T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ KAYNAKLARI VE YÖNETİMİ ANABİLİM DALI

GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNDE VERİMLİLİĞİ ETKİLEYEN REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYON PARAMETRESİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇETİN ÇAĞRI EROĞLU

Tez Danışmanı
DOÇ. DR. ARZU KURT

ÇANAKKALE – 2024

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ KAYNAKLARI VE YÖNETİMİ ANABİLİM DALI

GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNDE VERİMLİLİĞİ ETKİLEYEN REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYON PARAMETRESİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇETİN ÇAĞRI EROĞLU

Tez Danışmanı
DOÇ.DR. ARZU KURT

ÇANAKKALE – 2024

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Çetin Çağrı EROĞLU tarafından Doç. Dr. Arzu KURT yönetiminde hazırlanan ve **25/04/2024** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan "**Güneş Enerji Santrallerinde Verimliliği Etkileyen Reaktif Güç Kompanzasyon Parametresinin İncelenmesi**" başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Enerji Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Doç. Dr. Arzu KURT (Danışman)	……
Doç Dr. Sabri BIÇAKÇI	……
Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer YÜCEL	…….

Tez No : ……..
Tez Savunma Tarihi : 25/04/2024

Prof. Dr. Ahmet Evren ERGİNAL
Enstitü Müdürü

…../……/2024

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Çetin Çağrı EROĞLU

25/04/2024

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, çalışmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen saygı değer danışman hocam Doç.Dr. Arzu KURT ve Prof.Dr.Mustafa KURT hocama , çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen eşim Tuba DALBUDAK EROĞLU kızlarım Mehlika Nil EROĞLU ve İpek EROĞLU hayatımın her evresinde bana destek olan değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çetin Çağrı EROĞLU

Çanakkale, Nisan, 2024

ÖZET

GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNDE VERİMLİLİĞİ ETKİLEYEN REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYON PARAMETRESİNİN İNCELENMESİ

Çetin Çağrı EROĞLU
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Doç.Dr. Arzu KURT
25/04/2024, 56

Fosil kaynak rezervlerinin her geçen gün azalmasıyla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi artmaktadır. Yenilenebilir enerji çoğunlukla rüzgar, güneş ve hidroelektrik sistemler tarafından üretilir. Bu çalışma kapsamında yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerji santrallerinde reaktif güç kompanzasyon parametrelerinin santral verimliliğine etkisi araştırılmıştır.

Bir enerji sisteminin kesintisiz ve sorunsuz çalışabilmesi için sistem kararlılığının sağlanması gerekir. Artan enerji talebi kararlılık sorunları yaratmaktadır. Bu çalışmada sistemin kararlılığını etkileyen parametrelerden biri olan kompanzasyon sistemi üzerinde durulmaktadır. Reaktif güç kompanzasyonu, bir fotovoltaik sistemin gerilim stabilitesini düzenlemek için kullanılır. Güneş enerjisi sistemleri için güç faktörünün doğru belirlenmesi çok önemlidir. Çalışma kapsamında santral için kompanzasyon parametresi kompanzasyon yapılmadan önce ve kompanzasyon yapıldıktan sonra veriler incelenmiş olup santral verimindeki değişimler gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aktif Güç, Reaktif Güç, Güç Faktörü, Kompanzasyon, PV, Sistem Kararlılığı

ABSTRACT

INVESTIGATION OF REACTIVE POWER COMPENSATION PARAMETER AFFECTING EFFICIENCY IN SOLAR POWER PLANTS

Çetin Çağrı EROĞLU

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Department of Energy Resources and Management

Advisör: Assoc. Prof. Dr. Arzu KURT

25/04/2024, 56

As fossil resource reserves decrease day by day, interest in renewable energy sources is increasing. Renewable energy is mostly produced by wind, solar and hydroelectric systems. Within the scope of this study, the effect of reactive power compensation parameters on power plant efficiency in solar power plants, which are renewable energy sources, was investigated.

In order for an energy system to operate uninterruptedly and smoothly, system stability must be ensured. Increasing energy demand creates stability problems. This study focuses on the compensation system, which is one of the parameters affecting the stability of the system. Reactive power compensation is used to regulate the voltage stability of a photovoltaic system. It is very important to determine the power factor correctly for solar energy systems. Within the scope of the study, the compensation parameter data for the power plant were examined before and after compensation, and the changes in the power plant efficiency were observed.

Keywords: Active Power, Reactive Power, Power Factor, Compensation, PV, System Stability

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

JÜRİ ONAY SAYFASI……..……... i
ETİK BEYAN…… ii
TEŞEKKÜR…….. iii
ÖZET ……..…….…….. iv
ABSTRACT …….. v
İÇİNDEKİLER ……..…… vi
SİMGELER ve KISALTMALAR…….....……. ix
TABLOLAR DİZİNİ…….…. x
ŞEKİLLER DİZİNİ……..……...…….….. xi

BİRİNCİ BÖLÜM
GİRİŞ 1

İKİNCİ BÖLÜM
KURAMSAL ÇERÇEVE 2

2.1. Şebeke Güç Denegelemesi İle İlgili Kompanzasyon Çalışmaları…….. 2

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
MATERYAL YÖNTEM 5

3.1. Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi…….....……... 5
3.1.1. Güneş Enerjisinden Elektrik Üretme Yöntemleri...……...……..…… 6
3.2 Fotovoltaik Elektrik Üretimi……...……... 6
3.2.1 Solar Pillerin Çalışma Prensibi…….....…….……..….. 9
3.2.2 Güneş Pilinin Eşdeğer Devresi ve Matematiksel Modeli.....…….……..….. 11
3.2.3 PV Panel Çeşitleri….……..……...…….……..…… 15
Monokristal PV Panel……. 16
Polikristal PV Panel…… 17
İnce Film PV Panel……. 18

3.3. Solar Panellerin Karakteristikleri……... 19
3.3.1 PV Sistemlerin Çalışmasını Etkileyen Faktörler…… 20
3.3.2 Solar Panellerde Verimlilik……...……...……... 23
3.4. PV Sistem Bağlantı Şekilleri…...……... 24
3.4.1 Şebeke Bağlantısız PV Santraller (Off Grid)..……...…… 24
3.4.2 Şebeke Bağlantılı PV Santraller (On Grid)……..……...…… 25
3.4.3 Hibrit PV Santraller……...…...…… 27
3.5. Reaktif Güç Kompanzasyonu……. 27
3.5.1 Kompanzasyon İle İlgili Yönetmelik Maddeleri……. 30
Yeni Kurulan Tesislerde Kompanzasyon…… 31
Reaktif Enerji Tarifesi……. 31
3.5.2 Kompanzasyon Çeşitleri……. 32
Tek Tek Kompanzasyon…..……..... 32
Grup Kompanzasyon…….. 33
Merkezi Kompanzasyon……. 33
Şönt Kompanzasyon……... 34
Seri Kompanzasyon…… 35
3.5.3 FACTS Cihazları…… 36
Statik VAR Kompanzatör (SVC)……... 37
Tristör Kontrollü Reaktör (TCR)…… 39
Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM)……... 39

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA BULGULARI 41

4.1. Güneş Enerji Santrali Genel Bilgiler……....…….…..... 41
4.2. Santralde Kullanılan Ekipmanlar ve Özellikleri……...……...…….…..... 42
4.2.1 Solar Panel……... 42
4.2.2 Solar İnverter……... 43
4.2.3 Hücreler ve Beton Köşkler…….. 45
4.3. Verim Analizi……. 48
4.4. Düzeltici Faaliyetler…….. 50

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ ve ÖNERİLER 53

KAYNAKÇA 54
EKLER I
EK 1. TÜRKİYE MÜLKİ İDARE HARİTASI II
ÖZGEÇMİŞ III

SİMGELER VE KISALTMALAR

E	Solar parlaklık
E_{ref}	Referans solar parlaklığı (kW/m^2)
T_j	Kesişme noktası sıcaklığı
P_{max}	Maksimum güç
V_{mp}	Maksimum güç noktası gerilimi
I_{mp}	Maksimum güç noktası akımı
I_{sc}	Kısa devre akımı
K_v	Sıcaklık katsayısı
η	Verim
P	Aktif güç (W)
Q	Reaktif güç (VAr)
S	Görünür güç (VA)
FF	Dolum faktörü
T_{ref}	Referans hücre sıcaklığı

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	HSA Firmasının HSA72M10MF-530PV Panel Karakteriksitleri	19
Tablo 2	PV Panellere Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi	23
Tablo 3	Huawei Sun 2000 KTL-M1 Solar İnverter Datasheet	44
Tablo 4	Aylık Üretim Değerleri Tablosu	48
Tablo 5	Güç Üretim ve Tüketim Değerleri Tablosu	48
Tablo 6	İnverterlerin Güç Faktörü Değerleri	52

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Atmosferdeki karbondioksit oranının yıllara göre değişimi	6
Şekil 2	Türkiye'nin güneş enerji potansiyeli	7
Şekil 3	Türkiye'nin aylık ortalama radyasyon dağılım grafiği	8
Şekil 4	Güneş hücreleri	8
Şekil 5	Fotovoltaik etki	9
Şekil 6	PV hücrelerin iç yapısı	10
Şekil 7	PV hücrelerin çalışma tekniği	11
Şekil 8	Solar pil eşdeğer devre modeli	11
Şekil 9	Fotovoltaik modül için eşdeğer devre modeli	13
Şekil 10	PV hücre,modül ve dizi tasarımları	14
Şekil 11	PV modüllerin seri bağlantısı	14
Şekil 12	PV modüllerin paralel bağlantısı	15
Şekil 13	Fotovoltaik hücre çeşitleri	16
Şekil 14	Monokristal PV panel	17
Şekil 15	Polikristal PV panel	17
Şekil 16	İnce film PV panel	18
Şekil 17	Hücrelerdeki verim yıllara göre karşılaştırması	18
Şekil 18	PV modülün I-V ve P-V karakteristiği	19
Şekil 19	PV modülün sıcaklık ve ışınıma bağlı P-V karakteristiği	20
Şekil 20	PV modülün kısa devre akımı ve açık devre gerilimi ilişkisi	21
Şekil 21	HSA72M10MF-530 modülünün farklı sıcaklık değerlerinde akım-gerilim eğrisi	21
Şekil 22	HSA72M10MF-530 modülünün farklı ışınım değerlerinde güç-gerilim eğrisi	22

Şekil 23	HSA72M10MF-530 modülüne ait farklı ışınım değerlerinde akım-gerilim eğrisi	22
Şekil 24	Şebekeden bağımsız PV sistemler	24
Şekil 25	Şebekeye bağlı PV sistemler	25
Şekil 26	Merkezi ve dizi inverter	26
Şekil 27	Hibrit PV santral	27
Şekil 28	Güç üçgeni	28
Şekil 29	Kompanzasyon yapılmış devrenin güç üçgeni	29
Şekil 30	Tek tek kompanzasyon şeması	32
Şekil 31	Grup kompanzasyon şeması	33
Şekil 32	Merkezi kompanzasyon şeması	34
Şekil 33	Şönt kompanzasyon	35
Şekil 34	Seri kompanzasyon	36
Şekil 35	FACTS teknolojileri	37
Şekil 36	SVC devre şeması	38
Şekil 37	SVC I-V karakteristiği	38
Şekil 38	TCR devre şeması	39
Şekil 39	STATCOM devre şeması	40
Şekil 40	Güneş enerji santrali	41
Şekil 41	Santralde kullanılan panel bilgileri	42
Şekil 42	Alfa solar A3S72M400 ışınım değerleri	43
Şekil 43	Huawei Sun 2000 100KTL-M1 solar inverter	43
Şekil 44	Huawei Sun 2000 100KTL-M1 solar inverter devre diagram ve verim eğrisi	44
Şekil 45	Beton köşk ve hücreleri	45
Şekil 46	Otoprodüktör hücresi	45
Şekil 47	Kesicili giriş-çıkış hücresi	46

Şekil 48 Yük ayırıcılı sigortalı trafo koruma hücresi 46

Şekil 49 Yük ayırıcılı akım-gerilim ölçü hücresi 47

Şekil 50 Hermetik tip trafo (0,4/31,5 kV) 47

Şekil 51 Santral aylık üretim değerleri grafiği 49

Şekil 52 Aktif üretime göre % verim kaybı grafiği 49

Şekil 53 Reaktif güç kompanzasyon tasarımı ve tek hat şeması 50

Şekil 54 Reaktif güç kompanzasyon panosu 51

BİRİNCİ BÖLÜM
GİRİŞ

Fosil kaynaklarının tüketimi büyük çevre sorunlarına neden olmaktadır. Bu durum yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin her geçen gün artmasına katkıda bulunmuştur. Azalan fosil yakıt kaynakları, nüfus artışı, fiyat dalgalanmaları, sanayileşme ve artan elektrik talebi yenilenebilir enerjiyi daha cazip hale getirmektedir. Günümüzün alternatif enerji kaynakları yeni yüzyılın en önemli enerji kaynakları haline gelecektir. Bu enerji kaynakları arasında, artan teknolojik gelişmeler ve PV sistem maliyetlerinin azalması nedeniyle PV enerji kaynakları gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde farklı şekillerde kullanılmaktadır. Kaynaklar arasında güneş enerjisi, biyokütle, rüzgar, dalgalar, hidrojen vb. bulunur. Esas olarak elektrik üretmek için kullanılır. Elektrik ihtiyacının karşılanmasına yönelik alternatif kaynaklara örnek olarak güneş enerjisi santralleri (GES), rüzgar enerjisi santralleri (RES) ve hidroelektrik santralleridir (HES).

Artan enerji talebi nedeniyle kullanıcılar çeşitli zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte şebeke elemanlarından kaynaklanan harmonik bozulmalar, gerilim düşümleri, gerilim yükselmeleri ve güç faktörü bozulmaları yaygınlaşmaktadır. Bu tüketim kullanıcı tarafında güç faktörünü değiştirir. Herhangi bir kesinti, şebeke tarafındaki enerji akışını ve faturaları etkileyecektir.

Reaktif güçten kaynaklı kararsızlıkların önüne geçilemediği takdirde sistem geriliminde dengesizlik meydana gelecektir. Sistemden ve reaktif güçte artış olması durumunda gerilim düşmeleri meydana gelir. Sistem bu voltaj düşüşünü dengelemek için aşırı akım çekmeye başlar. Aşırı akım çekilmesi hatlarda ısıl kayıpların (I^2R) artmasına, daha yüksek reaktif güç tüketimine ve sistem stabilitesinin bozulmasına neden olur. Uzun süreli çözülmeyen kararsızlıklar gerilim çökmelerine neden olabilir. Sistem arızalarının, kesintilerin ve gerilim çökmelerinin önlenmesi açısından gerilim kararlılığı çalışmaları büyük önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında 999 kWh gücünde güneş enerji santralinin üretim sürecinden itibaren elde edilen üretim değerleri (aktif güç, reaktif güç vb.) analiz edilerek santral verimine etki eden reaktif güç parametresi incelenmiş ve çözüm yolları sunulmuştur.

İKİNCİ BÖLÜM
KURAMSAL ÇERÇEVE

Bu çalışma literatürde, güneş enerjisi santrallerinin ve elektrik şebekesinin güç faktörü konusunu ve gerilim kararlılığı konuları araştırmıştır. Literatürdeki çalışmalara baktığımızda güç faktörü açısından P-Q yönteminin yanı sıra güç elektroniği tabanlı sistemlerin daha olumlu sonuçlar verdiği görülmektedir.

