan seri bağlı diyot (koruma diyotu) devreye ters akımı önlemek için bağlanmıştır. Anahtarlar için geçiş sinyalleri, SDGM tekniği ile üretilmektedir. SDGM kapalı ve açık modeli sırasıyla Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de verilmiştir. Benzetimde kullanılan Z-kaynak eviriciye ait parametreler Tablo 5.1’de görülmektedir. Şekil 5.4’de Z-kaynak eviricinin anahtarlarına uygulanan geçiş sinyalleri verilmiştir.



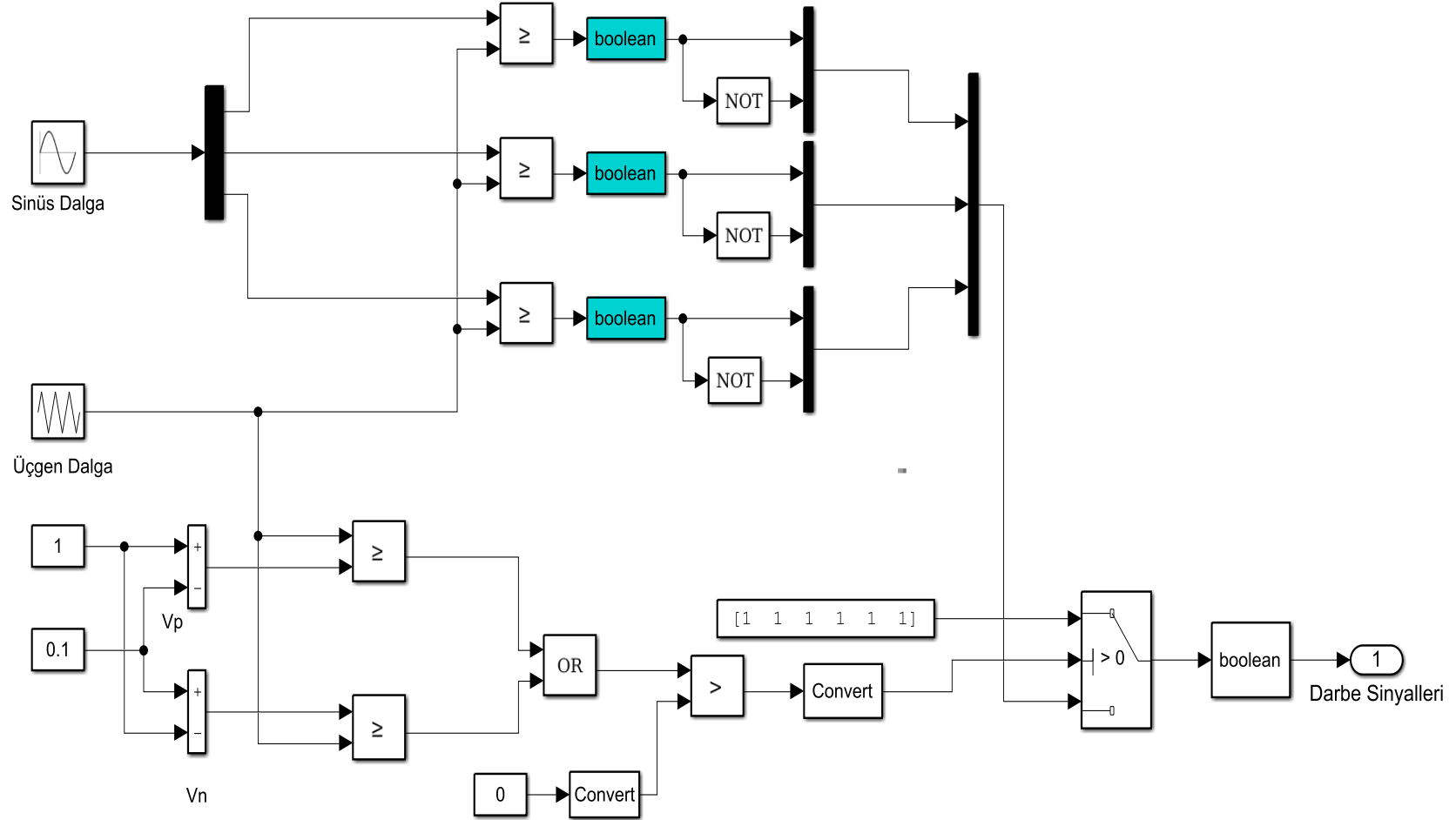
Şekil 5.1. Üç fazlı Z-kaynak eviricinin Matlab benzetim modeli



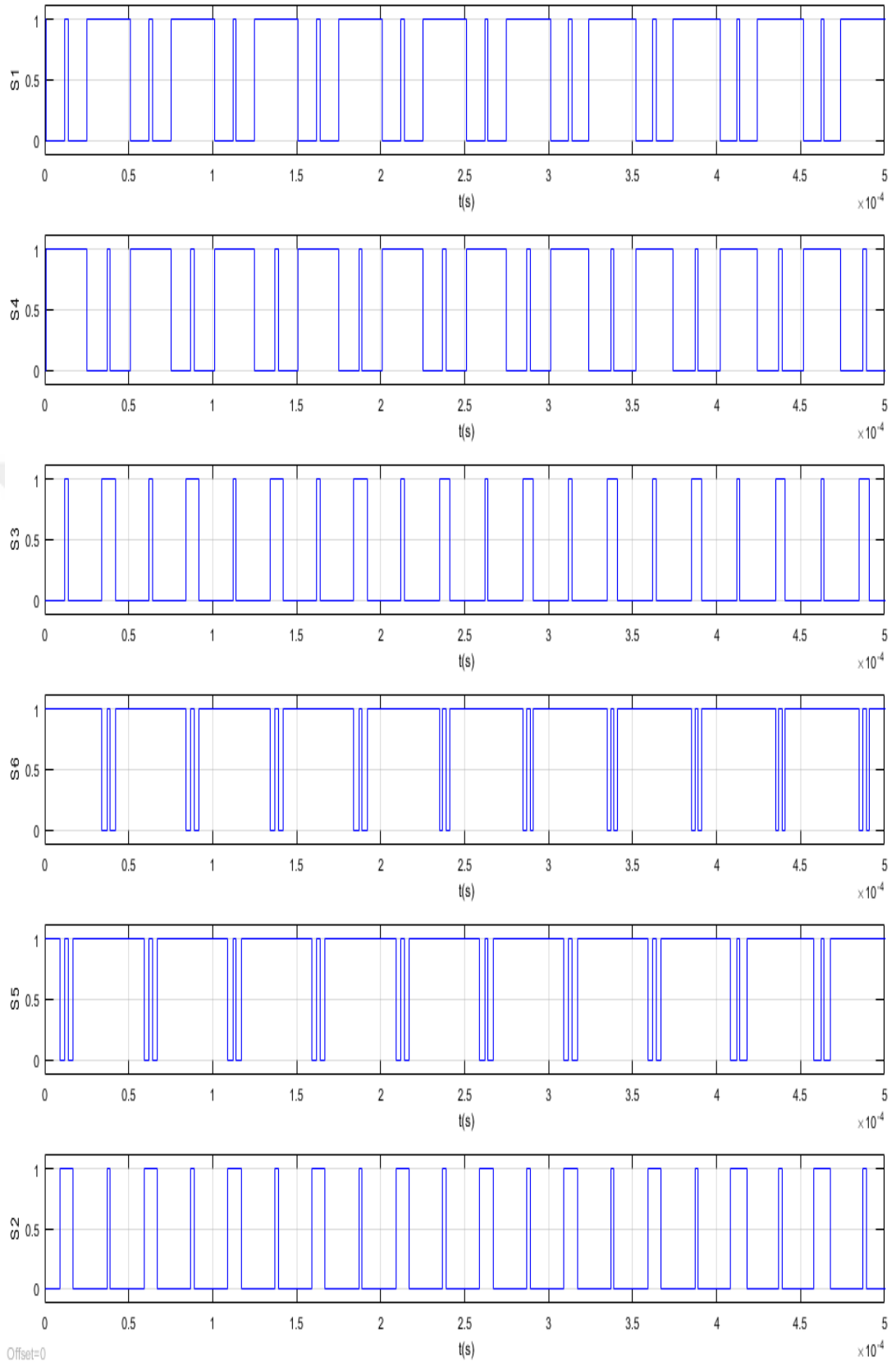
Şekil 5.2. Z-kaynak evirici için anahtarlama sinyallerinin benzetim modeli

Tablo 5.1. Z-kaynak evirici için kullanılan sistemin parametreleri

Parametre	Parametre değeri
Modülasyon indeksi	0.9
Darbe genişliği (DG)	0.05-0.4
DA giriş gerilimi	100 V
Temel Frekans	50 Hz
Anahtarlama frekansı (fs)	2 kHz
Örnekleme zamanı	1 μ s
Yük direnci	5 Ω
Yük indüktansı	8 mH
Z kaynak ağı indüktansı ($L_1=L_2$)	500 μ H
Z kaynak ağı kondansatörü ($C_1=C_2$)	400 μ F
Çıkış filtre indüktansı ($L_{f1}= L_{f2}= L_{f3}$)	1 mH
Çıkış filtre kondansatörü ($C_{f1}= C_{f2}= C_{f3}$)	100 μ F



Şekil 5.3. Z-kaynak evirici için anahtarlama sinyallerinin alt sistem benzetim modeli



Şekil 5.4. Z-kaynak eviricinin anahtarlama sinyalleri

Tablo 5.2’de 0.9 modülasyon indeksi ve darbe genişliği 0.05 artımla 0.05-0.4 aralığı için Z-kaynak eviriciye ait çıkış faz gerilimi, faz akımı ve hat gerilimi ve bunlara ait toplam harmonik bozulmaları değerleri verilmiştir. Tablo 5.2’de görüldüğü gibi çıkış hat geriliminin 0.05 darbe genişliğinden 0.4 darbe genişliğine kadar artarak devam ettiği görülmektedir. Seçilen darbe genişliği aralığında maksimum tepe değeri 0.4 değeri için 294.2 V olarak elde edilmiştir. Z-kaynak eviricinin giriş gerilimi ve çıkış gerilimi incelendiğinde 0.05 darbe genişliğinde düşürücü mod 0.1 darbe genişliğinden büyük değerler için yükseltici modda çalışmaktadır. Tablo 5.2 incelendiğinde 0.2 darbe genişliğinden itibaren THD değeri kabul edilen standartların üzerinde değerler almaktadır.