2.1. Şebeke Güç Dengelemesi İle İlgili Kompanzasyon Çalışmaları

Madhuranthaka ve Manohar (2016), bu makalede, güç voltaj ayarlama sistemi probleminde çeşitli FACTS kontrolörlerinin incelemesinde kullanılan ve güç kayıplarını en aza indirmek için FACTS cihazlarının en uygun şekilde düzenlenmesi ve boyutlandırma için uygulanan farklı yöntemlere odaklanmaktadır. Bu çalışmada çeşitli FACTS cihazlarının çalışması açıklanmaktadır. Uygun FACTS kontrolörünün güç sisteminin kararlılığını arttırdığından optimizasyon tekniklerine ilişkin detaylı bir çalışma yürütmüştür. Meta-sezgisel genetik değişikliklerin kullanılması ile mevcut birçok FACTS cihazının değiştirilebilmesi için en uygun konumda bulunması amacını taşımaktadır.

Çöteli ve Aydoğmuş (2007), çalışmalarında DGM-STATCOM'u simüle etmek ve kompansatörün bara gerilim genliğindeki değişikliklere karşı dinamik tepkisini gözlemlemek için MATLAB-Simulink Toolbox kullanılmıştır. Simülasyon programının sonuçları DGM-STATCOM'un sistemin ihtiyaç duyduğu kompanzasyon akımı ile daha kısa sürede (2,5 ms) yanıt vererek bağlı baralara reaktif güç desteği sağladığını göstermektedir. Geleneksel telafi, elektrik şebekesindeki değişikliklere göre çok hızlı bir şekilde gerçekleşir. STATCOM'un enerji nakil şebekesinde meydana gelen değişikliklere çok hızlı tepki vermesi ve şebekeye gerekli reaktif gücü çok kısa sürede sağlaması, enerji iletim ve dağıtım sisteminin dinamik kararlılığı üzerinde olumlu bir etki göstermektedir.

Çifci (2015), araştırmalarında tek makineli sonsuz baraların, azaltılmış tek makineli sonsuz baraların, değiştirilmiş tek makineli sonsuz baraların ve dört baralı enerji sistemlerinin fonksiyon analizini kullanmıştır. VAr statik kompansatörün gerilim kararlılığını iyileştirmeye etkisi araştırılmıştır. İlk olarak SVC'siz bir güç kaynağı modelini ele almıştır. Enerji fonksiyonu analizi daha sonra SVC kullanılarak enerji sistemi modelinde tekrarlanmıştır. Yapılan simülasyon çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır.

Son olarak SVC'li ve SVC'siz güç kaynağı modellerinin voltaj kararlılığını ve SVC'nin etkisini gösterilmiştir. Araştırma sonuçları, farklı düzeylerde bir sistem çalışması sunmuş ve değişken gradyan yönteminin kullanımının, enerji sisteminin kararlı davranışını açıkça ifade edebilen daha iyi bir enerji fonksiyonu sağladığını göstermiştir. Elde edilen sonuçlardan, SVC'nin güç sistemine eklenmesi, güç sisteminin kararlılık sınırını önemli ölçüde arttırmıştır.

Venkata ve Manjunatha (2021), bu çalışmada, şebekeye bağlı bir güneş enerjisi dizisindeki reaktif gücü tetiklemek için STATCOM ve sabit bir kapasitör bankasının nasıl çalıştığını göstermiştir. Bir güneş PV sistemi, bir DC-DC yükseltici dönüştürücünün, şebekeye bağlı bir invertörün ve bir STATCOM gerilim kaynağı invertörünün nasıl tasarlanacağı açıklanmaktadır. Önerilen sistem tüm model MATLAB Simulink yazılım paketi kullanılarak simüle edilmiştir. Şebekeye bağlı fotovoltaik güneş enerjisi serisi sistemi, sabit kapasitör ve STATCOM olmadan ve reaktif güç kompanzasyonu için kapasitör ve STATCOM olmadan farklı çalışma koşulları altında test etmiştir. Simülasyon sistemine göre, şebekeye bağlı güneş PV serisi sisteminin reaktif gücü, yüke bağlı reaktif güç kaynaklarına dayalı olarak STATCOM tarafından etkin,hızlı ve dinamik bir şekilde üretilmektedir. Şebekeye bağlı solar PV serisi işlemleri STATCOM'un reaktif güç kompanzasyonundaki performansının kapasitör bankalarından daha iyi olduğunu ortaya koymuştur.

Said ve Pirouti (2009), çalışmalarında 33KV orta gerilim sistemi için YSA tabanlı FC-TCR kompansatörü seçilmiştir. Örüntü tanıma ve tasarımlarında YSA yetenekleri tasarlanmıştır. Simülasyon çalışmaları modülün farklı sistem koşullarındaki performansı araştırılmıştır. YSA'nın reaktif güç kontrolü ve bağlantı sistemi açısından oldukça doğru ve kullanışlı olduğu görülmüştür. Sistemdeki herhangi bir dengesizliği alarma geçirmekle görevli tristörler için uygun ateşleme açısını bulmada YSA'nın oldukça hızlı ve güvenilir olduğu belirlemişlerdir. Tristörler için uygun ateşleme açısı seçilerek kaynaktan çekilen reaktif güç miktarının önemli ölçüde minimuma indirildiği ve böylece güç faktörünün de iyileştirildiği gösterilmiştir. Üç fazlı akımların dengelenmesi ve dengesizlik faktörünün en aza indirilmesi için önerilen bu uygulamanın herhangi bir dengesizlik durumunda üç fazlı döngü dengesizliği ve dengesizlik faktörünü (INegatif dizi/İpozitif dizi) en aza indirilebilirliği gözlemlemiştir.

Gutierrez ve ark.(2002), bu çalışmalarının amacı, TCR kolunun parlama derecesi değerini kontrol ederek hat akımının rms ve THD değerlerinin minimizasyonudur. Ateşleme açısı küçük olduğunda kompansatör getirisi ve hat akımının harmonik içeriği optimum değerlere ulaşır. Ateşleme açılarının küçük kalması için TCR endüktans yuvası değiştirilerek verilen değere yakın hale getirilmesi gerekiyordu. Bunu başarmak için geleneksel FC-TCR kompansatörünün geleneksel mimarisindeki bazı değişiklikler gerekliydi. Reaktörün anahtarlamalı değişimiyle ,tristörün ateşleme açısını küçük kalmasını zorlayarak güç faktörünü (PF) ve hat akımının toplam harmonik bozulmasını (THDI) iyileştirmediğini göstermiştir. Bu yeni mimaride sabit kapasitör - tristör anahtarlamalı olarak - tristör kontrollü olarak (FC-TSR-TCR) adlandırmıştır. FC-TSR-TCR kompansatörü, doğrusal olmayan yük ve sinüzoidal olmayan gerilim beslemesi durumunda bile sinyalin ve güç faktörünün yükseltilebildiğini ortaya koymuştur.

Rezk ve Hasaneen (2015), çalışmalarında yüksek verimli InGaP/InGaAs/Ge üçlü bağlantılı güneş pilini temel alan yeni bir Matlab/Simulink PV modül modeli önermiştir. Önerilen model, simülasyon platformunda kolay kullanım için PV hücresini, modülünü ve dizisini temsil eder. Model, giriş olarak güneş ışınımını ve modül hücrelerini alır ve çeşitli koşullar altında I–V ve P–V özelliklerini ortaya çıkarır ve ayrıca sıcaklık değişimlerinin hücre özelliklerini üzerindeki koşulları da içerir. Yapay Sinir Ağı tabanlı görüntü sistemi önerilmiştir. MPPT'li genel PV sistemini MATLAB/Simulink'te uygulamıştır. YSA ile PV sisteminin çıkış gücü ve enerjisi, yaygın olarak kullanılan P&O teknolojisiyle elde edilenlerle karşılaştırmıştır. Simülasyon sonuçları, YSA MPPT teknolojisinin kullanımını etkili bir şekilde izlemeyi iyileştirdiğini ve bir PV modülünden günlük çıkış enerjisini 3,37 kWh'den 3,75 kWh'ye, yani %11,28'e çıkardığını ortaya koymuştur. PV'den elde edilen çıkış enerjisindeki bu artış, önerilen tekniğin üstünlüğünü kanıtlamaktadır ve bu, üretilen kWh'nin maliyetinde önemli bir azalmaya sebebiyet vermiştir.

Bhole ve Nigam (2015), bir güç sistemindeki voltaj profilini belirlemek amacıyla SVC'nin optimum yerleşimi ve parametre ayarları için yeni bir yöntem önermiştir. Önerilen yaklaşım WSCC 9-bus sistemi üzerinde yürütülmektedir. SVC'nin optimal performansının seçim kriteri, gerilim profilini korumak, gerilim sapmalarını en aza indirmek ve VSI kullanarak güç kayıplarını azaltmaktır. Test sistemi üzerinde simülasyonlar, uygun şekilde yerleştirilmiş SVC'nin gerilim profilini koruduğu, şebeke kararlılığını iyileştirdiğini ve güç sisteminin çalışmasının etkili bir şekilde artırdığını ortaya koymuştur.

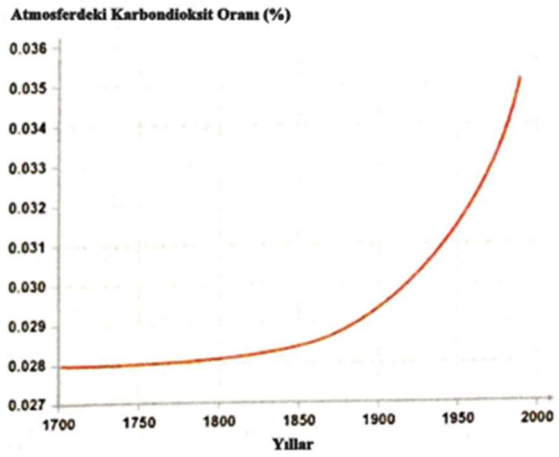
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
MATERYAL VE YÖNTEM

Bu konuyla ilgili yapılan araştırmalara bakıldığında güneş enerjisi santrallerinin gerilim kararlılığının ve reaktif güç faktörü düzenlemesinin farklı yöntem ve teknikler kullanılarak sağlandığı görülmektedir. Güneş enerjisi santrallerinde kullanılan P&Q yönteminin ve yarı iletken tabanlı tristör sistemlerinin olumlu sonuçlar ürettiği görülmüştür. Ayrıca şebeke gelişimi ve değişen koşulları da incelenmiştir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde gerilim kararlılığı ve güç faktörü analizi, kompanzasyon sistemleri ve şebeke yüklerine göre verim analizlerinden bahsedilmektedir.

3.1. Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi

Güneş her zaman yaşamın en önemli kaynağı olarak görülmüştür. Bilimsel ve Endüstriyel Devrimler güneşin bir enerji kaynağı olduğunun anlaşılmasına yol açmıştır. Dünyanın ortam sıcaklığını etkilediği bilinen fosil yakıtların enerji üretiminde yaygın olarak kullanılmasıyla birlikte, günümüzde bu tür keşiflerin önemi daha da yüksek bir noktaya ulaşmaktadır.

Güneş, her gün Dünya'nın ihtiyaç duyduğu enerjiden 10.000 kat daha fazla enerji yaymaktadır. Su, biyoenerji ve rüzgar, toplumların kullandığı enerji kaynaklarıdır ve tümü güneş gücünün türetilmiş halidir. Güneş enerjisinden yararlanan teknoloji, sanayi devrimi'nin ilk yıllarında hızla gelişti. Şimdiye kadar artan toplumların etkinlikleri ile birlikte karbondioksit (CO2) gibi sera gazlarının miktarı da artmış, bu da sıcaklığın 0,6°C artmasının etkisiyle küresel ısınmaya yol açmıştır. Önlem alınamaması durumunda, tahminlere göre, yüzey sıcaklıklarının 1.4 ^{0}C - 5.8 ^{0}C arasında artış sağlayacağı düşünülmektedir. Bu tip gelişmeler; Kuraklığa, sellere, deniz seviyelerinin yükselmesine, buzulların erimesine ve doğal ekosistemlerde ve tarımsal üretimde ciddi hasara sebep olabilir. Bu nedenle ülkelerin bu tür emisyonları azaltmak için fikir birliğine ihtiyaçları bulunmaktadır. Geleneksel enerji kullanım yöntemlerinden yenilenebilir enerji teknolojilerine geçiş yapılarak emisyon azaltımları sağlanabilir. Yıllara göre atmosferdeki karbondioksit değişimi şekil 1'de görülmektedir.(Öztürk ve Kaya, 2013)



Şekil 1. Atmosferdeki karbondioksit oranının yıllara göre değişimi (Öztürk ve Kaya, 2013)

3.1.1.Güneş Enerjisinden Elektrik Üretime Yöntemleri

Solar enerjiden elektrik üretimi için iki yöntem uygulanır:

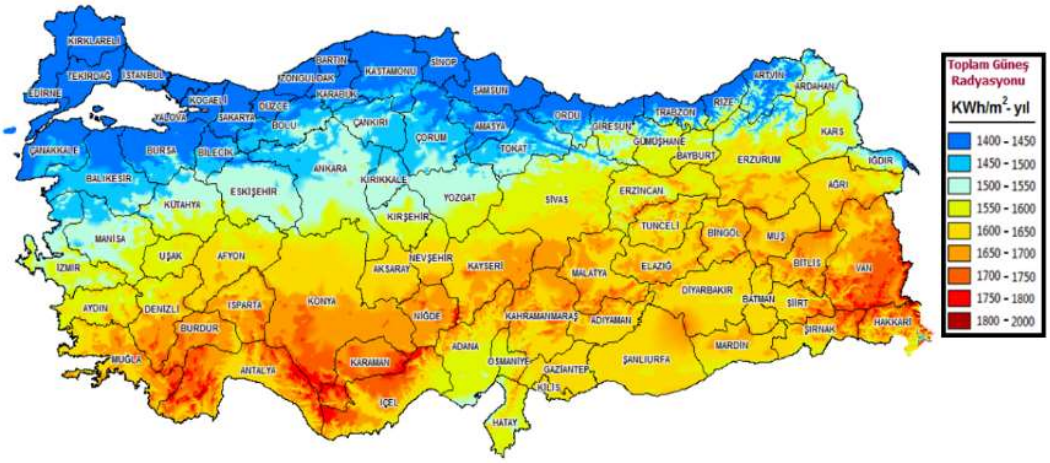
- **Dolaylı yöntem:** Güneş termal yöntemiyle enerji üretimidir. Yoğunlaştırıcı sistemler kullanılarak güneş enerjisinin odaklandırılmasıyla, bilinen yöntemler kullanılarak elde edilen kızgın buhardan enerji üretilir.
- **Doğrudan yöntem:** Fotovoltaik, termoelektrik ve termoiyonik dönüştürücüler yer alır. Büyük miktarlarda elektrik üretmek için yalnızca fotovoltaik sistemler (PV) kullanılır. (Öztürk ve Kaya, 2013)

3.2. Fotovoltaik Elektrik Üretimi

Fotovoltaik, elektrik gücü üreten bir makine geliştiren Alessandra Volta'dan esinlenerek, Yunanca ışık anlamına gelen "photo" ve voltaj anlamına gelen "voltaic" kelimelerinin birleşiminden oluşmuştur. Güneş pilleri ilk kez 1839 yılında Becquerel tarafından incelenmiştir. Güneş enerjisi sistemleri, güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürebilen, mekanik hareketli parçaları bulunmayan, uzun ömürlü ve bakımı kolay sistemlerdir.

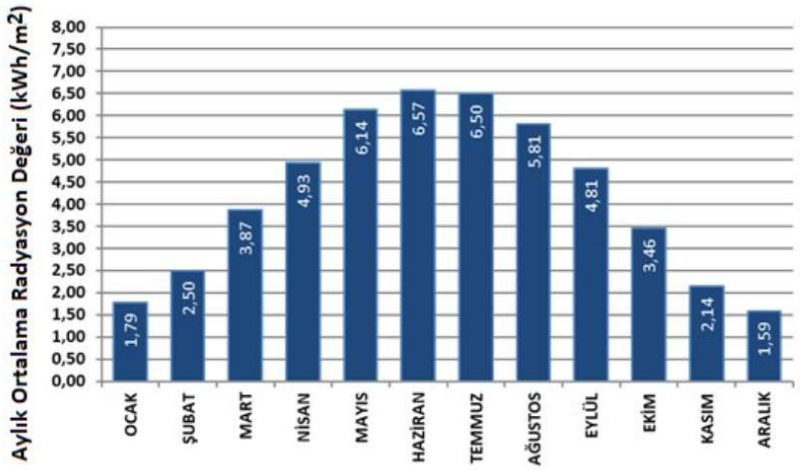
Genel olarak fotovoltaik enerji sistemleri güneşten aldığı enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek yenilenebilir bir enerji kaynağı sağlar. Fotovoltaik enerji çevre dostudur, az bakım gerektirir ve en büyük avantajı, çıkış gücüne göre mikrowattlardan megawattlara kadar tasarım yapılabilmesidir. (Öztürk ve Kaya, 2013)

Fotovoltaik enerji bağımsız bir sistem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle su pompalamada, uzak tesislerde, evler için güneş enerjisi sistemlerinde, iletişimde, uydularda ve uzay araçlarında ve hatta güneş enerjisi santrallerinin kurulumunda kullanılmaktadır. Bu kadar geniş bir uygulama yelpazesi ile fotovoltaik sistemlere olan talep her geçen yıl artmaktadır. Ülkemiz konumu sebebiyle yüksek solar enerji potansiyeline sahip görünmektedir. Türkiyenin solar enerji potansiyeli şekil 2' de görülmektedir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022).



Şekil 2. Türkiye'nin güneş enerji potasiyeli (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022).

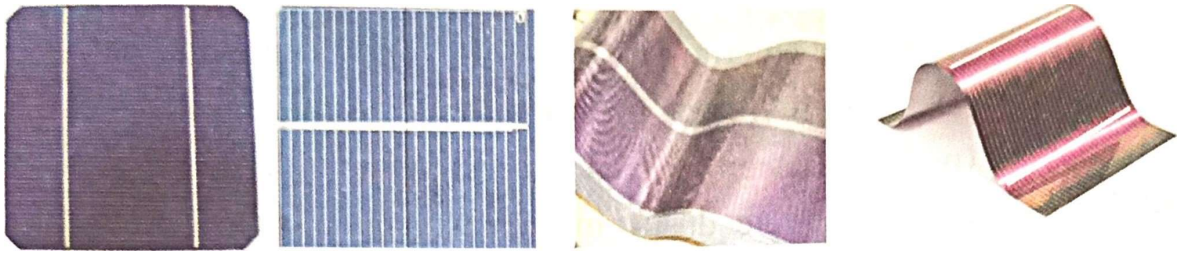
Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası'na (GEPA) göre yıllık ortalama güneşlenme süresi 2.741 saat, yıllık ortalama ışınım değeri ise 1.527,46 kWh/m2'dir. GEPA'daki aylık ortalama küresel radyasyonun genel potansiyel modeli ve dağılımı Şekil 3'te gösterilmektedir. (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022).



Şekil 3. Türkiye'nin aylık ortalama radyasyon dağılım grafiği (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022).

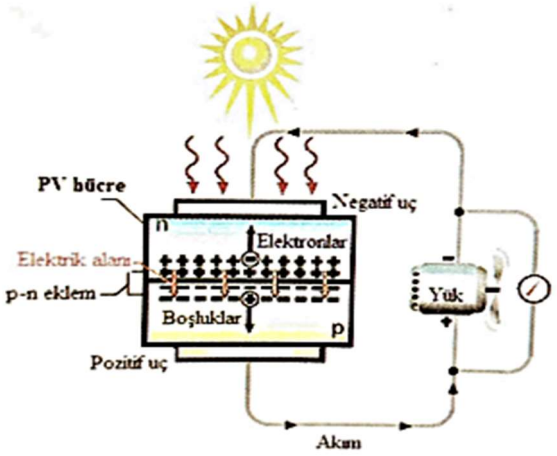
Enerji üretimi için güneş pilleri fotovoltaik prensibe göre çalışır. Başka bir deyişle ışınım yüzeylerine geldiğinde kutuplarında gerilim oluşur. Kare, dikdörtgen veya dairesel yüzeye sahip bir güneş pilinin alanı genellikle 100 cm2 civarında olup, kalınlığı 0,2 ile 0,4 mm arasında değişmektedir. Güneş pilinin yapısına bağlı olarak güneş enerjisini %5-%20 verimle çalıştırmak mümkündür. Verimliliği %10'un altında olan güneş pilleri verimli veya ekonomik sayılmaz. Şekil 4'de bir güneş pilinin yapısını göstermektedir.

Güç çıkışını artırmak için birkaç güneş pili paralel veya seri olarak bağlanabilir. Bu şekilde, birkaç watt'tan birkaç megawatt'a kadar değişen güç çıkışlarına sahip sistemler hayata geçirilebilir.



Şekil 4. Güneş hücreleri (Öztürk ve Kaya, 2013)

Fotovoltaik (PV) etki; Bu, güneş ışınımından gelen fotonların silikon gibi bir yarı iletken malzemenin yüzeyine çarptığında ve atomlardan elektronları fırlattığında meydana gelir. Radyasyon bir güneş piline çarptığında yalnızca bir kısmı emilir. Hücreler yalnızca emdikleri radyasyondan elektrik üretebilirler. Emilen radyasyon enerjisi, güneş pilinin atomlarındaki elektronlara aktarılır. Bu elektronlar yarı iletken malzemenin atomları içindeki normal konumlarını bırakırlar. Bu onları devredeki akımın bir parçası yapar. PV hücrelerinin özel elektriksel özellikleri, "yerleşik elektrik alanı" olarak bilinen şeyi veya ampul gibi harici bir yükten güç çekmek için gereken kuvveti veya voltajı sağlar. Şekil 5'de fotovoltaik etkinin prensip şeması gösterilmektedir. (Oymak, 2021).



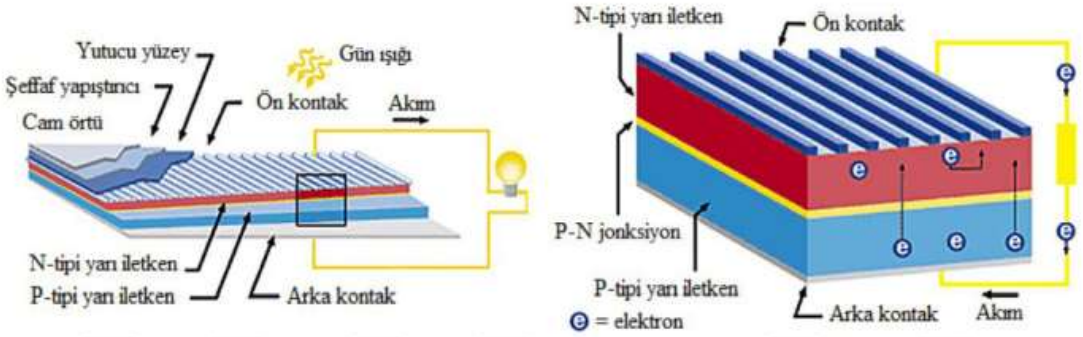
Şekil 5. Fotovoltaik etki (Öztürk ve Kaya, 2013)

3.2.1. Solar Pillerin Çalışma Prensibi

Solar piller güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür. Bu piller yarı iletken malzemelerden yapılmıştır. Yakın zamana kadar pillerin çoğu, verimliliği yaklaşık %18 olan monokristal silikondan (Si) yapılmaktadır. Bu monokristal hücrelerin üretilmesi zaman alıcıydı ve daha fazla emek gerektiriyordu, bu da daha yüksek maliyetlere yol açıyordu. Üretim maliyetlerini azaltmak için güneş pilleri tipik olarak verimi biraz daha düşük olan polikristal malzemelerden yapılmaktadır.

Güneş pili üretimine uygun olarak silikonun haricinde, kristal yapısı benzerlik gösteren Galyum Arsenit (GaAs) kullanılabilir. Ancak daha yüksek bir optik adsorpsiyon katsayısına sahiptir ve daha fazla sıcaklıklarda çalışabilir.

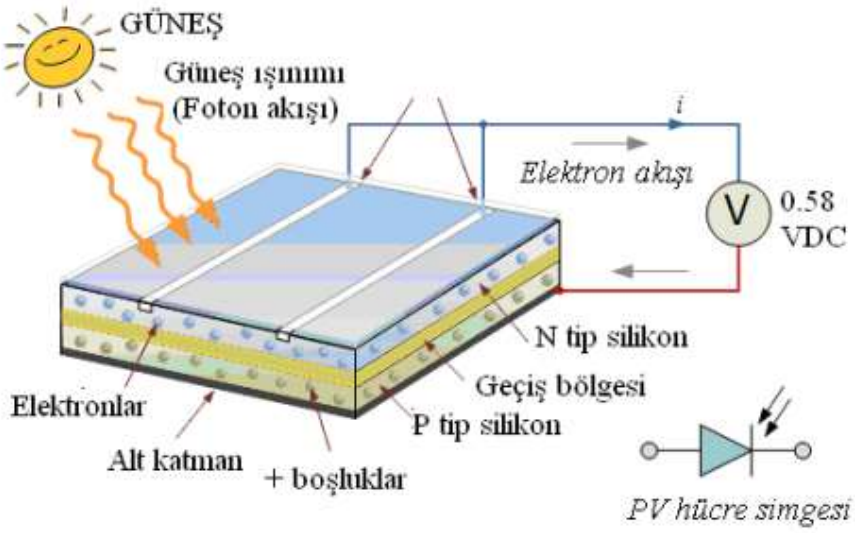
GaAs pilleri diğerlerine göre daha verimli olmakla birlikte maliyeti daha yüksektir. Çoğu küçük tüketici ürünü (güneş enerjisi saatleri, hesap makineleri vb.), daha az verimli ve daha ucuz olan ince amorf silikon (a-Si) filmleri kullanır. Bu sistemler düşük sıcaklıklarda büyük miktarlarda üretilebilmektedir. Güneş pilleri ayrıca daha değişik yarı iletken türlerinden de oluşturulabilir. Bakır indiyum selenit (CIS), bakır, indiyum ve selenyumdan oluşan yarı iletken bir bileşendir. Bunlar a-Si'ye benzer ancak daha pahalıdır. Bulunduğunuz yere ve güneş ışığına bağlı olarak bir güneş pili yaklaşık 0,6 V gerilim üretmektedir. Şekil 6'da PV hücrenin içyapısı görülmektedir.



Şekil 6. PV hücrenin iç yapısı (İçel, 2019)

Bir foton yarı iletken bir yüzeye çarptığında, yarı iletken yüzeyden elektronlar yayılır. Yayılan elektronlar p-n bağlantı bölgesinde bir elektrik alanı oluşturur. Fotoelektrik dönüşümü gerçekleştirmek için geçiş bölgesine düşen fotonlar delikler oluşturmayı amaçlar. Ortaya çıkan boşluklar elektrik alanının etkisiyle birbirinden ayrılır. (Kayri, 2017)

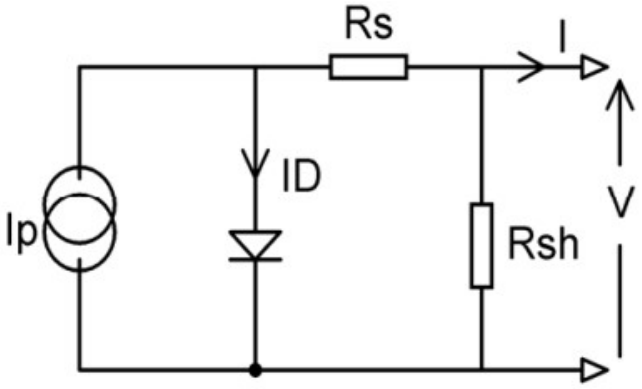
Bir foton, P tipi yarı iletken bir parçadan bir elektronu uzaklaştırır. Elektronlar enerji kazanır ve N tipi yarı iletken kısma akar. Doğru akım (DC), tek yönlü yönde sabit bir elektron akışıyla üretilir. Şekil 7'de bir güneş pilinin yapısını ve çalışma prensibini göstermektedir.



Şekil 7. PV hücrenin çalışma tekniği (Çelik ve Koç, 2020)

3.2.2 Güneş Pilinin Eşdeğer Devresi ve Matematiksel Modeli

Bir fotovoltaik hücre esasen, gelen radyasyonun bir fotovoltajk ve bir fotoakım ürettiği büyük, düz beslemeli bir diyottur. Güneş pillerinin akım-gerilim özellikleri aşağıdaki formülle ifade edilir.



Şekil 8. Solar pil eşdeğer devre modeli (İbrahim, 2011).

Şekil 8'teki devreye Kirchoff Akım Yasası uygulanırsa Eşitlik 3.1 elde edilir.

$$I = I_{\mathrm{P}} - I_{\mathrm{D}} - I_{\mathrm{r}} \tag{3.1}$$

I_P foto akım, I_D diyot akımı ve I_r paralel dirençten geçen akımdır. I_D aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{q(V+RsI)}{AkBT} \right) - 1 \right] \tag{3.2}$$

I_S doyma akımı, R_S seri direnç, q elektronik yük, A idealite katsayısı, k_B Boltzmann sabitidir ve T mutlak kesişme sıcaklığıdır.

$$I = I_{\mathrm{P}} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V+RsI)}{AkbT} \right) - 1 \right] - \frac{V}{Rsh} \tag{3.3}$$

$$I_P = \alpha_1 E \left[1 + \alpha_2 (E - E_{ref}) + \alpha_3 (T_J - T_{ref}) \right] \tag{3.4}$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ sabit sayılardır.

E solar parlaklık

E_{ref} referans solar parlalık (1000 W/m^2)

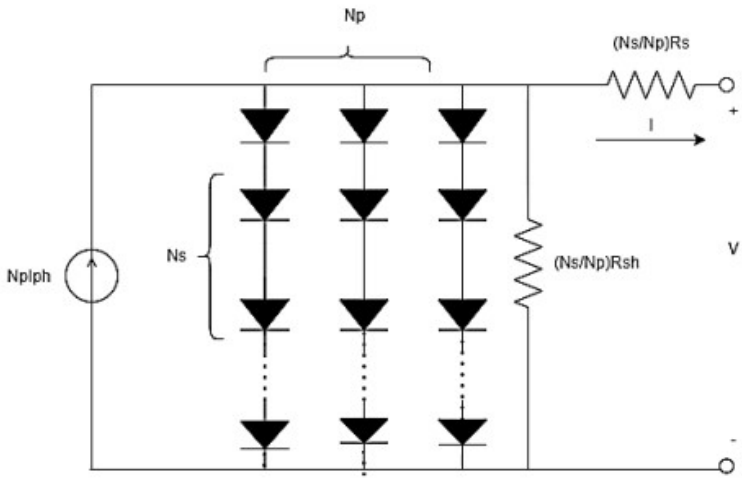
T_j kavşak (kesişme noktası) sıcaklığıdır.