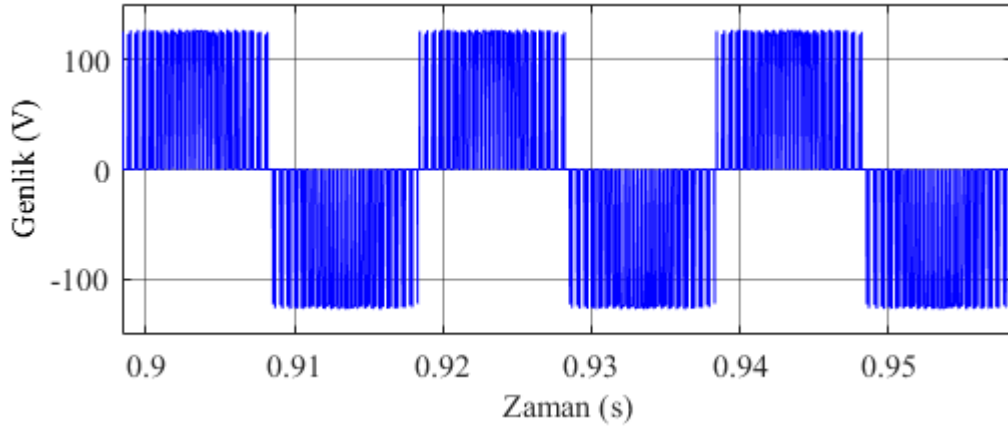
Tablo 5.2. Darbe genişliğinde yapılan değişiklik ile elde edilen faz gerilimi, faz akımı ve çıkış hat gerilim değerleri ve THD sonuçları (DG=0.05-0.4)

DG	Faz Gerilimi		Faz Akımı		Hat Gerilimi	
	Genlik	THD (%)	Genlik	THD (%)	Genlik	THD (%)
0.05	49.1	3.90	8.773	0.54	85.02	3.71
0.1	55.12	3.46	9.85	0.41	95.47	3.46
0.15	62.23	4.92	11.12	1.10	107.8	4.78
0.2	71.38	5.22	12.76	1.64	123.6	5.33
0.25	82.89	6.02	14.81	1.94	143.6	6.21
0.3	96.6	5.10	17.26	1.73	167.3	5.23
0.35	119.8	20.43	21.4	4.26	207.3	19.77
0.4	169.9	29.81	30.36	6.02	294.2	29.26

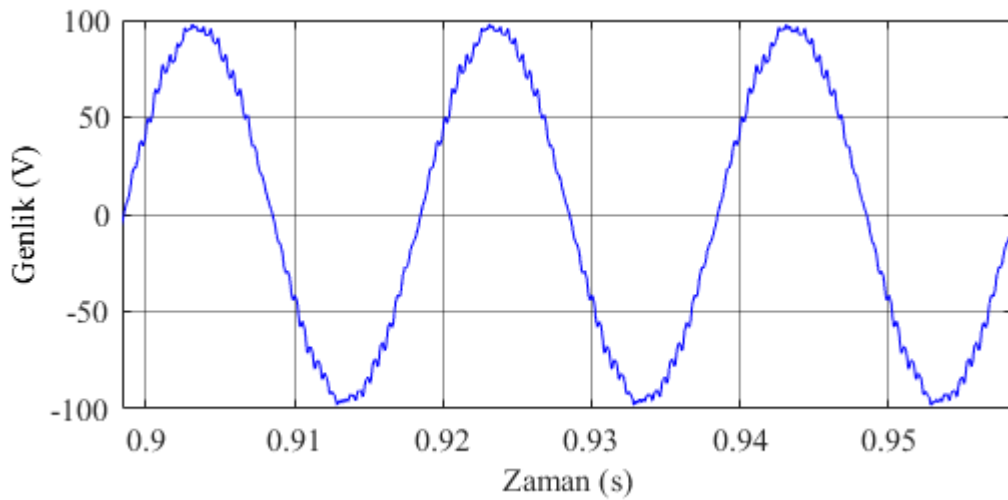
Tablo 5.3. Darbe genişliğinde yapılan değişiklik ile elde edilen eviricinin hat gerilimi tepe değeri ($\hat{v}_{ac}$), B yükseltme faktörü, B_B düşürme-Yükseltme faktörü değerleri (DG=0.05-0.4)

DG	$\hat{v}_{ac}$	B	B_B
0.05	85.02	1.8893	1.7004
0.1	95.47	2.1216	1.9094
0.15	107.8	2.3956	2.1560
0.2	123.6	2.7467	2.4720
0.25	143.6	3.1911	2.8720
0.3	167.3	3.7178	3.3460
0.35	207.3	4.6067	4.1460
0.4	294.2	6.5378	5.8840

Tablo 5.3’de 0.05-0.4 darbe genişliği aralığında elde edilen eviricinin tepe faz gerilimi ($\hat{v}_{ac}$), B yükseltme faktörü ve B_B Düsürme-Yükseltme faktörü değerleri verilmiştir. B ile B_B katsayıları sırasıyla Denklem (4.9) ve (4.10) elde edilmiştir. Tablo 5.3 incelendiğinde, Tablo 5.2’yi destekler yorum elde edilmektedir. 2.1216 B değerinden büyük değerler ile Z-kaynak evirici yükseltici modda olduğu görülmektedir. B_B faktörünün de darbe genişliğine bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Z-kaynak eviricinin çıkış büyüklükleri 0.1 darbe genişliği için çizdirilmiştir. Z-kaynak eviricinin bir fazına ilişkin filtresiz hat gerilimi Şekil 5.5 ve filtreli hat gerilimi ise Şekil 5. 6’da verilmiştir.