T_{ref} referans sıcaklık (298ºK)

Doyma akımı sıcaklığa bağlıdır ve aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır.

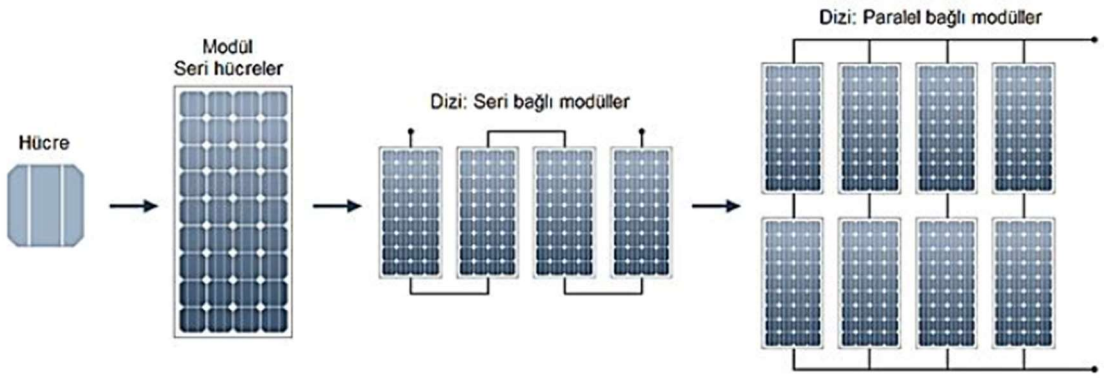
$$I_s = K\,T_j^3 \exp\left(-\frac{\alpha}{kBTj}\right) \tag{3.5}$$

Güneş pillerinin akım-gerilim özellikleri Shockley diyot denkemine göre açıklanabilir. Paralel direnç güneş hücresinin açık devre gerilimine etki ederken seri direnç ise kısa devre akımını indiren faktördür. Fotovoltaik modülün eşdeğer devresi şekil 9'da gösterilmektedir. (Şahin ve Okumuş, 2013).



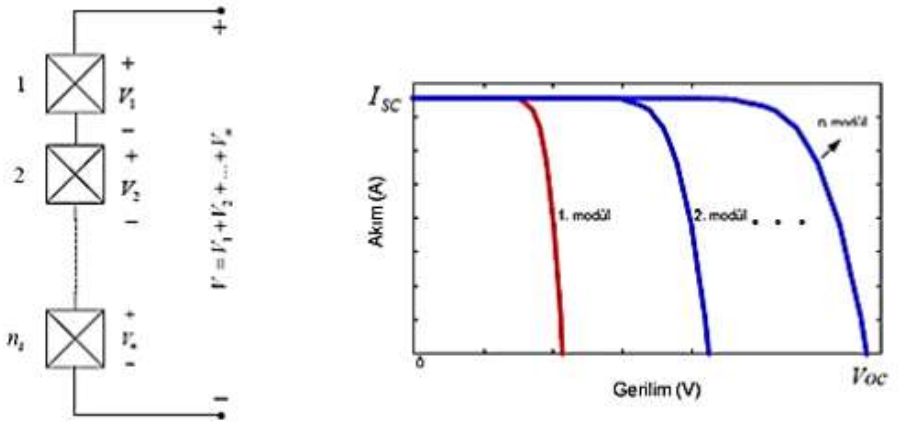
Şekil 9. Fotovoltaik modül için eşdeğer devre modeli

Bir fotovoltaik hücreden elde edilen anma gücü 0,6 V ve yaklaşık 1 W'tur. Bu nedenle çıkış kapasitesini arttırmak için fotovoltaik hücrelerin seri veya pralel bağlandığı fotovoltaik değişken diziler geliştirilmiştir. Şekil 10'da hücrenin, modülün ve üretilen PV dizisinin yapısı gösterilmektedir. Güneş pilleri birleştirilerek modüller yapılır, modüller birleştirilerek güneş panelleri yapılır, Panellerin birleştirilmesiyle güneş enerjisi santralleri oluşturulur. Bir PV modülde seri bağlanan hücre miktarı(Ns) panel gerilimini, paralel bağlanan hücre miktarı (Np) ise panel akımını artıracaktır.



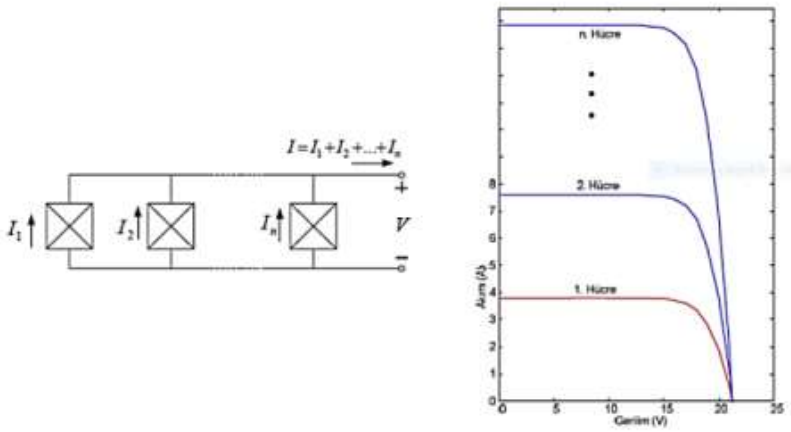
Şekil 10. PV hücre, modül ve dizi tasarımları (Öztürk, 2019)

Eğer n adet aynı pil seri olarak bağlanırsa, toplam voltaj bir pilin voltajının n ile çarpılmasıyla elde edilir. Toplam akım, pilden akan akıma karşılık gelir. Şekil 11, n adet aynı pilin seri bağlanması durumunda akım-gerilim özelliklerindeki değişimi göstermektedir.



Şekil 11. PV modüllerin seri bağlantısı (Hekim, 2011)

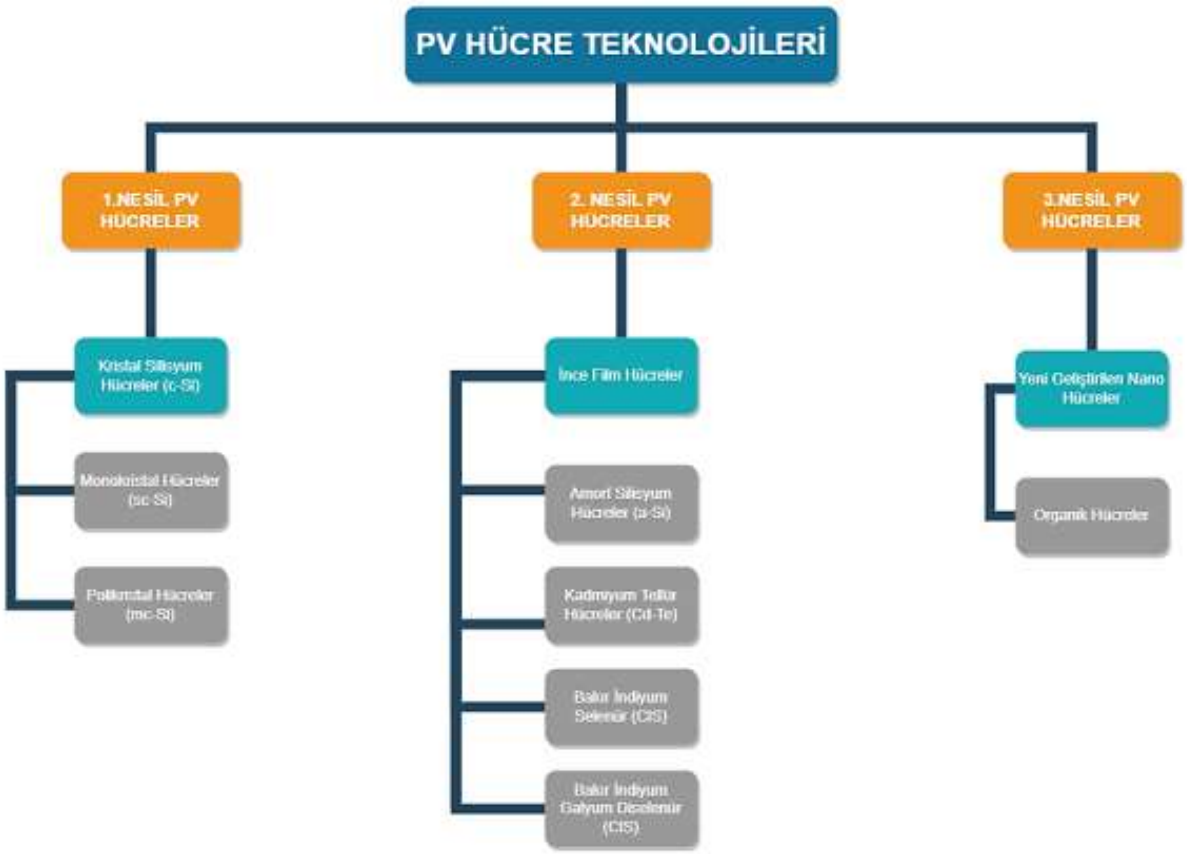
Eğer n adet aynı pil paralel bağlanırsa, toplam akım, pilden geçen akımın n ile çarpılmasıyla hesaplanır. Toplam voltaj akünün voltajına karşılık gelir. Paralel bağlanan n adet pilin akım-gerilim özellikleri Şekil 12'de gösterilmektedir.



Şekil 12. PV modüllerin paralel bağlantısı (Hekim, 2011)

3.2.3 PV Panel Çeşitleri

Fotovoltaik (PV) teknolojisindeki ilerlemelerin temel amacı yalnızca hücre performansını artırmak değildir.Aynı zamanda modül üretim maliyetlerini de minimuma indirmektir. Bu durumda fotovoltaik teknolojisi birçok farklı uygulama için kullanılabilir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte güneş enerjisini daha verimli kullanmak, daha temiz ve yeşil bir çevreye ulaşmak için bu çeşitlilik gereklidir. Şekil 13'te fotovoltaik hücre türleri gösterilmektedir.



Şekil 13. Fotovoltaik hücre çeşitleri

Monokristal PV Panel

Monokristal hücreler (Şekil 14) güneş pillerinin üretiminde kullanılan malzemelerden biridir ancak üretim maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle polikristal malzemeler bu alanda alternatif bir seçenek olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Monokristal modüllerin üretimi son derece zor ve pahalı bir teknoloji gerektirir. Ancak verimliliği polikristalin hücrelere göre daha yüksektir. Silikonun elektriksel, optik ve yapısal özelliklerinin uzun süreler boyunca değişmemesi ve silikon üretim tekniklerinin büyük başarısı bu malzemeyi en popüler malzeme haline getirmiştir. Monokristal güneş modülleri, tüm güneş modülleri türleri arasında en yüksek verime ve en büyük güç kapasitesine sahiptir. Monokristal modüllerin verimliliği farklılık gösterir.



Şekil 14. Monokristal PV panel

Polikristal PV Panel

Polikristal paneller en yaygın kullanılan panel türüdür ve diğer panellere göre en ucuz olanıdır. Polikristalin güneş panelleri ticari olarak uygun fiyatlı olması nedeniyle piyasada en yaygın kullanılan panel türüdür. Kullanımının bu kadar yaygın olmasının nedeni budur. Paneller %15 civarında verimlidir ve ani güneş ışığına karşı daha az hassastır ancak çok fazla alan gerektirir.



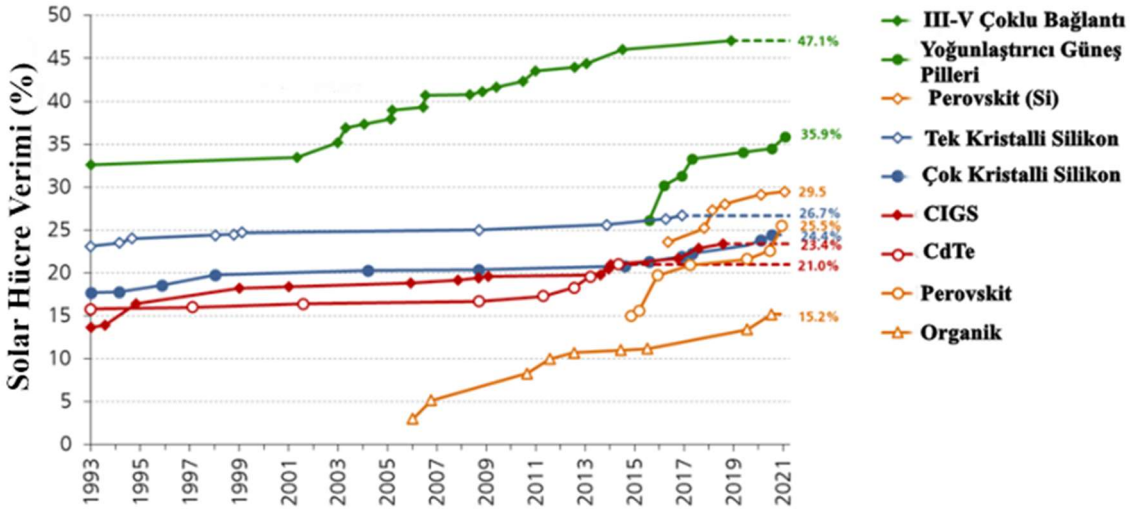
Şekil 15. Polikristal PV panel (ABB,2014).

İnce Film PV Panel

Adından da anlaşılacağı gibi bu paneller esnek, yüksek verimli ve dayanıklıdır. Esnek güneş panelleri kırılmaz yapıları ve hafif olmaları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Çerçeve ve cam yoktur. İnce film paneller üretmek için üst üste istiflenen çok ince yarı iletken katmanlardan oluşur. İnce film panellerin verimliliği %9-%10 arasında değişmektedir.İnce film modüllerde kullanılan yarı iletkenler; Amorf silisyum (a-Si), Kadmiyum tellürid (CdTe), Bakır İndiyum Diselend (CIS, CIGS, CIGSS), Galyum arsenit (GaAs) tir.



Şekil 16. İnce film PV panel (İçel, 2019)



Şekil 17. Hücrelerdeki verim yıllara göre karşılaştırması (İşin, 2022)

3.3. Solar Panellerinin Karakteristikleri

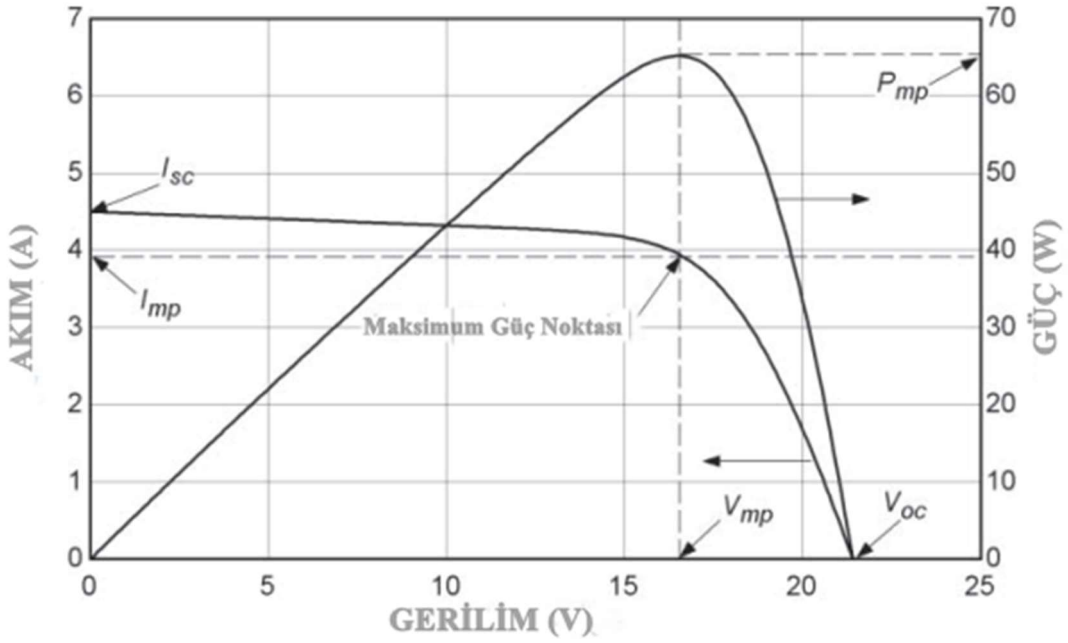
Bu çalışma için HSA firmasının HSA72M10MF-530 solar modül modellerinin tüm teknik verileri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1

HSA firmasının HSA72M10MF-530 PV Panel karakteristikleri

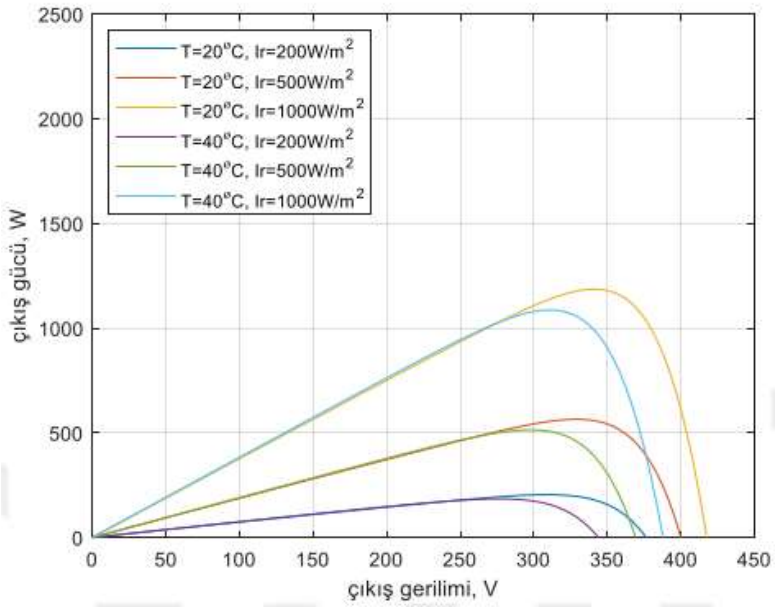
Güneş Panelinin Özellikleri	Modüldeki Hücre Sayısı Ncell=144
Maksimum Güç	Pmax = 530 W
Maksimum Güç Noktası Gerilimi	Vmp= 41,31 V
Maksimum Güç Noktası Akımı	Imp = 12,83 A
Açık Devre Gerilimi	Voc = 49,30 V
Kısa Devre Akımı	Isc = 13,72 A
Sıcaklık Katsayısı (Voc)	Kv = -0,275 % / ºC
Sıcaklık Katsayısı (Isc)	Kv = +0,045 % / ºC

PV modülün akım-gerilim ve güç-gerilim grafikleriyle Şekil 18 ' te verilmiştir.



Şekil 18. PV modülün I-V ve P-V karakteristiği (Duffie ve Beckman., 2005).

Güneş panellerinin çeşitli ışınım değerleri, özellikleri verilmiştir. (200 W/m^2, 500 W/m^2 ve 1000 W/m^2) Farklı sıcaklık durumlarına göre (20 ºC ve 40 ºC) güç-gerilim karakteristik eğrileri Şekil 19'de gösterilmiştir.



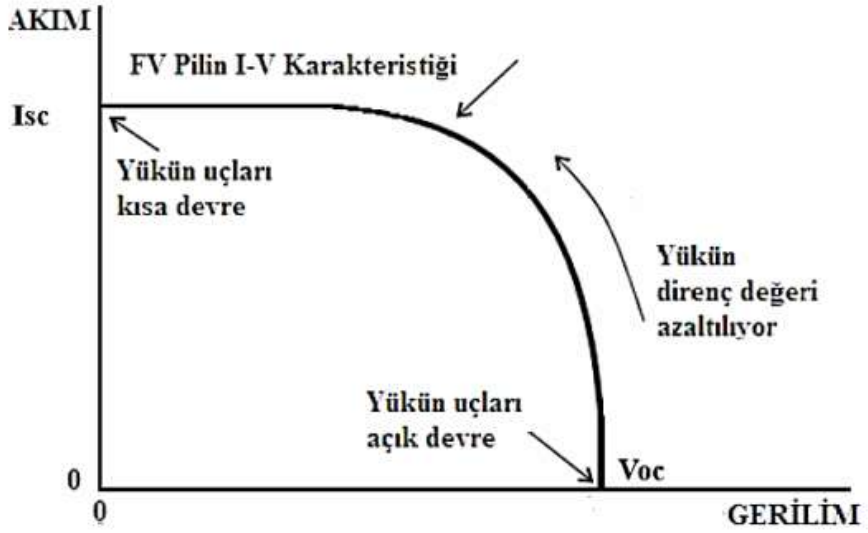
Şekil 19. PV modülün sıcaklık ve ışınıma bağlı P-V karakteristiği

3.3.1. PV Sistemlerin Çalışmasını Etkileyen Faktörler

Güneş ışığı bir solar pile çarptığında fotovoltaik etki nedeniyle enerji üretilir. Güneş ışığı yarı iletken malzeme tarafından emilerek p-n bağlantı bölgesinde bir elektrik alanı oluşturulur. Fotoakım güneş ışığıyla orantılı olarak üretilir. PV hücreleri, hücre sıcaklığına göre değişen lineer olmayan akım-gerilim ve güç gerilim özelliklerine sahiptir. Şekil 20'de gösterilen güneş pili karakteristik eğrisi modeli, güç-gerilim eğrisinin nasıl oluşturulduğunu göstermektedir. PV grafiğini oluşturan sistemde kullanılan invertör çok önemlidir. PV modüllerinin aşağıdakiler gibi en iyi gücü üreten koşullar altında çalışması çok önemlidir.

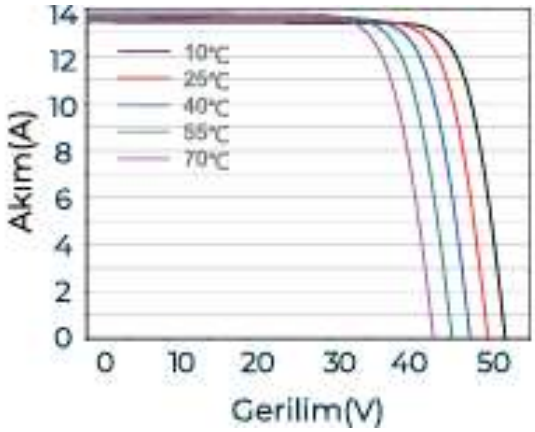
Fotovoltaik modüllerin mevcut parametreleri artan sıcaklıklardan etkilenir. Sıcaklıktaki değişiklikler çıkış voltajını etkiler. Fotovoltaik piller için ortam sıcaklığının aşırı artması istenmeyen bir durumdur. Artan ortam sıcaklıkları panelin güç çıkışı üzerinde de olumsuz etkiye sahiptir. PV modülleri için diyagram Isc (kısa devre akımı), Pm (maksimum güç noktası) ve Voc (açık devre gerilimi) noktalarına yerleştirilmelidir. Akım-

gerilim grafiği oluştururken dikkat etmeniz gereken bazı noktalar bunlardır (İşin, 2022).

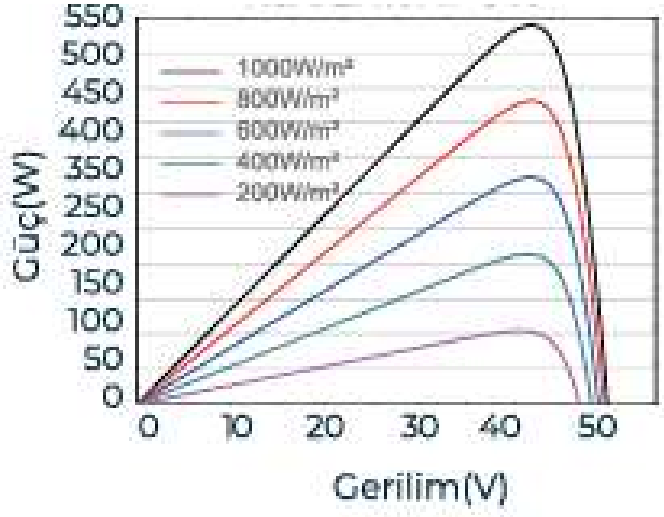


Şekil 20. PV modülün kısa devre akımı ve açık devre gerilim ilişkisi (İşin, 2022)

HSA72M10MF paneline ait değişik sıcaklık değerlerindeki (10°C, 25°C, 40°C, 55°C, 70°C) akım-gerilim eğrileri Şekil 21'de, güç-gerilim eğrileri Şekil 22'de sunulmuştur.

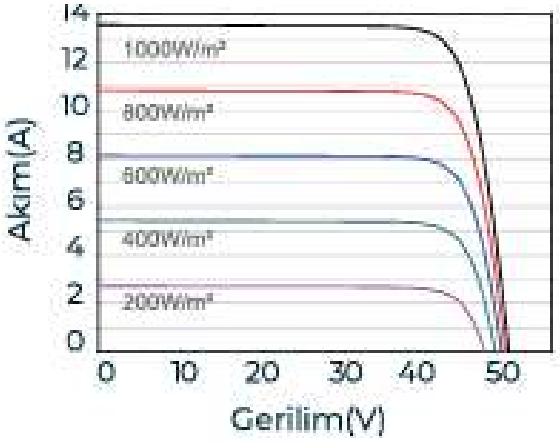


Şekil 21. HSA72M10MF-530 modülünün farklı sıcaklık değerlerinde akım-gerilim eğrisi



Şekil 22. HSA72M10MF-530 modülünün farklı ışınım değerlerinde güç-gerilim eğrisi

Bir PV modülüne çarpan ışığın yoğunluğunun arttırılması, modülün çıkış akımı artar. Işık yoğunluğundaki artma ile sıcaklıktaki artışı karşılaştırdığımızda ışık yoğunluğundaki artışın akım üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğunu görebiliriz. Işık yoğunluğu arttıkça hem akım hem de voltaj arttığından panelin çıkış gücü de artar. Sabit sıcaklıkta (25 °C) farklı radyasyon seviyelerine (200 W/m2, 400 W/m2, 600 W/m2, 800 W/m2, 1000 W/m2) sahip PV modülün I-V özellikleri Şekil 23'da gösterilmiştir.



Şekil 23. HSA72M10MF-530 modülüne ait farklı ışınım değerlerinde akım-gerilim eğrisi

Tablo 2

PV Panellere etki eden parametrelerin incelenmesi

	AKIM (A)	**GÜÇ (W)**
Işınım Şiddeti Artması	Artar	Azalır
Sıcaklık Artması	Artar	Azalır
Seri Direnç Artması	-	Azalır
Paralel Çıkış Sayısının Artması	Artar	Azalır
Seri Bağlı Hücrelerin Artışı	-	Azalır

3.3.2. Solar Panellerde Verimlilik

PV modüllerin verimliliği 1000 W/m^2 ,25 ºC test koşullarına göre tespit edilir. Verimlilik, güneş pilinin maksimum güç çıkışının güneş pili tarafından yakalanan enerji miktarına oranı olarak denklem 3.6 kullanılarak hesaplanır.

$$\eta = \frac{Pm}{Pin} \tag{3.6}$$

Açık Devre Gerilimi (Voc): Diyotun uçları arasındaki direncin, sonsuz büyüklükteki bir değerde olması durumunda (açık devre) ölçülen gerilimdir.

Kısa Devre Akımı (Isc): Diyotun iki ucu arasındaki direnç sıfır iken (kısa devre) ölçülen akımdır. İdeal koşullarda bu değer, ışınımla yaratılan akım değerine eşittir.

Dolum Faktörü (FF): Güneş hücresinin toplam değerini belirleyen bir etmendir. Güneş hücresinin en yüksek elektriksel çıkış gücünün (P_{max}), açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) değerlerinin çarpımına oranı olarak tanımlanır. Dolum faktörü denklem 3.7 ile ifade edilmiştir.

$$FF = \frac{Vm.Im}{Voc.Isc} \tag{3.7}$$

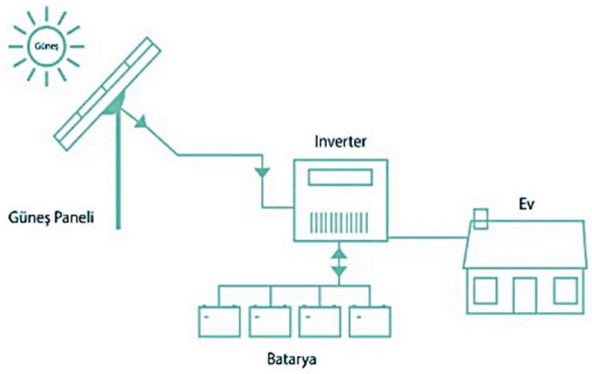
$$\eta = \frac{(Voc.Isc).FF}{Pin}.100 \tag{3.8}$$

3.4. PV Sistem Bağlantı Şekilleri

Güneş enerjisi sistemleri genel olarak konum, amaç ve performansa göre sınıflandırılır. Güneş enerjisi santralleri bağlantı türüne göre üç tipe ayrılmaktadır: on-grid sistemler, off grid sistemler ve hibrit güneş enerjisi sistemleridir.

3.4.1. Şebekeden Bağımsız PV Sistemler (Off-Grid)

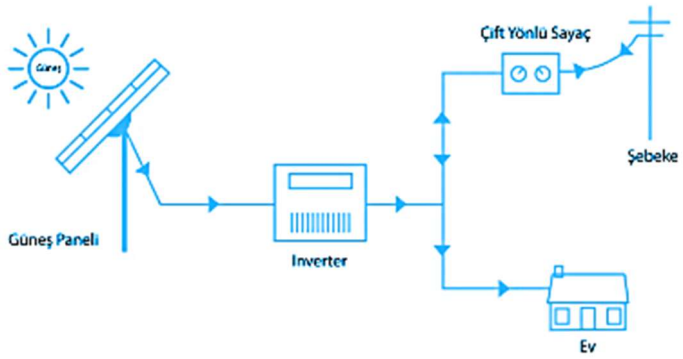
Bu sistemler, ulusal elektrik şebekesine bağlı olmayan uzak konumdaki hanelere ve köylere elektrik sağlamaktadır. Bu PV sistemleri genellikle aydınlatma, soğutma ve diğer düşük güçlü yükler için elektrik sağlar. Dünya çapında bu türden binlerce PV sistem kurulmuş ve bunlar genellikle şebekeden bağımsız parçaların enerjisini karşılamak için uygun bir teknolojidir. Şebekeden bağımsız evsel sistemler tipik olarak yaklaşık 2 kW'lık bir periyottadır ve genellikle elektrik şebekesinin mevcut güç hatlarından 1 veya 2 km'den daha uzak mesafeler için ekonomik alternatif bir yöntemdir. Bu sistemler karasal PV sistemleri için ilk ticari uygulama olmuştur. Telekomünikasyon, su pompalama, navigasyon yardımcıları gibi çok çeşitli uygulamalar için tercih edilmektedir ve bakım maliyetleri oldukça düşüktür.(Zahedi,2006)



Şekil 24. Şebekeden bağımsız PV sistemler

3.4.2. Şebekeye Bağlı PV Sistemler (On-Grid)

Bu sistemler aslında küçük veya büyük enerji santralleridir. Modüllerin ürettiği elektrik enerjisi, tek fazlı veya üç fazlı invertör aracılığıyla şebekeye verilmektedir. Şebekeye bağlı fotovoltaik sistem; Dört temel unsurdan oluşur: güneş panelleri, invertör, çift yönlü sayaç ve veri kaydedici (Zahedi,2006).