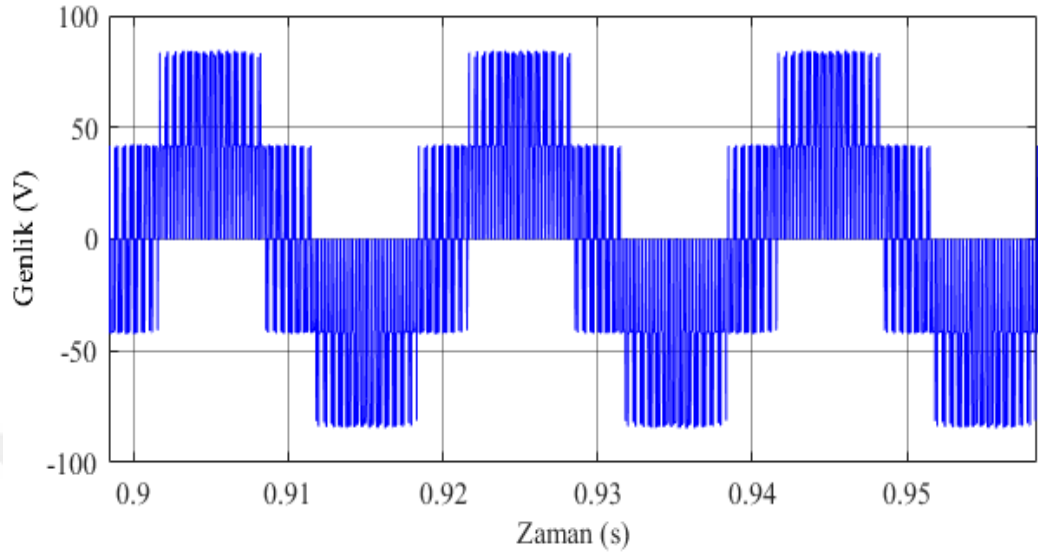


Şekil 5.5. Z-kaynak eviricinin bir fazına ilişkin filtresiz çıkış hat gerilimi

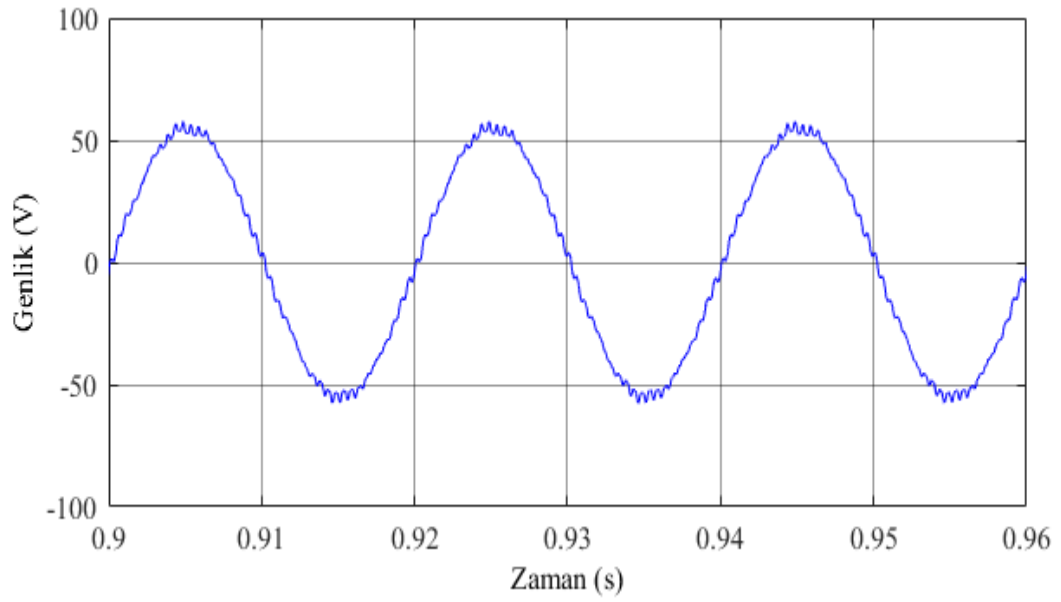


Şekil 5.6. Z-kaynak eviricinin bir fazına ilişkin filtreli çıkış hat gerilimi

Z-kaynak eviricinin bir fazına ilişkin filtresiz faz gerilimi Şekil 5.7 ve filtreli faz gerilimi ise Şekil 5. 8’de gösterilmiştir.

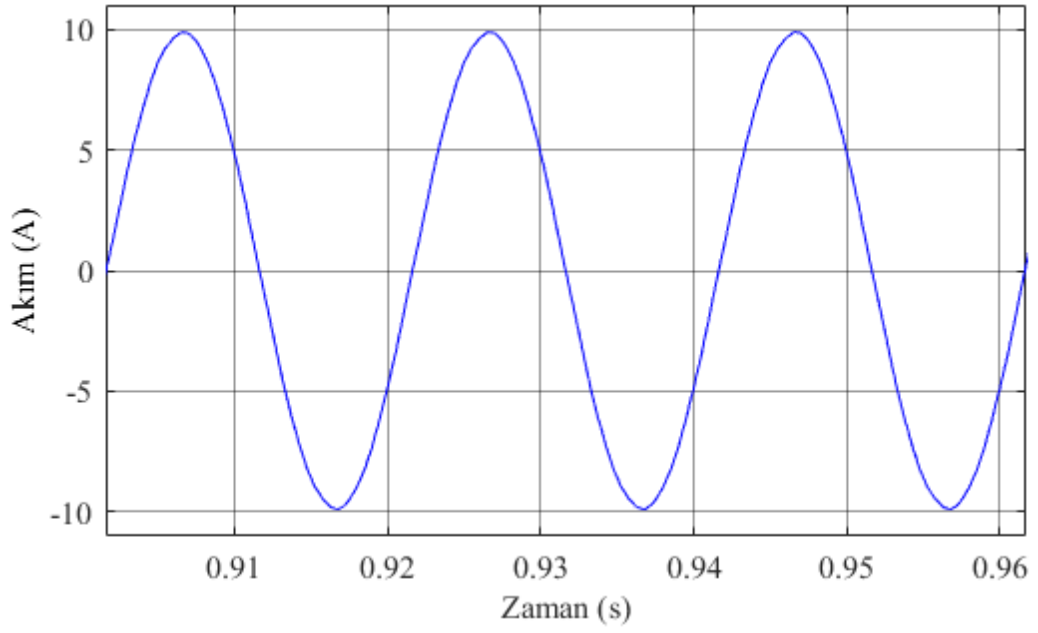


Şekil 5.7. Z-kaynak eviricinin bir fazına ilişkin filtresiz çıkış faz gerilimi



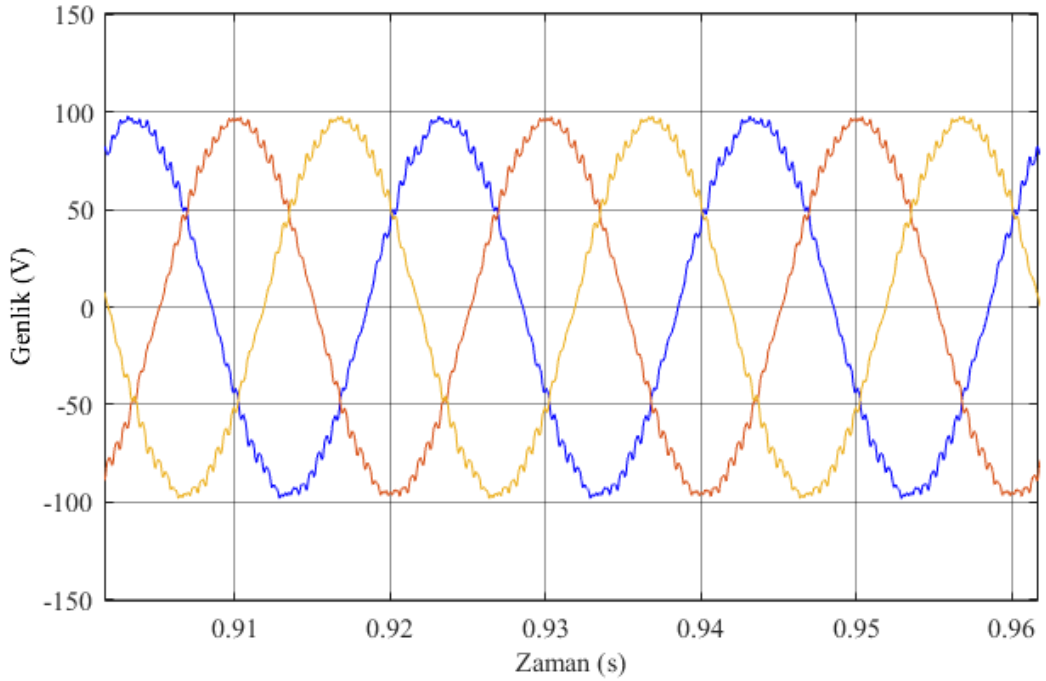
Şekil 5.8. Z-kaynak eviricinin bir fazına ilişkin filtreli çıkış faz gerilimi

Şekil 5.6 ve Şekil 5.8 incelendiğinde kullanılan pasif filtre ile arzu edilen sinüs dalga şekli elde edilmiştir. Z-kaynak evirici çıkışında yükün bir fazdan geçtiği akım Şekil 5.9’da verilmiştir



Şekil 5.9. Z-kaynak eviricinin bir fazına ait hat yük akımı

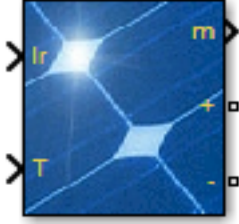
Şekil 5.9 ve Tablo 5.2 beraber yorumlandığında Z-kaynak evirici pasif filtre ile 0.1 darbe genişliğinde %0.41 THD değeri kabul edilebilir sonuç elde edilmiştir. Z kaynak eviricinin filtreli üç faz çıkış hat gerilimi Şekil 5.10’da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Üç fazlı Z-kaynak eviricinin filtreli çıkış hat gerilimi

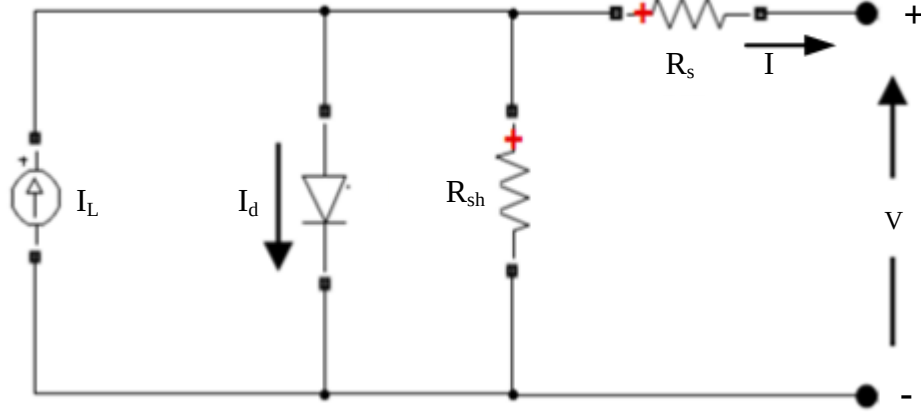
5.2. FV güç üretim sisteminde kullanılan panel

Benzetimlerde SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV panelinin modeli kullanılmıştır. Kullanılan FV panelin bloğu Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. FV panel Matlab/Simulink bloğu

FV hücrenin eşdeğer devresi ise Şekil 5.12’de verilmiş olup FV panele ait I-V ve P-V eğrileri sırasıyla Şekil 5.13.a ve Şekil 5.13.b’de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. FV hücrenin eşdeğer devresi [23]

FV hücrenin çıkış voltajı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$V = \frac{AkT}{e} \ln \left(\frac{I_{ph} + I_0 - I}{I_0} \right) - R_s I \quad (5.1)$$

Burada:

e: Elektron yükü (1.6×10^{-19} Coulomb),

A: Eğri uydurma katsayısı,

k: Boltzman sabiti (1.38×10^{-23} Joule/°K),

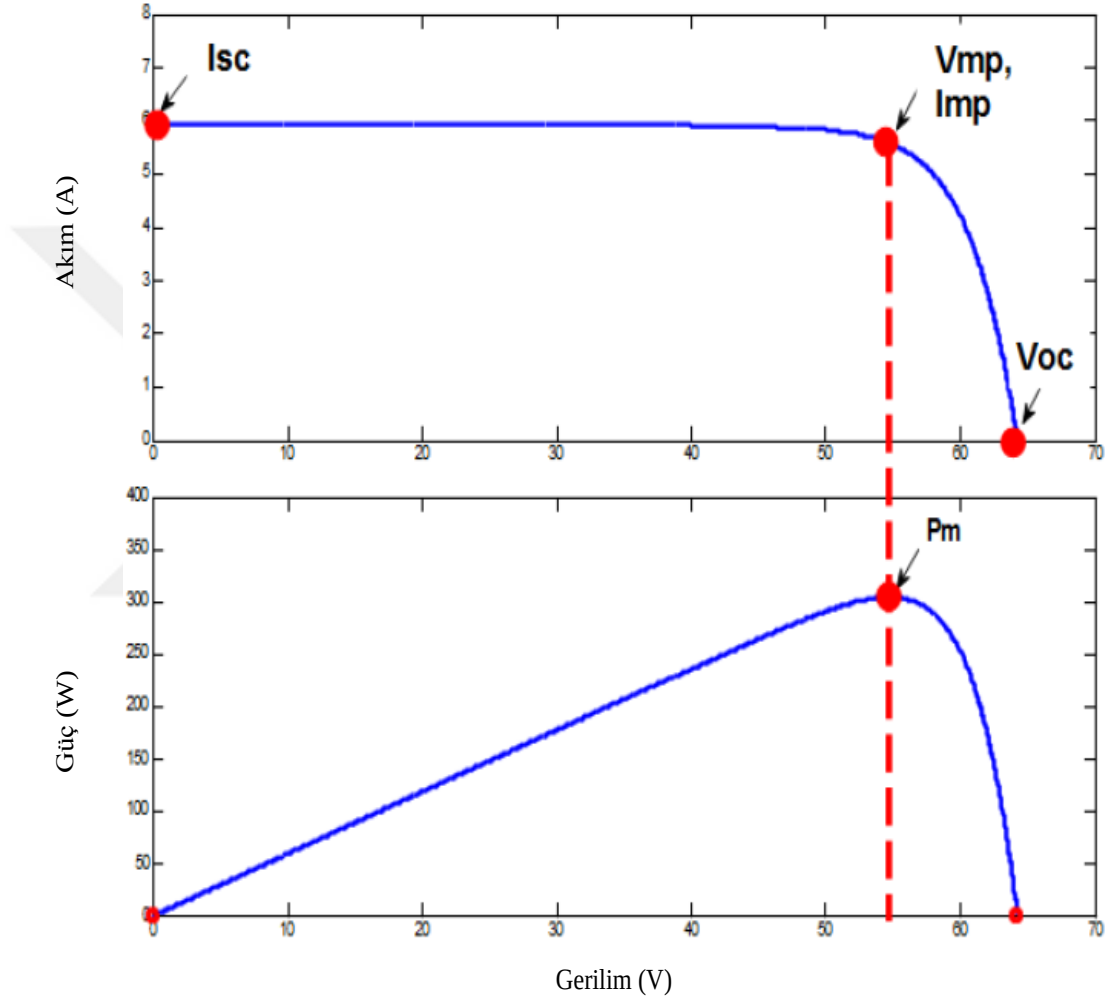
T: Mutlak sıcaklık sabiti (200 °C)

I = Hücre çıkış akımı (A)

I_{ph} = Güneşe bağlı ışık şiddeti (5 A)

I_0 = Diyodun ters doyum akımı (0.0002 A)

R_s =Hücrenin seri direnci (0.001 Ω) olarak ifade edilir.



Şekil 5.13. FV hücrelerine ait I-V eğrisi ile P-V eğrisi

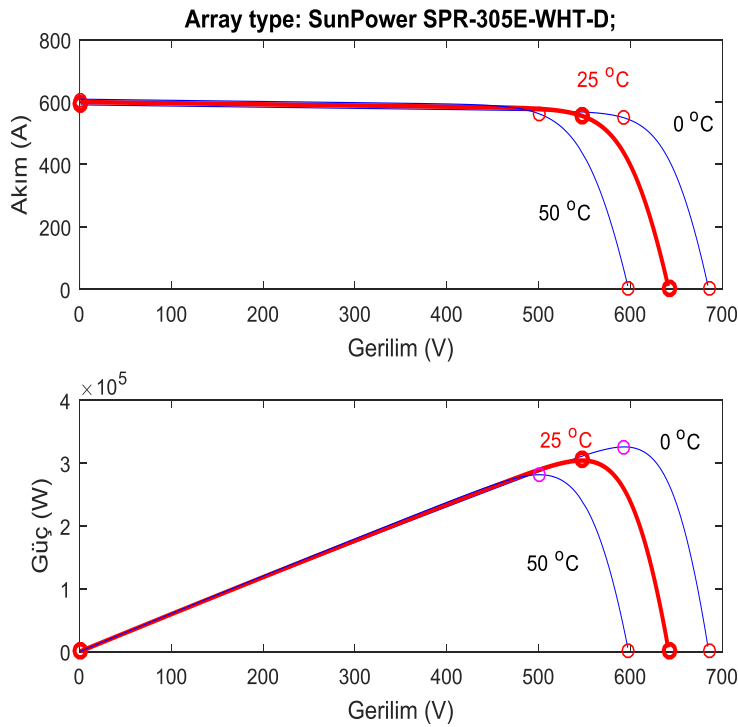
Şekil 5.13'deki grafiklere ait parametreler aşağıda tanımlanmıştır.

- V_{oc} : Açık devre gerilimi
- I_{sc} : Kısa devre akımı
- P_m : Maksimum güç değeri
- V_{mp} : Maksimum güç noktası gerilimi
- I_{mp} : Maksimum güç noktası akımı

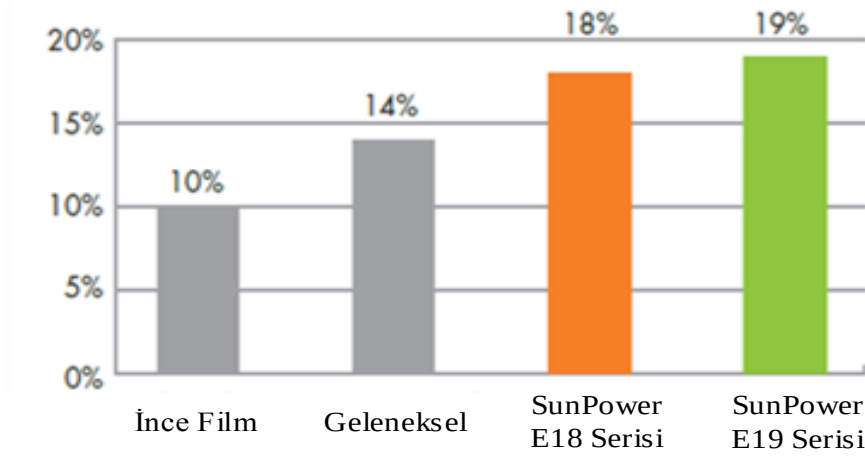
Şekil 5.13.a incelendiğinde gerilimin sıfır, akımın maksimum olduğu noktada I_{SC} 'nin olduğu görülmektedir. Akımın sıfır, gerilimin maksimum olduğu noktada ise V_{OC} oluşmaktadır. I-V eğrisindeki az miktardaki gerilim artışına karşılık akım büyük miktarda düşüş göstermektedir. I-V eğrisinde fotovoltaiik hücre, iç direnci olan bir sabit gerilim kaynağı gibi davranmaktadır. V_{mp} ve I_{mp} noktaları ise hücreden çekilebilecek en fazla gücü göstermektedir.

Şekil 5.13.b P-V eğrisinde ise yetersiz ışınım seviyelerinde akım ya da gerilim sıfır olduğundan güç de sıfır olur. Panelden en çok güç alınınca verim de en üst düzeyde olmaktadır. Buna bağlı olarak P_m noktası maksimum güç noktasını göstermektedir.

SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV panelinin 0, 25 ve 50 °C sıcaklık değerleri için I-V ve P-V eğrisi sırasıyla Şekil 5.14 a ve Şekil 5.14 b'de gösterilmiştir. Şekil 5.14'deki eğriler SunPower SPR-305E-WHT-D tipi bir hücre FV paneli kullanılarak elde edilmiştir. SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV paneli günümüzün en yüksek verimliliğini ve performansını sağlar. Panelimiz ince film güneş panellerinden % 100 geleneksel tasarım güneş panellerinden %50'ye kadar daha fazla güç üretmektedir. Buna bağlı olarak Şekil 5.15'de SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV panelin diğer panel tiplerini göre verimlilik grafiği verilmiştir [30].