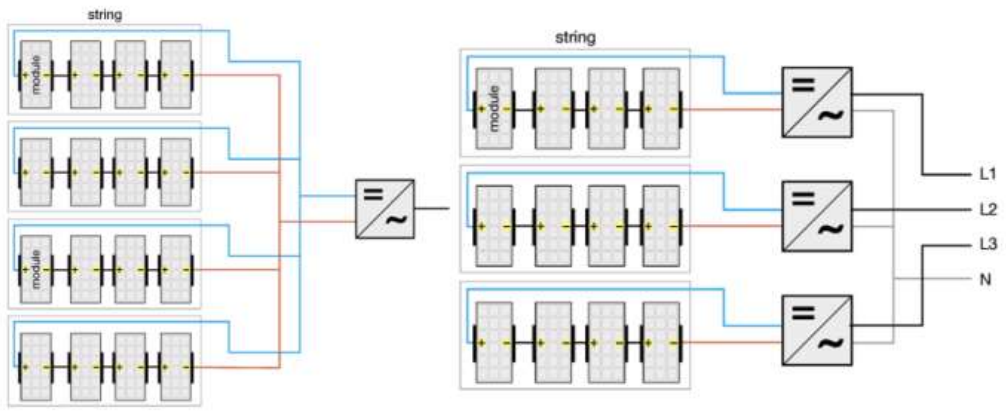
Şekil 25. Şebekeye bağlı PV sistemler

Sistemin çalışma prensibi; Güneş panellerinden üretilen elektrik enerjisi şebekeye bağlı invertörlere gider, regüle edilir ve elektrik hatlarına iletilebilecek duruma dönüştürülür. Güneş panellerinden üretilen elektrik direk yük için kullanılır ve fazla elektrik şebekeye aktarılır. Havanın bulutlu olduğu veya güç kaynağının zayıf olduğu durumlarda elektrik talebi, şebekeden yüke enerji aktarılarak karşılanır. Elektrik şebekesinden kaynaklanan bir sorun varsa invertör kapanacaktır. Yani şebekede elektrik kesintisi olması durumunda elektrik kesilecektir. Fotovoltaik sistemin pek çok farklı alanı kapsayan bir teknoloji olduğu görülmektedir. Bu nedenle sistem tasarlanırken bu temel bileşenlerin kapasitesinin ve kalitesinin hesaplanması dikkatli bir şekilde belirlenmelidir.

Şebekeye bağlı bir sistemde invertör, doğru akımı alternatif akıma dönüştüren bir devre elemanıdır. Ticari olarak temin edilebilen invertörlerin verimliliği yaklaşık %98'dir. İnvertörler, düşük ilk yatırım ve bakım maliyetleri nedeniyle ekonomik avantaja sahiptir.

İnverterler çalışma şekillerine göre iki gruba ayrılabilir. İlk önce; Merkezi invertör ve ikincisi dizi invertörüdür. Şekilde merkez ve dizi invertörü gösterilmektedir. Merkezi eviricilerde sistemde kullanılan tüm PV modül alanları toplanıp tek bir eviriciye gönderilirken, dizi eviricilerde her bir PV modül alanı ayrı ayrı eviriciye beslenir. İnverter, invertöre bağlı devrelerin ortalama parametrelerine göre MPPT vasıtasıyla çalışmayı ayarlar; Bu nedenle tüm hatların aynı invertöre bağlanması durumunda bir veya daha fazla hattın gölgelenmesi veya kesilmesi sistemin elektriksel performansında diğer devrelere göre daha büyük bir düşüşe neden olacaktır. Orta ölçekli bir sistemde her dizi doğrudan kendi invertörüne bağlanabilir ve maksimum güç noktasında çalıştırılabilir.

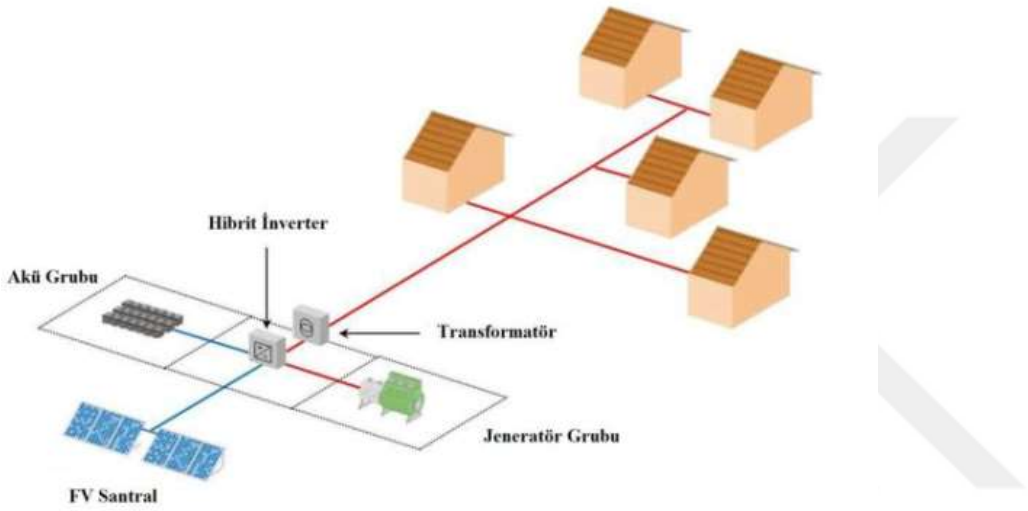
İnverterlerde genellikle akım yönündeki değişiklikleri önlemek için bloklama diyotları bulunur. Üretim sırasındaki problemleri teşhis edilmesi doğrudan invertör tarafından gerçekleştirilir ve DC tarafında yüksek akım ve yüksek gerilimlere karşı korunur. Ek olarak, her dizide bir invertör kullanılması, modüller ve dönüştürücüler arasındaki bağlantı sorunlarının yanı sıra gölgeleme ve farklı durumlardan kaynaklanan güç kayıplarını da sınırlar.



Şekil 26. Merkezi ve dizi inverter (ABB, 2014)

3.4.3. Karma PV Sistemler

Güneş enerjisi ile enerji üretimi hava şartlarına bağlı olduğundan sürekli olarak üretilememektedir. Üretim başarısız olursa veya sistem yetersiz kalırsa, diğer sistemler bunu hibrit sistem ile telafi eder. Hibrit güneş enerjisi santralleri genellikle rüzgar türbinleri ve dizel jeneratörlerle senkronize çalışır. Ancak güneş enerjisinin üretilemediği zamanlarda her iki teknolojinin birleştirilmesiyle gerekli üretim elde edilmektedir (Lena, 2013).



Şekil 27. Hibrit PV santral

3.5. Reaktif Güç Kompanzasyonu

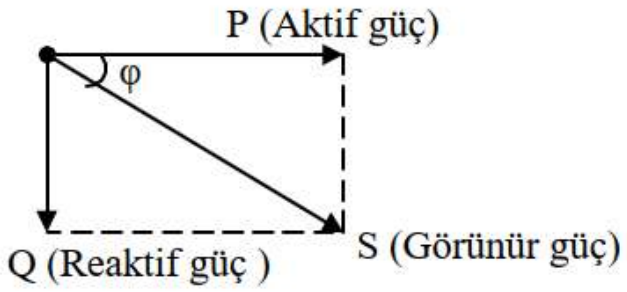
Dünyamızda elektriğe olan talebin artması ve enerji üretim maliyetlerinin artması nedeniyle iletilen enerjinin ucuz ve gerçek anlamda aktif enerji olması gerekmektedir. Bilindiği gibi motorlar, transformatörler veya floresan lambalar bağlı oldukları şebekeden reaktif güç alarak manyetik alan sağlarlar. Reaktif akımlar motora manyetik alan oluşturmaktan başka bir işe yaramaz ve havai hatlarda, transformatörlerde, anahtarlarda, anahtarlama elemanlarında ve kablolarda gereksiz kayıplara neden olur. Sistemde harcanan reaktif enerjiyi azaltmak amacıyla yapılan kondansatörler veya senkron motor sistemleri, kompansatörler ve bu işlemin uygulandığı sistemlere kompanzasyon sistemleri veya kısaca kompanzasyon denir. Reaktif güç kompanzasyonu için en uygun ve en az maliyetli olarak kapasitörler kullanılır.

Aktif akımın ürettiği güce aktif güç, reaktif akımın ürettiği güce reaktif (kör) güç ve bu güçlerin vektörel toplamına görünür güç denir. Kompanzasyon işlemlerinde amaç güç faktörünü (cosφ) 1'e yaklaştırmaktır. Sistemin gerektirdiği kompanzasyon veya güç faktörü kontrol edilmediği takdirde hatlarda gerilim dengesizlikleri ve reaktif güçte ani değişiklikler meydana gelecektir. Bu değişiklikler kullanıcı tarafında arızalara neden olabilir. Bu nedenle güç faktörünün belirli bir aralıkta tutulması gerekir. Güç faktörü düzeltmesi hem elektrik enerjisi üreticilerine hem de tüketicilerine büyük fayda sağlamaktadır. Bu nedenle kompanzasyon işleminin tüm işletmelerde (belirli gücün üstündeki) yapılması mevzuat olarak zorunlu hale getirilmiştir. (Saner, 2016).

Reaktif güç kompanzasyonu yapmak şebeke için ve tüketici için faydaları şu şekilde sıralanabilir:

- Transformatör sargılarında, kablolarda, hava hatlarında, anahtarlama ve koruma aygılarında akımın karesiyle orantılı olarak (I^2R) ısı kaybı azalır. Bu etkin güç kaybının azalmasıyla transformatörden daha fazla etkin güç çekme olanağı doğar.
- Transformatör sargılarında, kablolarda, hava hatlarında, anahtarlama ve koruma aygıtlarında gerilim düşümü azalır.
- Kablolar ve hava hatları, özellikle transformatörler daha fazla yüklenebileceklerinden dolayı yatırımın daha verimli olması sağlanır.
- Yeterli kompanzasyon yapılırsa,endüktif ve kapasitif enerji tüketimi aşımı olmayacağından dağıtım şirketine ceza ödenmez. (Saner,2016).

Güç üçgeni Şekil 28'de ilgili formüller ise Eşitlik 3.9, 3.10, 3.11,3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 28. Güç üçgeni (MEB, 2011).

Aktif Güç: P = U.I.cosφ (W) (3.9)

Reaktif Güç: Q=U.I.sinφ (VAr) (3.10)

Görünür Güç: S=U.I (VA) (3.11)

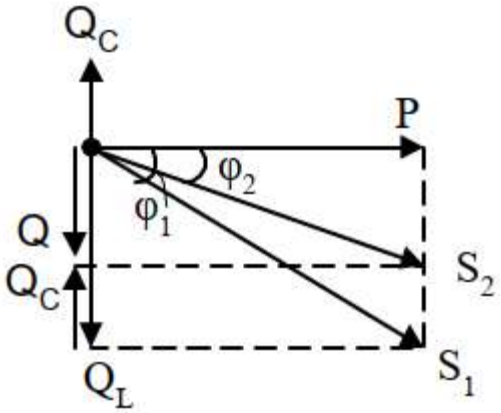
Güçler arasındaki ilişki ise;

S=$\sqrt{P^2 + Q^2}$ şeklindedir. (3.12)

Güç vektöründe güç katsayısı (cosφ); aktif güç (P) ile görünür güç (S) arasındaki açının kosinüsüne bağlıdır. Reaktif güç ne kadar büyük olursa, cosφ o kadar küçük ve görünen güç de o kadar büyük olur. Bu, şebekenin daha az reaktif güç elde etmesi anlamına geliyor, bu da daha fazla güç anlamına geliyor. Reaktif gücün azaltılması ve güç katsayısının (cosφ) arttırılması işlemine kompanzasyon (güç katsayısı düzeltmesi) adı verilir.

Reaktif güç de iki bileşenden oluşur. Bunlar, bobinin manyetik alanı oluşturmak için tükettiği endüktif reaktif güç (QL) ve kapasitif reaktif güçtür (QC). Reaktif gücün bu bileşenleri birbirine vektörel olarak zıttır.

Toplam reaktif güç, Q = Q_L – Q_C veya Q = Q_C – Q_L şeklinde hesaplanır. Q_C'nin Q_L'den büyük olması cosφ'nin kapasitif özellikte olması, Q_L'nin Q_C'den büyük olması ise cosφ'nin endüktif özellikte olması anlamına gelmektedir (MEB, 2011).



Şekil 29. Kompanzasyon yapılmış devrenin güç üçgeni (MEB, 2011).

$$S_1 = \sqrt{P^2 + {Q_L}^2} \quad (3.13)$$

$$S_2 = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2} \quad (3.14)$$

Vektör diyagramından görülebileceği gibi kompanzasyon öncesi cosφ1 değeri küçüktür ve görünen güç (S1) büyüktür. Kondansatör eklemek cosφ2'yi artırdığı gibi görünen gücü (S2) azaltmıştır. Bu da şebekeden daha az elektrik ve güç çekilmesi anlamına gelmektedir. Bu aynı zamanda daha düşük elektrik faturalarından da yararlanılabileceği anlamına gelir.

3.5.1 Kompanzasyon İle İlgili Yönetmelik Maddeleri

Ülkemizde yürürlükte olan kompanzasyon ile ilgili yönetmelik maddeleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Kurulu gücü veya besleme trafolarının toplam kurulu gücü 50 kVA ve daha büyük olan abonelerin alçak gerilimli baradan beslenmesi durumunda mutlaka (17.02.2000) tarih ve 23967 sayı) tebliğ hükümleri çerçevesinde kompanzasyon tesisleri yapılacaktır.
- 50 kVA'ın alternatif reaktif enerji tarifesine tabi olan abonelerin müracatı veya fen servislerinin lüzum görmesi hâlinde, bu tür abonelere de eldeki sayaç akım değerleri de göz önüne alınarak reaktif sayaç takılmakta ve bu sayaçların tüketim kayıtlarına göre hesaplama yapılmaktadır.
- Bilindiği üzere, reaktif sayacı ile reaktif tüketimi ölçülebilen abonelerde reaktif tüketim, aktif tüketimin % 33'ünü geçmemesi şartıyla herhangi bir reaktif enerji bedeli alınmayacağı tarifede belirtilmektedir. Diğer bir ifadeyle abone güç faktörünün 0,95 ile 1 arası değerlerinde reaktif enerji bedeli tarifeye göre alınacaktır. Şu hâlde kompanzasyon yapılacak tesislerde güç faktörü yukarıdaki esaslara göre saptanacak sınırlar içinde kalması koşuluyla gerekli tesis yapılmalıdır.
- Mevcut tesislere yapılacak kompanzasyonda yine belirilen sınırlar içinde kalma koşuluyla gerekli tesis yapılacak ve işletmeye bir proje ile müracaatta bulunulacaktır.

- Reaktif enerji tarifesi grubunda olup da endüktif yükü olamayan veya yukarıda belirtilen güç faktörü sınırında çalışan aboneler de işletmeye müracat etmeleri hâlinde, bu tür abonelerden reaktif enerji bedeli alınmayacaktır.

Yeni Kurulan Tesislerde Kompanzasyon

Yeni enerji alacak tesislerde hazırlanacak olan projede, kurulacak olan tesise ait nominal veya etiket değerleri göz önüne alınarak kompanzasyon gücü hesaplanarak belirlenecektir. İşletme gerek enerji verme aşamasında, gerekse enerji verdikten sonra bu tesisin belirtilen güç faktörü sınırları içinde çalışıp çalışmadığını izleyecektir.

17.02.2000 Tarih ve 23967 Sayılı resmî gazetede yayınlanarak yürürlüğe giren yeni kompanzasyon tebliğine göre;

- Kurulu gücü veya besleme transformatörlerinin toplam kurulu gücü 50 kVA ve bunun üzerinde olan elektrik tesislerinde kompanzasyon tesisi yapılması zorunludur.
- Üç fazlı olarak beslenen sanayi abonelerinin elektrik enerjisi ile besleme projeleri hazırlanırken, güç kat sayısını düzeltmek için gerekli kompanzasyon tesisleri de proje kapsamına alınmalıdır.
- Abonelerin beslenmesinde kullanılan transformatör merkezleri ile ilgili kompanzasyon tesisi projeleri yapılırken, abonelerin kendi tesisleri için tek tek kompanzasyon tesisi kurmaları durumunda, transformatör merkezlerinde yalnızca sabit kondansatör grubunun göz önünde bulundurulması yeterlidir.

Reaktif Enerji Tarifesi

Reaktif Enerji Tarifesi (25/12/1997 tarih ve 23/211 sayılı resmi gazete). Elektrik Projelerinin Hazırlanması (17/02/2000 tarih ve 23967 sayılı resmi gazete) Elektrik Tarifeleri Yönetmeliği (09/03/2000 tarih ve 23988 sayılı resmi gazete) Madde – 56-Reaktif Enerji Tarifesi aşağıdaki şartlar hâlinde uygulanır.

- Abone çekeceği reaktif enerjiyi ölçmek üzere gerekli ölçü aletlerini tesis etmek zorundadır. Tesis etmeyen abonenin o dönemde çektiği aktif enerjinin 0,90 katı reaktif enerji çektiği kabul edilir (R.G: 9.3.2000 / 23988).

- Reaktif enerjiyi ölçmek üzere gerekli ölçü aletlerini tesis eden abonelerden çektiği aktif enerjinin % 0,33 katına kadar reaktif enerji çeken müşteriden reaktif enerji

bedeli alınmaz. Bu sınır aşılırsa çekilen reaktif enerjinin tamamına reaktif enerji tarifesi uygulanır. (R.G: 9.3.2000 / 23988)

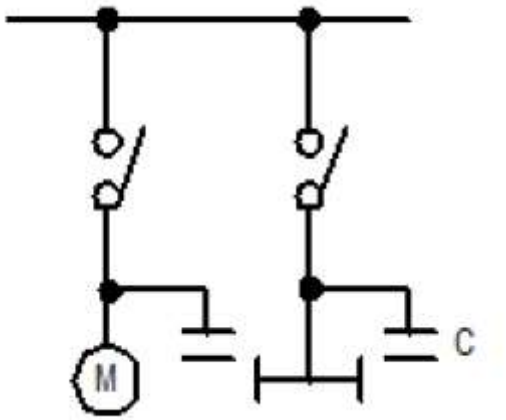
- Abone aşırı kompanzasyon sonucunda sisteme vereceği reaktif enerjiyi ölçmek için geri dönmesiz reaktif enerji sayacını tesis edecektir. Sisteme verilecek (kapasitif tüketim) reaktif enerji, o dönemde çekilecek aktif enerji miktarının (aktif tüketim) % 20' sini aşması hâlinde abonenin çektiği aktif enerjinin 0,90 katı kadar reaktif enerji tüketildiği kabul edilerek reaktif enerji tarifesi üzerinden bedeli alınır. (R.G: 9.3.2000 / 23988).

3.5.2 Kompanzasyon Çeşitleri

Kompanzasyon,; tek tek kompanzasyon, grup kompanzasyonu ve merkezi kompanzasyon olmak üzere üç çeşit kompanzasyon uygulaması vardır.

Tek Tek Kompanzasyon

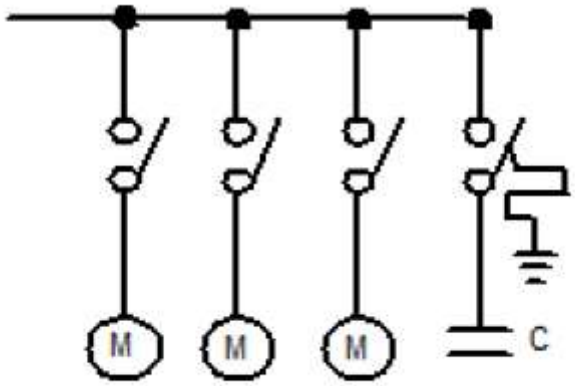
Bireysel kompanzasyon ile kapasitörler direk yük çıkışına bağlanır. Ortak bir anahtarlama cihazı aracılığıyla yük ile birlikte açılıp kapatılır. Yüke bağlı olarak kapasitör kapasitesinin doğru seçilmesi gerekmektedir. Bu işlem aynı zamanda en etkili ve güvenilir olanıdır. Çünkü kapasitörün arızalanması hatalı parçayı devre dışı bırakacaktır. Ancak bu sistem diğerleri arasında en pahalı olanıdır. Motorun çok güç tükettiği ve alıcının enerji hatlarının uzun olduğu aydınlatmalarda ise bireysel kompanzasyon uygulaması tercih edilir. (MEB, 2011).



Şekil 30. Tek tek kompanzasyon şeması (MEB, 2011).

Grup Kompanzasyon

Bu kompanzasyon türünde, bir grup halinde açılan birden fazla motora veya floresan lambaya kontaktörler veya devre kesiciler vasıtasıyla kompanzasyon yapılır. Bu süreçte her grup bir alıcı olarak kabul edilir. Bu tür sistemler günümüzde nadiren kullanılmaktadır. (MEB, 2011).

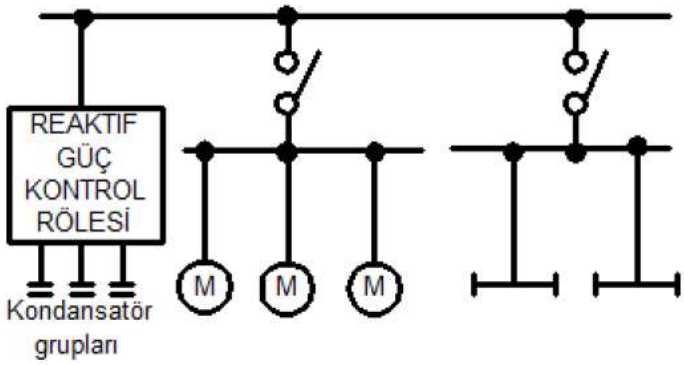


Şekil 31.Grup kompanzasyon şeması (MEB, 2011).

Merkezi Kompanzasyon

Çok sayıda motor ve alıcının şalt üzerinden endüktif yükler çekmesi ve bunların belirsiz zamanlarda açılıp kapanması durumunda yük koşullarına bağlı olarak kompanzasyon işlemi yapılabilmektedir. Bu sistemler, manuel kontrollü ve otomatik kontrollü çalışmayı içermektedir. Projelendirilmesi ve hesaplanması kolaydır. Mevcut sistemlere kolayca bağlanır ve çok hızlı bir şekilde devreye alınabilir. İşletme için verilen transformatörler, akım transformatörlerinin toplanmasıyla kompanze edilebilir. Kullanılan elektronik kontrolörlerin hassasiyet limitleri ve çalıştıkları endüktif-kapasitif aralık potansiyometreler ile ayarlanabilmekte, bu sayede ilgili kompanzasyon cihazlarının çalıştırılması kolaylaşmaktadır. Bir tesisin sahip olması gereken kapsama türü, çeşitli zamanlarda kaydedilen işyeri yük eğrisine göre belirlenmelidir.

Bu sistemler elektronik kompanzasyon röleleri ile aktive edilir. Kademeli reaktif güç kontrol rölesi, 0,96'lık sabit bir cosφ değerini korumak için kapasitör grubunu otomatik olarak açar ve kapatır. 17.02.2000 tarihli ve 23967 sayılı Resmi Gazete'de belirtildiği üzere şirketlerin cosφ değerini 0,95 ile 1 aralığında tutması gerekmektedir. Reaktif güç rölelerindeki kademeler gibi kapasitörler de gruplara ayrılmıştır. Her kademe o kademeye ait bir grup kondansatörü beslemektedir (MEB, 2011).

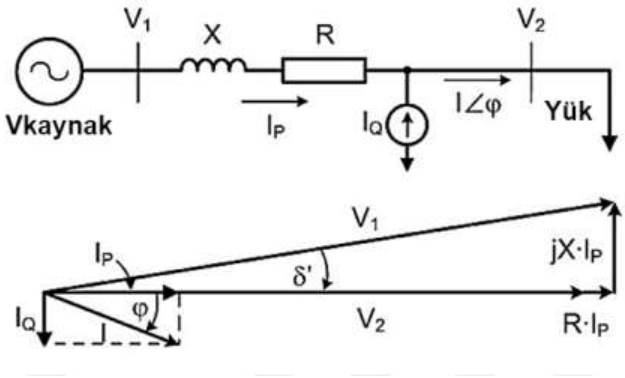


Şekil 32. Merkezi kompanzasyon (MEB, 2011).

Şönt Kompanzasyon

Bir güç kaynağı , iletim hattı ve tipik bir endüktif yükten oluşan temel bir ac sisteminde şönt reaktif güç kompanzasyonunun prensplerini ve teorik etkileri şekil 33'de görülmektedir. Yük akımının reaktif bileşenini telafi etmek için bir akım kaynaklı cihaz kullanılmaktadır. Sonuç olarak sistem regülasyonu iyileştirilerek kaynaktan gelen reaktif akım bileşeni azaltılır veya neredeyse tamamen ortadan kaldırılır.

Yükün ön dengeleme gerektirmesi durumunda bir indüktör gereklidir. Ek olarak, endüktiff kompanzasyon için dışarıdan akım veya gerilim kaynakları da kullanılabilir.VAR jeneratörleri (indüktör veya kapasitör yerine) kullanmanın temel avantajı, üretilen reaktif gücün kontak noktasındaki voltajdan ayrı olmasıdır.



Şekil 33. Şönt kompanzasyon

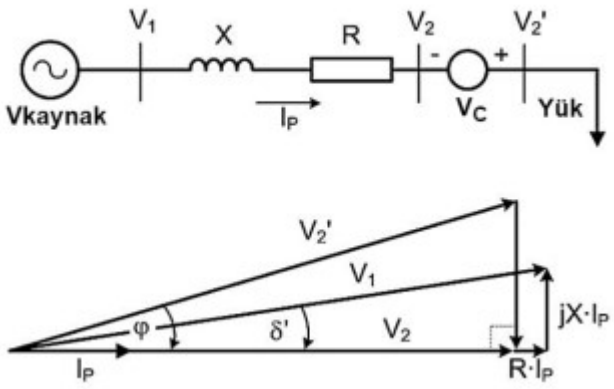
Seri Kompanzasyon

Seri kompanzasyon iyi bilinen ve dağıtım şebekelerinde yaygın olarak faaliyet gösteren bir kompanzasyon türüdür. Temel olarak, seri kompanzasyon, elektrik iletim hattı aracılığıyla endüktif reaktansını en aza indirir, bu da daha yüksek görüntüleme gücü sayesinde artan güç taşınabilirliğine ve şebeke kararlılığına ve verimde artışa sebebiyet verir.

Şekil 34'te seri kompanzasyona ilişkin tek hat ve fazör diyagramları gösterilmektedir. Bu, ifadeye göre, hat reaktansında belirgin bir azalmaya (Xe = XL -XC) ve buna bağlı olarak iletilen güçte bir artışa (gerilim büyüklüklerinin ve açılarının sabit tutularak varsayılarak yol açar.

Burada V1 ve V2, A ve B baralarının gerilim büyüklükleri (V1 ≈V2 ≈V), XL, iletim hattının empedansıdır, XC, seri kapasitörün reaktanıdır, k = XC /XL, sıcaklık derecesidir ve δ bara geriliminin açısal farkıdır. Kapasitör tarafından üretilen reaktif güç, aşağıdaki şekilde kompanzasyon derecesine bağlıdır.

Seri kompanzasyon, enerji iletim hattının termal limite yakın bir değere yüklenmesini sağlayarak akım akışının kontrol edilmesine ve stabilitenin arttırılmasına yardımcı olur. Seri kompanzasyon, sabit bir kapasitör ile olabildiği gibi mekanik anahtarlamalı veya tristör kontrollü bir kapasitör tarafından sağlanabilir. Tristör kontrollü seri kompanzasyon sisteminde seri reaktans daha hızlı ve sürekli kontrol sağlar.



Şekil 34. Seri kompanzasyon (Dixon vd., 2005)

3.5.3 FACTS Cihazları

Elektrik güç sistemlerinde, FACTS cihazları güç akışını etkili bir şekilde kontrol eder ve bara voltajlarını değiştirerek sistem kayıplarını azaltır ve mükemmel sistem kararlılığı sağlar. Daha verimli elektrik sistemleri yönetimine duyulan ihtiyaç, enerji üretimi ve iletiminde yenilikçi teknolojilerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Kombine çevrim elektrik santrali, enerji üretimindeki yeni gelişmelere iyi bir örnektir ve genel olarak FACTS olarak bilinen esnek AC iletim sistemleri, iletim sistemlerini iyileştiren kontrolörlerdir.

Dünya çapında iletim sistemleri sürekli değişim ve yeniden yapılanma sürecinden geçmektedir. Bunlar giderek daha fazla yüklenmekte ve başlangıçta öngörülmeyen şekillerde çalıştırılmaktadır. İletim sistemleri, daha çeşitli üretim ve yük modellerine tepki verecek şekilde esnek olmalıdır. Ayrıca, iletim sistemi varlıklarının ekonomik kullanımı, sanayileşmiş ülkelerdeki kamu hizmetlerinin rekabetçi kalabilmesi ve hayatta kalabilmesi için hayati önem taşımaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde iletim sistemi yatırımlarının optimize kullanımı, sanayinin desteklenmesi, istihdam yaratılması ve kıt ekonomik kaynakların verimli şekilde kullanılması açısından da önemlidir. FACTS kontrolörü bu ihtiyaçlara cevap veren bir teknolojidir. Varlık kullanımı, sistem esnekliği ve sistem performansındaki iyileştirmelerle birlikte iletim sistemlerinin geliştirilme ve kontrol edilme şeklini önemli ölçüde değiştirir. Çeşitli model ve teknikler, cihazların farklı parametre ayarlarıyla belirli bir konuma yerleştirilebileceğini öne sürmektedir.

FACTS cihazları güç elektroniği tabanlı uygulamalar olduğundan, geleneksel mekanik kontrolörlere göre (şönt kapasitörler, seri kapasitörler, faz kaydırıcılar vb.) daha hızlıdırlar.

Bu kontrolörlerin doğru şekilde ayarlanması, iletim sisteminin kararlı çalışma sınırlarını artırır. Bu cihazlar, iletim hatlarının seri empedansı, akımı, voltajı, aktif ve reaktif gücü gibi ağ parametrelerini uygun şekilde dengeleyerek elektrik şebekesinin kontrolünü sağlar (Chethan ve Kuppan, 2024).