Şekil 5.14. SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV panelinin farklı sıcaklık değerleri seçilerek elde edilen a) I-V eğrisi b) P-V eğrisi



Şekil 5.15. SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV panelin verimlilik grafiği

FV panellerde sıcaklık ve güneş ışınım seviyeleri değişirse, FV diziliminin çıkış voltajı ve akımı bu değişikliklerden etkileneceklerdir. Genellikle FV çıkış voltajı ağırlıklı olarak sıcaklık ile değişirken, FV çıkış akımı ise ağırlıklı olarak güneş ışınım seviyesinin değişmesi ile değişiklik göstermektedir. SunPower SPR-305E-WHT-D tipi panel parametreleri Tablo 5.4’de verilmektedir. SunPower SPR-305E-WHT-D panel hakkında detaylı bilgiye [30]’dan ulaşılabilir.

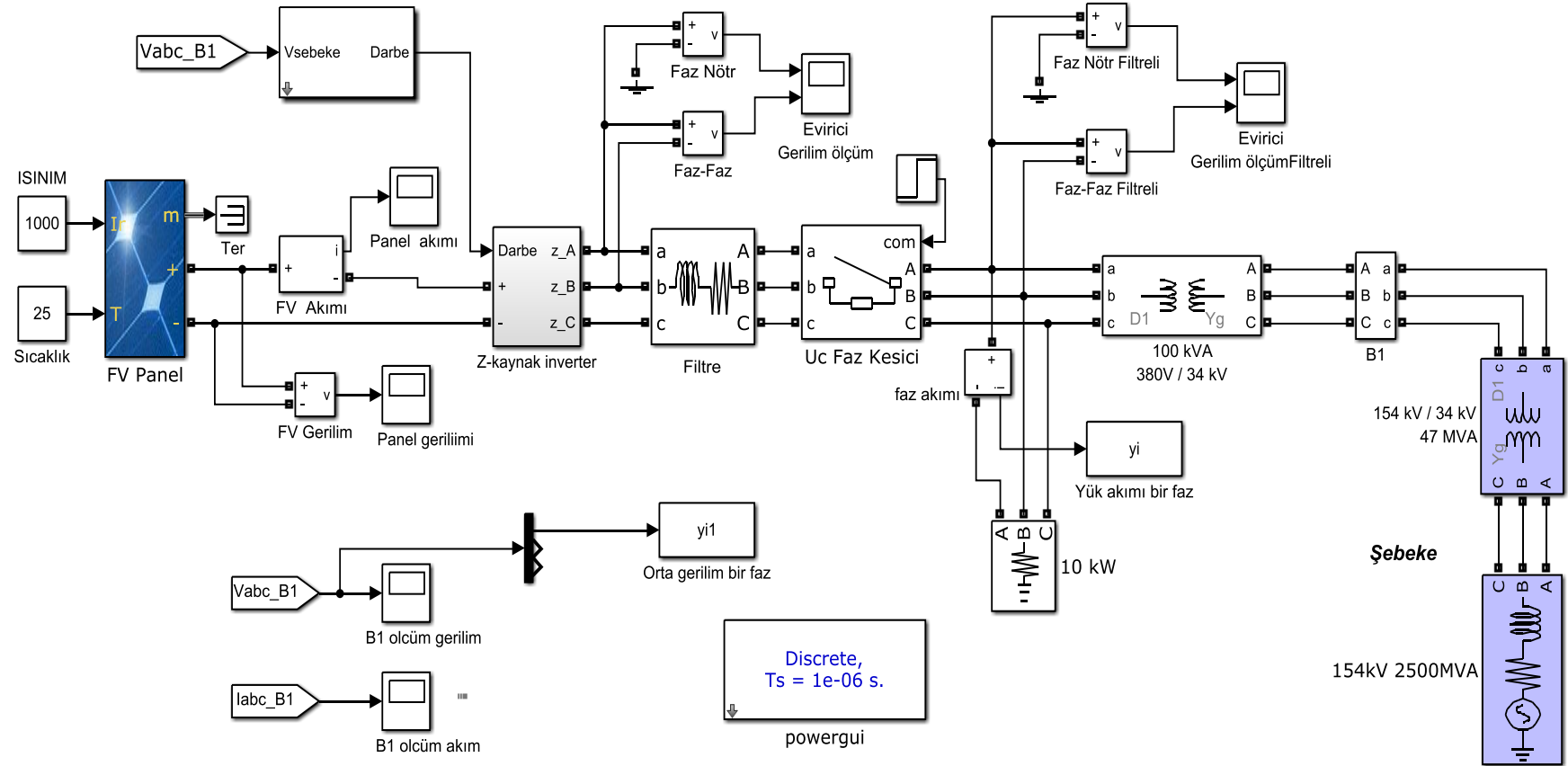
Tablo 5.4. SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV panelin katalog verileri (ışınım değeri: 1000W/m², hücre sıcaklığı: 25°C)

Parametre	Parametre Değeri
Nominal güç, P _{nom}	305 W
Kısadevre akımı, I _{sc}	5,96 A
Açıkdevre gerilimi, V _{oc}	64,2 V
Nominal güçte akım, I _{nom}	5,58 A
Nominal güçte gerilim, V _{nom}	54,7 V
Akımın sıcaklık katsayısı (I _{sc})	+3,5mA / °K
Gerilimin sıcaklık katsayısı (V _{oc})	-176,6mV / °K
Gücün sıcaklık katsayısı (P)	-%0,38/° K
Verimlilik (η)	%18,7
Maksimum sistem gerilimi (IEC)	1000 V

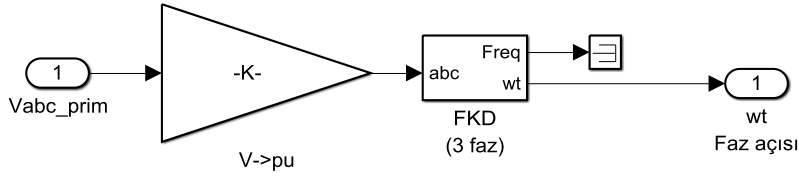
5.3. Tüm sistemin modellenmesi

Üç fazlı şebeke bağlantılı Z-kaynak Evirici Temelli FV Güç Üretim Sisteminin analizi Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetimlerle yapılmıştır. Z-Kaynak Evirici Temelli FV Güç Üretim Sisteminin benzetim modeli Şekil 5.16'da verilmiştir. Benzetim modeli ana hatlarıyla FV Panel, Z kaynak evirici, SDGM anahtarlama, bağlantı indüktansı, hat ayırıcı, üç faz yük ve şebeke bölümlerinden oluşmaktadır.

Önerilen modelde Şekil 5.1'de verilen Z-kaynak evirici modeli kullanılmıştır. Tüm sistemin modellenmesinde değiştirilen parametrelere metin içerisinde değerleri verilerek belirtilmiştir. Z-kaynak evirici kontrol yönteminde şebeke ile uyum sağlanması için şebeke faz açısı Faz Kilitli Döngü (FKD) bloğu kullanılarak ölçülmüştür. FKD ölçüm bloğu Şekil 5.17'de gösterilmiştir. FKD ölçüm bloğu eklenmiş SDGM modeli Şekil 5.18'de verilmiştir. FV panel olarak Şekil 5.11 verilen Matlab/Simulink FV paneli kullanılmıştır. 100 adet güneş panelinin paralel ve 8 adet güneş panelinin seri olarak bağlanması ile elde edilen akım, gerilim değerleri benzetim ortamında da elde edilmektedir. FV panel modeli SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV paneli olup parametre değerleri Tablo 5.4'de mevcuttur. Benzetim modelinde 10kW'lık bir yük kullanılmıştır.

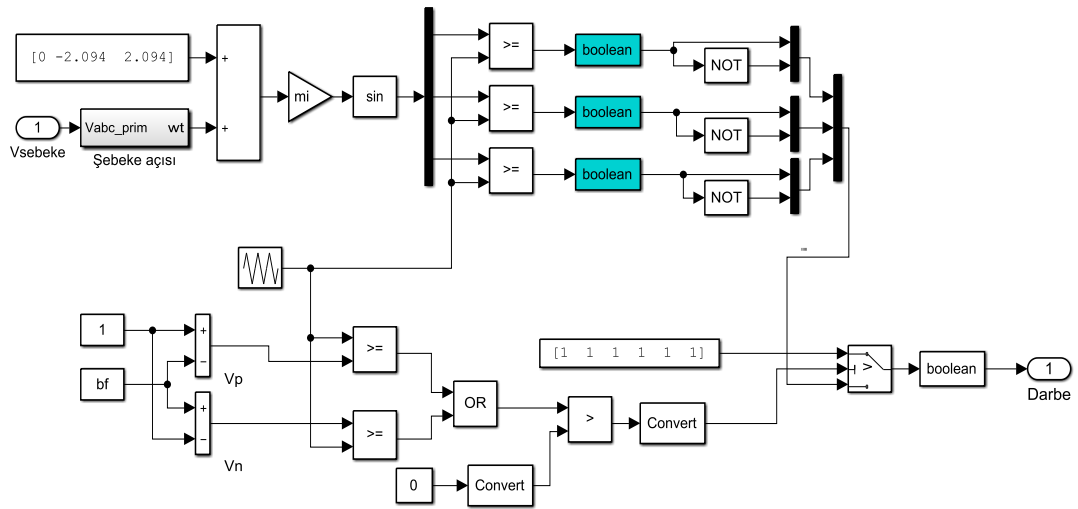


Şekil 5.16. Z-Kaynak evirici temelli fotovoltaik güç üretim sistemi benzetim modeli



Şekil 5.17. FKD ölçüm bloğu

Şekil 5.17’de K parametresi orta gerilim ile uyum sağlamak amacıyla $3.6022 \cdot 10^{-5}$ kullanılmıştır. Şekil 5.18’de referans sinyali faz açıları radyan cinsinden 2.094 olarak verilmiştir. Şekil 5.18’de mi modülasyon indeksini ve bf ise darbe genişliğini göstermektedir.

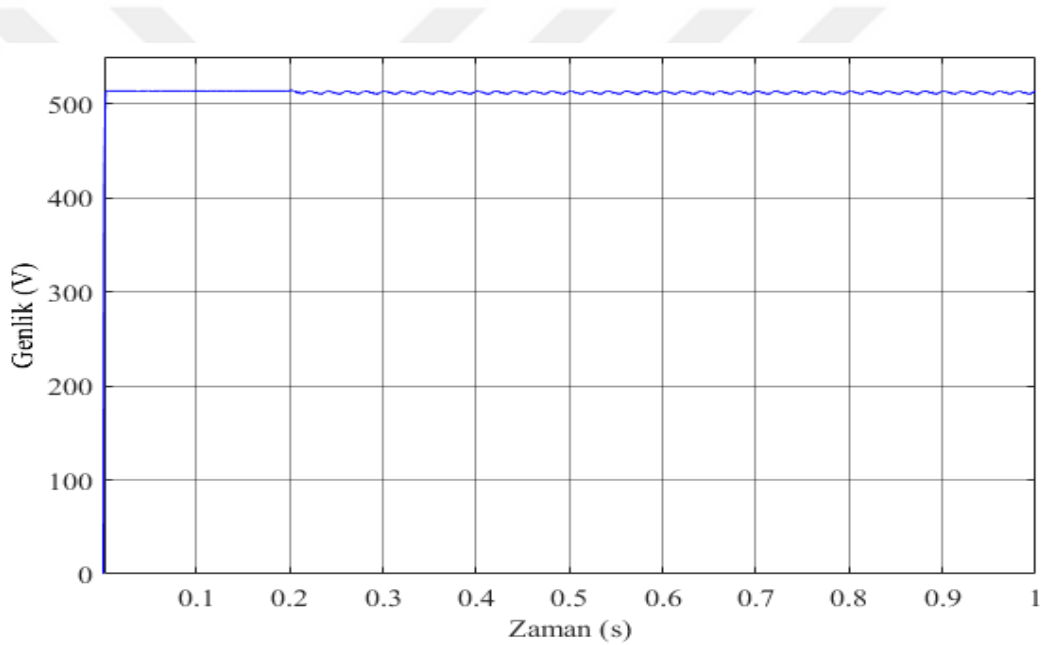


Şekil 5.18. FKD ölçüm bloğu eklenmiş SDGM anahtarlama modeli

5.4. Benzetim sonuçları

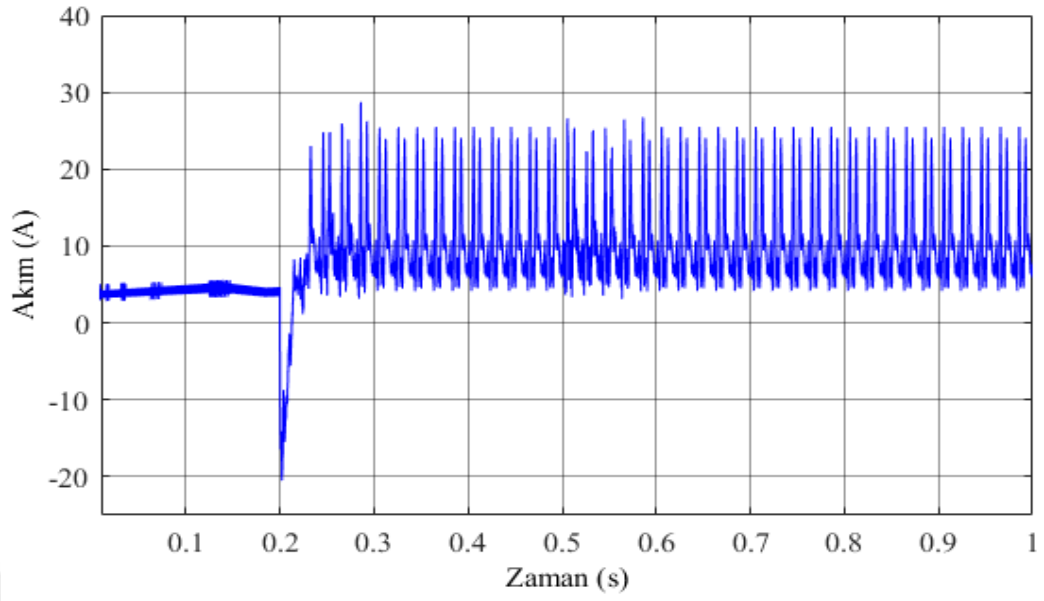
Benzetimde faz gerilimi için $220\sqrt{2}V$, hat gerilimi için $380\sqrt{2}V$, orta gerilim 34kV ve yüksek gerilim üretici 154kV ile şebeke standartları amaçlanmıştır. Matlab/Simulink ortamında oluşturulan Z-kaynak evirici temelli FV güç üretim sistem modeli benzetim sonuçlarını elde etmek için toplam 1 saniye boyunca çalıştırılmıştır. Hat ayırıcı 0.2 s’de devreye sokulmuştur. Z-kaynak evirici anahtarlama sırasında kullanılan SDGM tekniğinde modülasyon indeksi 0.9 taşıyıcı frekansı 20kHz seçilmiştir. Z-kaynak evirici darbe genişliği

yükseltici modda çalışılması amacıyla 0.2 olarak ampirik yolla bulunmuştur. B faktörü Denklem (4.9)'a göre 2.0903 olarak hesaplanmıştır. Darbe genişliği arttıkça artan THD'yi düşürmek için evirici çıkışı bağlantı indüktansı kullanılmıştır. İletim empedansı parametreleri $R=10\Omega$ ve $L=5\text{mH}$ ampirik yolla bulunmuştur. Modelde FV panelinin ışıyım değeri 1000W/m^2 , sıcaklık ise 25°C 'de sabit tutulmuştur. Sıcaklık gerilimi, güneş ışıyım seviyesi akımı etkilediğinden sıcaklık ve güneş ışıyım değeri değişirse, FV panelinin çıkış voltajı ve akımı bu değişikliklerden etkileneceklerdir. Benzetimde 8 adet seri ve 100 adet paralel hücre kullanılarak panel oluşturulmuştur. Z-kaynak evirici panelden yaklaşık 513.8V DA gerilim ile beslenip çıkışında üç faz AA şebeke beslenmiştir. Şekil 5.19'da SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV panelin ürettiği gerilim dalga şekli verilmiştir.



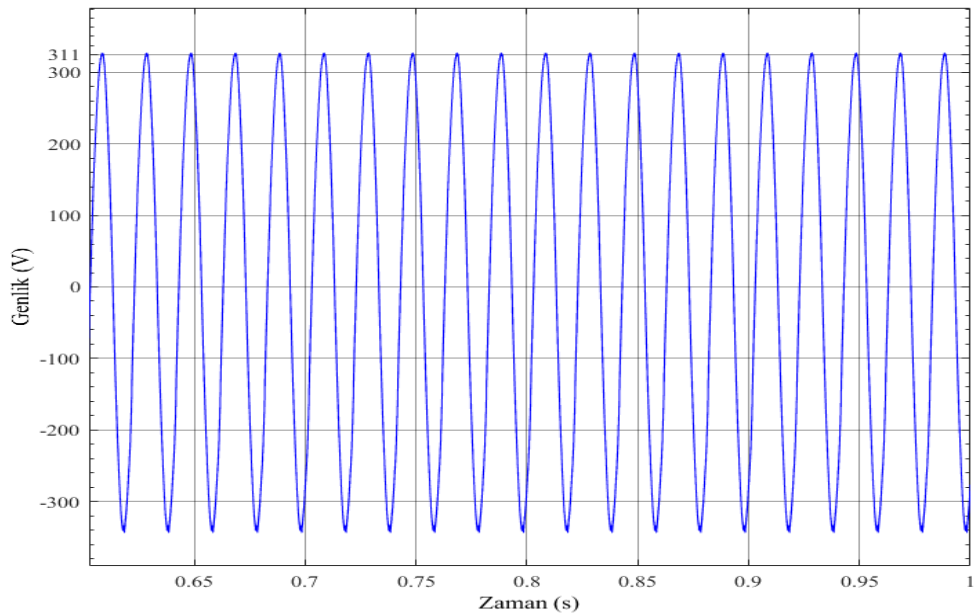
Şekil 5.19. SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV Panel gerilimi (V_{iv})

Şekil 5.19 incelendiğinde 0.2 s'den itibaren hat ayırıcı devreye girdikten sonra sistemin yüklenmesine bağlı olarak FV panel geriliminde dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Şekil 5.20'de ise SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV panelden çekilen akım dalga şekli verilmiştir.

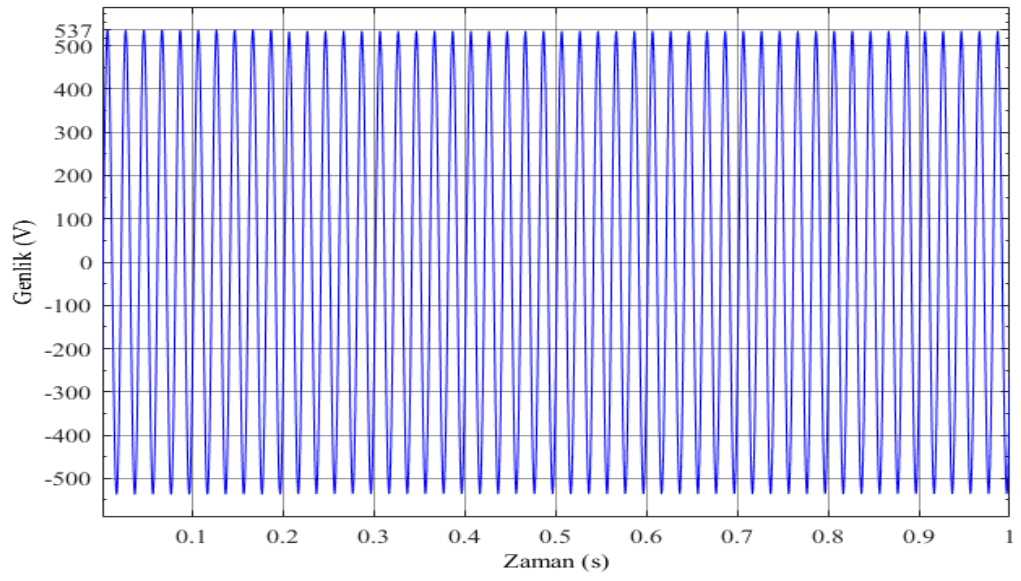


Şekil 5.20. SunPower SPR-305E-WHT-D tipi FV Panel akımı

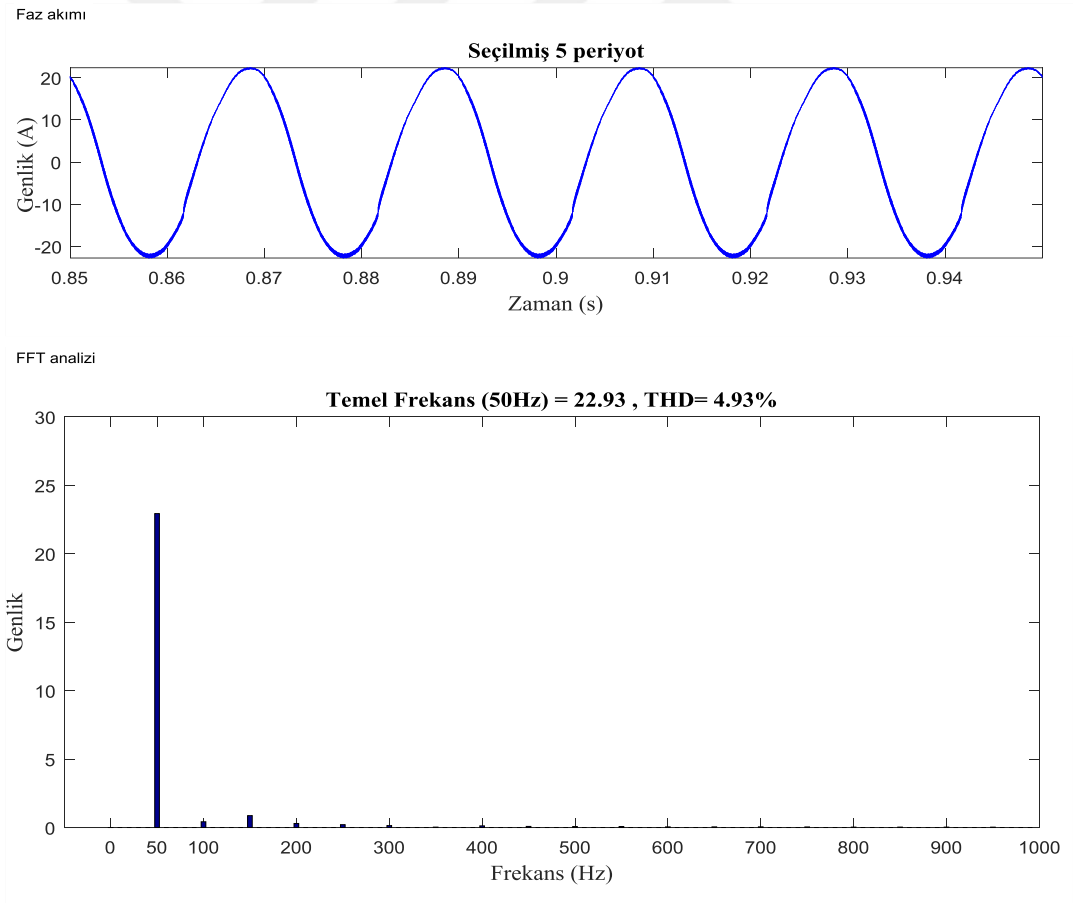
Şekil 5.20’den görüleceği gibi hat ayırıcı devreye girdikten sonra FV panel sisteme güç sağlamıştır. Z-Kaynak evirici temelli FV güç üretim sistemine ait faz gerilimi Şekil 5.21’de ve hat gerilimi ise Şekil 5.22’de verilmiştir.



Şekil 5.21. Z-Kaynak evirici temelli FV güç üretim sistemine ait faz gerilimi



Şekil 5.22. Z-Kaynak evirici temelli FV güç üretim sistemine ait hat gerilimi



Şekil 5.23. Yüken bir fazına ait a) Çıkış hat akımı b) Harmonik spektrumu

Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’den görüleceği gibi tasarlanan FV güç üretim sistemi şebeke standartlarını yaklaşık olarak sağlamaktadır. Şekil 5.23’de yükün bir fazına ait akımının seçilmiş beş periyodu ve harmonik analizi verilmiştir. Şekil 5.23 incelendiğinde yükün bir fazdan yaklaşık olarak tepe değeri 22.93A akım çektiği gözlenmiştir. Ayrıca çekilen akımın %4.93 THD’ye sahip olması sistemin standartlara uygun olduğu göstermektedir.



6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında şebeke bağlantılı Z-Kaynak Evirici Temelli FV güç üretim sistemi Matlab/Simulink ortamında modellenmiştir ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Modelde gerçek uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılan geleneksel tasarımlarla karşılaştırıldığında en yüksek verimliliğe ve performansa sahip SunPower SPR-305E-WHT-D hücre tipi FV panel dizisi kullanılmıştır. Modelimizde güç (DA-AA) dönüştürücü olarak FV güç üretim sistemleri için gelecek vadeden avantajlarından dolayı Z-kaynak evirici kullanılmıştır. Z-kaynak eviriciler gerilimi hem düşürücü hem de yükseltici özelliğe sahiptir. Geleneksel gerilim ve akım kaynaklı eviriciler ile gerçekleştirilemeyen bu özellik, güç kaynağı ve evirici arasına bir empedans ağı yerleştirilerek gerçekleştirilir. Z-kaynak evirici yapısı itibarıyla yükseltme faktörü ile giriş geriliminden daha yüksek seviyede çıkış gerilimi üretebilecek şekilde tasarlanmıştır. Geleneksel FV güç üretim sistemleri ile karşılaştırıldığında kullanılan güç anahtar sayısı azaldığından anahtarlama kayıpları da azalacaktır. Böylelikle sistemin verimliliği artmaktadır. Bu sayede FV panel dizisi doğrudan evirici bölümüne bağlanabilir. Z-kaynak evirici için anahtarlama tekniği olarak karmaşık olmayan SDGM yöntemi seçilmiştir. SDGM tekniğinde anahtarlama hızlı bir şekilde yapıldığı için anahtarlama kayıpları en az seviyede olur. Bu sayede gerilim düşüşleri yok denecek kadar az olmaktadır.

Matlab/Simulink ortamında oluşturulan Z-kaynak evirici temelli FV güç üretim sistem modeli benzetim sonuçlarını elde etmek için toplam 1 saniye boyunca çalıştırılmıştır. Benzetim çalışmalarında FV panel giriş parametresi olan ışıınım değeri 1000 W/m^2 ve panel sıcaklığı 25°C de sabit tutulmuştur. FV panel dizisi 100 paralel 8 seri SunPower SPR-305E-WHT-D hücre kullanılarak elde edilmiştir. Hazırlanan model ile 10 kW'lık yük beslenmiştir. Z-kaynak evirici SDGM parametreleri darbe genişliği 0.2, modülasyon indeksi 0.9 ve taşıyıcı frekansı 20kHz seçilerek arzu edilen çıkışına ulaşılmıştır. Tasarlanan sistemin çıkış gerilim büyüklükleri faz gerilimi tepe değeri 311V ve hat gerilimi ise tepe değeri 537V ile şebeke beklentilerini karşılayabildiği gözlenmiştir. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar Z-kaynak evirici düşük besleme gerilimi ile şebeke standart çıkış gerilim değerlerini sağladığını göstermektedir.

İleriye dönük olarak;

1. Geleneksel iki seviyeli eviricilerin yerine çok seviyeli eviricilerin kullanılarak FV güç üretim sistemlerinin performansı üzerindeki değişikliklerin incelenmesi,
 2. Literatürde çeşitli Maksimum Güç Noktası (MGN) teknikleri mevcut olup bunlardan en çok tercih edilen ve yüksek verime sahip olanların performansa etkileri,
 3. Farklı evirici topolojilerinin tespit edilerek sistemlerde yüksek verim sağlanması ve mevcut bileşen sayılarının azaltılması, örneğin: Yarı Z-kaynaklı evirici (QZSI)
 4. Farklı filtreleme tekniklerinin kullanılarak sistemin değerlendirilmesi,
 5. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) ülke genelinde kullanımının yaygınlaştırılması,
- gibi konularda çalışmaların yapılması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Çetin, E.**, 2002, Sıfır Akım Anahtarlama Tekniğinin AC Besleme Yapan Bir Fotovoltaik Enerji Dönüşüm Sistemine Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- [2] **Bahtiyar, B.**, 2006, Fotovoltaik Sistemler İçin Gerçek Zamanlı Bir İzleme Merkezi Tasarım Ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
- [3] **Tang, Y., and Li, L.**, 2013, Control Of Series Z-Source İnverter Applied İn Grid-Tied PV System, *8th In Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 19-21 June 2013, Melbourne, VIC, Australia, 1227-1232.
- [4] **Türk, B.E.**, 2008, Yakıt Pilleri İçin Empedans Kaynaklı İnverter Tasarımı Ve Bir Uygulama Devresinin Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] **Peng, F. Z.**, 2003, Z-source inverter, *IEEE Transactions on industry applications*, **39(2)**, 504-510.
- [6] **Vidhyarubini, N., and Rohini, G.**, 2011, Z-source inverter based photovoltaic power generation system. In *Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT)*, 23-24 March 2011, Nagercoil, India, 29-34.
- [7] **Çolak, İ., ve Kabalcı, E.**, 2008, Evirici topolojileri ve gelişimleri üzerine bir inceleme, *Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı*, 26-30 Kasım 2008, Bursa, Türkiye 1-5.
- [8] **Çelik, Z., Yılmaz, A. S., ve Sert, E.** 2015, Mikro Şebeke Bağlantılı Güneş Enerji Üretim Sistemlerinin Kontrolü, *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **18(2)**, 41-48.
- [9] **Çalıkoglu, S.**, 2010, Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Güç Sistemleri İle Elektrik Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [10] **Sefa, İ., ve Altın, N.**, 2009, Güneş Pili İle Beslenen Şebeke Etkileşimli Eviriciler- Genel Bir Bakış, *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, **24(3)**, 409-424.
- [11] **Li, Y., Anderson, J., Peng, F. Z., and Liu, D.**, 2009, Quasi-Z-source inverter for photovoltaic power generation systems, *In Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 21 March 2009, Washington, DC, USA, 918-924.

- [12] **Kaya, V.**, 2014, Z Kaynak Eviricilerin Modellenmesi Ve Benzetimi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [13] **Supatti, U., and Peng, F. Z.**, 2008, Z-source inverter based wind power generation system. *In Sustainable Energy Technologies ICSET*, 24-27 Nov. 2008, Singapore, 634-638.
- [14] **Huang, Y., Shen, M., Peng, F. Z., and Wang, J.**, 2006, Z -Source Inverter for Residential Photovoltaic Systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, **21(6)**, 1776-1782.
- [15] **Tang, Y., Wei, J., and Xie, S.**, 2013, Grid-tied photovoltaic system with series Z-source inverter, *IET Renewable Power Generation*, **7(3)**, 275-283.
- [16] **Sezen, S.**, 2015, Üç Fazlı Şebeke Bağlantılı Çok Seviyeli Evirici Kullanarak Aktif Filtreleme Yeteneğine Sahip Fotovoltaik Sistemin Tasarımı Ve Uygulanması, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [17] <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Temiz-Enerji>, 15 Haziran 2017.
- [18] <http://www.enerjibes.com/yenilenebilir-enerji-kaynaklari-nelerdir/>, 15 Haziran 2017.
- [19] <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes> , 15 Haziran 2017.
- [20] <http://www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx>, 15 Haziran 2017.
- [21] <http://www.enerjiatlasi.com/gunes/karatay-kizoren-ges.html>, 15 Haziran 2017.
- [22] **Abu-Rub, H., Iqbal, A., Ahmed, S. M., Peng, F. Z., Li, Y., and Baoming, G.**, 2013, Quasi-Z-source inverter-based photovoltaic generation system with maximum power tracking control using ANFIS, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **4(1)**, 11-20.
- [23] MATLAB version 7.10.0. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
- [24] **Sun, D., Ge, B., Bi, D., and Peng, F. Z.**, 2013, Analysis and control of quasi-Z source inverter with battery for grid-connected PV system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **46**, 234-240.
- [25] **Öztürk, M.**, Pil/Akü Kullanımı Ve Atık Piller İle Akülerin Zararları, <http://www.solar-academy.com/menus/pil-ak%C3%BC-kullan%C4%B1m%C4%B1-at%C4%B1k-zararlar%C4%B1045629.pdf>, 15 Haziran 2017.
- [26] **Oum, J. H., Lim, Y. C., & Jung, Y. G.**, 2007, Z-source active power filter with a fuel cells source, *7th In Power Electronics ICPE'07*, 22-26 Oct. 2007, Daegu, South Korea, 467-471.

- [27] **Shen, M., Joseph, A., Wang, J., Peng, F. Z., and Adams, D. J.,** 2007, Comparison of traditional inverters and Z-source inverter for fuel cell vehicles, *IEEE Transactions on Power Electronics*, **22(4)**, 1453-1463.
- [28] <http://elenups.es/Uploads/GenelDosya/1932014114450249.pdf>, 15 Haziran 2017.
- [29] **Çeker, S.,** 2010, Üç Fazlı İnverterler İle Şebekeye Enerji Aktarımının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [30] <http://www.revolusun.com/documents/sunpowers-pr-305-wht-en.pdf>, 15 Haziran 2017.
- [31] **Oum, J. H., Lim, Y. C., & Jung, Y. G.,** 2007, Z-source active power filter with a fuel cells source, *7th In Power Electronics ICPE'07*, 22-26 Oct. 2007, Daegu, South Korea, 467-471.
- [32] **Shen, M., Joseph, A., Wang, J., Peng, F. Z., and Adams, D. J.,** 2007, Comparison of traditional inverters and Z-source inverter for fuel cell vehicles, *IEEE Transactions on Power Electronics*, **22(4)**, 1453-1463.
- [33] **Başaran, Ç.,** 2007, Tek Fazlı Gerilim Kaynaklı İnvertörlerin Çıkış Harmoniklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [34] **Sivaraman, P., and Desanayagi, R.,** 2013, Performance analysis of PV fed single phase T-source inverter. *In Power, Energy and Control (ICPEC)*, 6-8 Feb. 2013, Sri Ranganalatchum Dindigul, India, 266-271.
- [35] **Gow, J. A., and Manning, C. D.,** 1999, Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies, *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, **146(2)**, 193-200.
- [36] **Kim, W., Duong, V. H., Nguyen, T. T., and Choi, W.,** 2013, Analysis of the effects of inverter ripple current on a photovoltaic power system by using an AC impedance model of the solar cell, *Renewable energy*, **59**, 150-157.
- [37] **Oh, S. Y., Jung, Y. G., Lim, Y. C., Kim, D. K., and Song, S. G.,** 2010, Three-phase Z-source hybrid active power filter system, *In Electrical Machines and Systems ICEMS*, 10-13 Oct. 2010, Incheon, South Korea, 391-396.
- [38] **Ahmed, T., Mekhilef, S., and Nakaoka, M.,** 2013, Single phase transformerless semi-Z-source inverter with reduced total harmonic distortion (THD) and DC current injection, *In ECCE Asia Downunder (ECCE Asia)*, 3-6 June 2013, Melbourne, VIC, Australia, 1322-1327.

- [39] **Ge, B., Abu-Rub, H., Peng, F. Z., Lei, Q., de Almeida, A. T., Ferreira, F. J., ... and Liu, Y.,** 2013, An energy-stored quasi-Z-source inverter for application to photovoltaic power system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **60(10)**, 4468-4481.
- [40] **Gopinath, C., and Ramesh, R.,** 2011, Design and implementation of Z-source inverter based DVR, *European Journal of Scientific Research*, **57(3)**, 514-523.
- [41] **Liu, Y., Ge, B., Abu-Rub, H., and Peng, F. Z.,** 2013, Control system design of battery-assisted quasi-Z-source inverter for grid-tie photovoltaic power generation, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **4(4)**, 994-1001.
- [42] **Ge, B., Peng, F. Z., Abu-Rub, H., Ferreira, F. J., and de Almeida, A. T.,** 2014, Novel energy stored single-stage photovoltaic power system with constant DC-link peak voltage, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **5(1)**, 28-36.
- [43] **Meshram, S., Agnihotri, G., and Gupta, S.,** 2013, An Efficient Z-Source Inverter based Solar Power Generation System Fed IM Drive, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, **4(1)**, 1-6.
- [44] **Ropp, M. E., and Gonzalez, S.,** 2009, Development of a MATLAB/simulink model of a single-phase grid-connected photovoltaic system. *IEEE transactions on Energy conversion*, **24(1)**, 195-202.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi : 20/08/1987
Doğum Yeri : Osmaniye
Lise : Mehmet Rüştü Uzel Anadolu Meslek Lisesi (2001–2005)
Lisans : Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Öğretmenliği (2007–2011)
Yüksek Lisans : Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı (2011-2017)
İlgi Alanları : Fotovoltaik güç sistemleri, Z-kaynak evirici