Şekil 35. FACTS Teknolojileri

Statik VAR Kompanzatör (SVC)

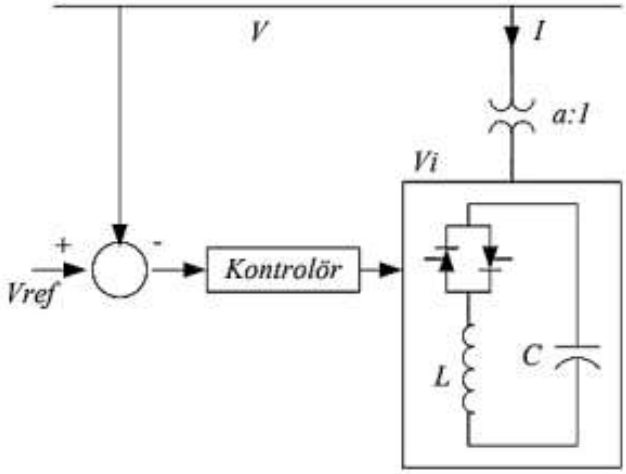
Statik VAR kompansatörleri (SVC'ler), şönt sistemler, kapasitörler ve çok sayıda tristör kontrollü sistemlerden oluşur ve bu sistemler, elektrik sistemlerinin düzenlenmesi ve stabilizasyonunu sağlamak amacıyla hızlı reaksiyon gösterirler. SVC'ler Esnek AC dağıtım sistemi (FACTS) olarak kabul edilebilir ve sistemi güç faktörü (cosφ) değerini bire yaklaştırmak için kullanılır.

Kapasitörler reaktif güç üretir ve indüktörler AC şebekesine bağlandığında reaktif güç alır. Reaktif güç kontrolü için mekanik anahtarlama elemanları ile beraber kullanılmaktadırlar. Son zamanlarda elektronik tabanlı anahtarlama elemanları (tristör) gibi yüksek performanslı yarı iletkenlerin kullanımıyla reaktif güç kompanzasyonunda ilerlemeler kaydedilmiştir. Yarı iletken kullanan sistemlere sabit değişken jeneratörler denir.

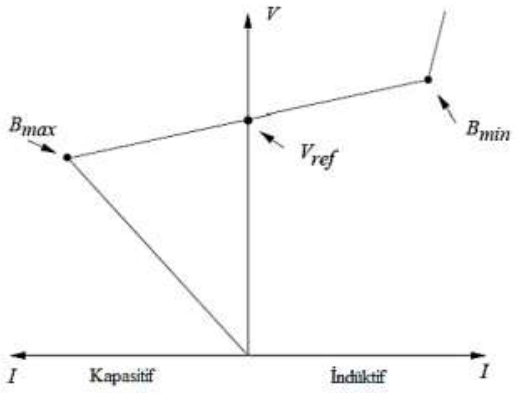
Güç sistemlerinde SVC'ler genellikle gerilim dengelemesi ve yük kompanzasyonu için kullanılırlar. Temel amaç yük bölgesindeki reaktif tüketimin azaltılması ve AC enerjiden elde edilen aktif gücün stabil hale getirilmesidir. Günümüzde kullanılan tristör kontrollü statik değişken jeneratörler, şebekeye kapasitörü devreye sokup çıkararak şönt empedansı elde etmektedir. Var jeneratör çıkışının, uygun anahtarlama yöntemleri kullanılarak kapasitiften endüktife değiştirilebilir. SVC'ler ayrıca dağıtım uygulamalarında sistem voltajını düzenlemek için kullanılır. Yükün kapasitif olması durumunda tristör tarafından kontrol edilenler (TCR'ler) sistemdeki değişkenleri absorbe etmek ve böylece sistem

voltajını dengelemek için kullanılır. Yük endüktif ve dolayısıyla gecikmeli ise, tristörler kapasitör sıralarını açan sistem voltajını dengeler. SVC'ler, mekanik anahtarlama kompanzasyonu veya senkron kapasitör yöntemlerinden daha hızlı yanıt verir ve daha güvenilirdir. Ancak bu sistemler bu iki türe göre daha pahalıdır.

SVC'ler şu şekilde sınıflandırılabilir; Tristör anahtarlamalı kapasitör (TSC), Tristör kontrollü (TCR) ve Mekanik anahtarlamalı kapasitör (MSC).(Balaman, 2012)



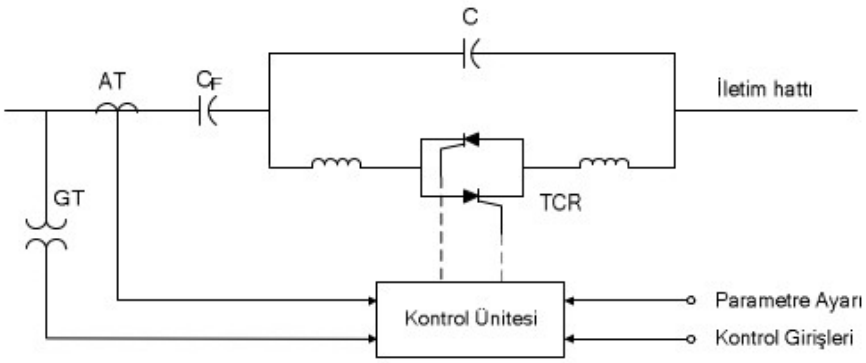
Şekil 36. SVC devre şeması



Şekil 37. SVC I-V karakteristiği

Tristör Kontrollü Reaktör (TCR)

TCR'ler belirli terminallerde iletilen voltajı düzenlemek ve güç faktörünün iyileştirilmesini sağlamak için kullanılır. Yükün dengesiz olması durumunda TCR, yük bağlantısı talepleri için reaktif güç kompanzasyonu da sağlar. Kompanzasyon gereksinimleri, güç kaynağının gerektirdiği reaktif gücü azaltır. Şekil 38'de bir kapasitör tarafından üretilen reaktif güce (endüktif) sahip sürekli bir yükü göstermektedir. Ancak bu kapasitörlerin şarj edilmesi gerektiğinde daha fazla reaktif güç üretilirse, o reaktif güç güç kaynağına akacaktır. Güç kaynağındaki bu önde gelen güç faktörü, TCR kullanılarak sisteme iletilir.



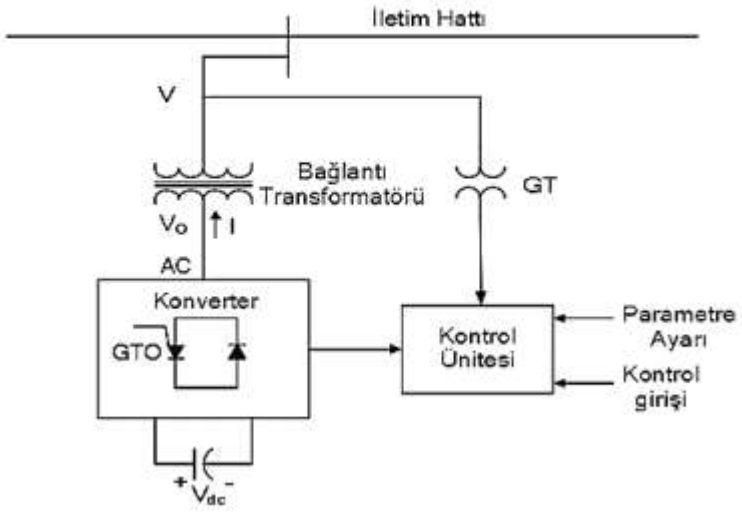
Şekil 38. TCR devre şeması

Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM)

STATCOM'lar, voltajı düzenleyerek ve reaktif güç desteği sağlayarak güç sistemlerinde hayati bir rol oynamaktadır. Bu cihazlar bir voltaj kaynağı dönüştürücü (VSC) mimarisi üzerine inşa edilmiştir ve faz reaktörleri ve bir yükseltici transformatör aracılığıyla şebekeye bağlanır. VSC, modüler çok seviyeli dönüştürücü (MMC) konfigürasyonunda yalıtımlı geçit bipolar transistörlerini (IGBT'ler) içerir.

STATCOM'un temel amacı şebekeye bağlantı noktasındaki voltajı kontrol etmektir. Bunu, reaktif güç üreterek veya emerek, sistem voltajını etkili bir şekilde düzenleyerek ve güç sistemi kararlılığını artırarak başarır. Kondansatör bankları veya senkron kondansatörler gibi geleneksel reaktif güç kompanzasyon cihazlarının aksine STATCOM'lar, çok çeşitli çalışma koşullarında hızlı yanıt ve sürekli kontrol avantajlarını sunar.

STATCOM'un merkezinde, istenen voltaj dalga biçimini üretmek için hızla açılıp kapanabilen, özellikle IGBT'ler olmak üzere yarı iletken güç anahtarlarından oluşan VSC yer alır. VSC içindeki MMC konfigürasyonu, yüksek voltajda çalışmaya izin verir ve minimum harmonik bozulmayla yüksek kaliteli voltajın üretilmesini kolaylaştırır.



Şekil 39. STATCOM devre şeması

STATCOM, VSC tarafından üretilen gerilim dalga biçiminin dinamik olarak ayarlanması yoluyla, şebeke gerilimini aktif olarak düzenler, reaktif güç dengesizliklerini telafi eder, gerilim titremesini azaltır, güç faktörünü iyileştirir ve genel güç sistemi kararlılığını ve güvenilirliğini destekler. STATCOM'un kontrol sistemi, sistem koşullarını sürekli olarak izler ve VSC'nin voltaj çıkışını buna göre uyarlamak için geri besleme kontrol algoritmaları kullanır. Yükseltici bir transformatörün varlığı, STATCOM'un yüksek gerilim iletim şebekesine bağlanmasını sağlayarak etkili güç iletimi ve dağıtımı için uygun gerilim seviyelerini sağlar. Ek olarak faz reaktörleri, kısa devre akımlarının akışını sınırlandırırken STATCOM sistemine empedans ve koruma sağlar .

STATCOM'un çıkış voltajının büyüklüğü AC şebeke voltajını (Vo>V) aştığında, transformatörün reaktansı yoluyla STATCOM'dan AC şebekeye bir I akımı akar ve cihaz iletim hattında reaktif güç üretir. STATCOM yalnızca reaktif gücü değiştirdiğinden, dönüştürücünün çıkış voltajı AC sistem voltajıyla aynı fazdadır ve devredeki kayıplar göz ardı edilir. Bu nedenle dönüştürücünün çıkış akımı hat geriliminden 90° önde olur ve cihaz kapasitif modda çalışır. (Bhole ve Nigam, 2015).

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA BULGULARI

Güç sistemlerinin gelişimi birçok sorunu da beraberinde getirmiştir. Bu konuların doğru analiz edilebilmesi için enerji sistemi analizinin doğru yapılması gerekmektedir. PV güç üretimi sisteme aktif güç sağlayabilir ancak reaktif gücü kontrol edebilme yeteneğinin voltaj kararlılığı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bu nedenle reaktif güç kontrolü son yıllarda üzerinde önemli çalışmalar kaydedilen bir sorun durumuna gelmiştir. Bu çalışmada güneş enerji santralinin aylık üretim değerleri (Aktif güç, reaktif güç vb.) değerleri incelenmiş olup reaktif güç kompanzasyonu olmadığında santralde yaşanan verim kayıpları incelenmiş ve bu bağlamda yapılan reaktif güç parametresini (cos θ) düzeltme işlemi olarak 30 kVAR lık kompanzasyon panosu yapılmıştır. Sisteme entegre edilen bu pano ile üretim değerleri tekrar alınmış olup verim parametresindeki değişiklikler irdelenmiştir.

4.1. Güneş Enerji Santrali Genel Bilgiler

Çalışmamıza konu olan Güneş enerji (PV) santrali şekil 40'de görüldüğü üzere 999 kWh gücünde olup, 3028 adet 400 W lık monokristal paneller ve 100 kW çıkış gücüne sahip 11 adet inverter ile tasarımı yapılmış olup 03.09.2021 tarihinden itibaren enerji üretimine başlamıştır.

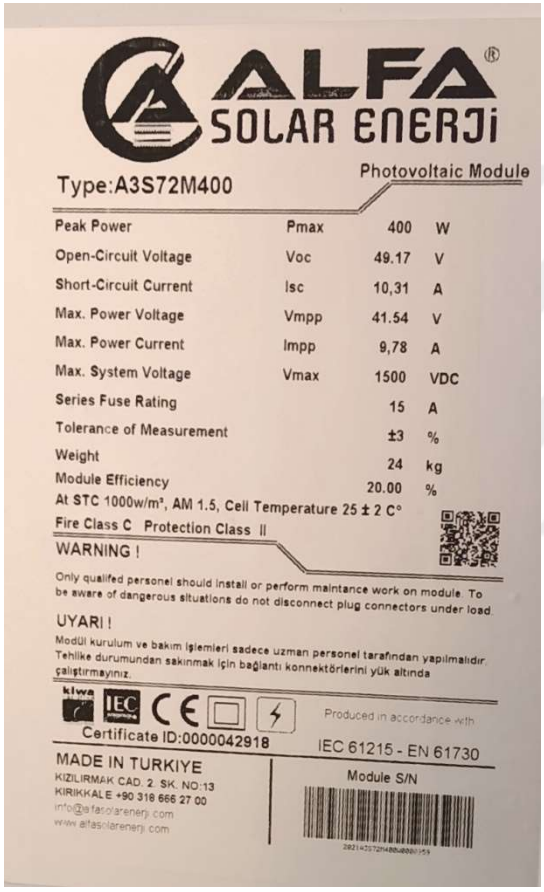


Şekil 40. Güneş enerji santrali

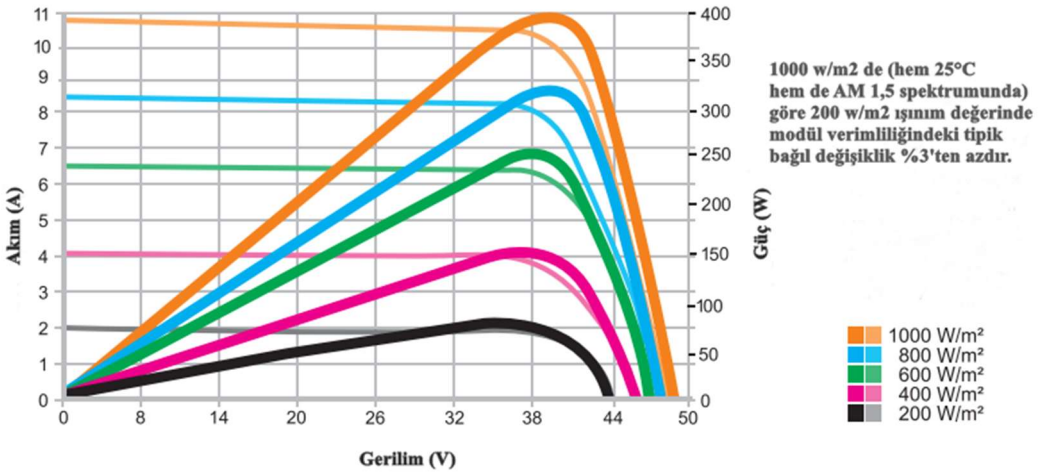
4.2. Santralde Kullanılan Ekipmanlar ve Özellikleri

4.2.1. Solar Panel

Solar (Güneş) paneli fotovoltaik hücreleri kullanarak güneşten toplanan ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren bir tür cihazdır. Santralde kullanılan paneller 400 W gücünde olup 3128 adet den oluşmaktadır. Şekil 41'da kullanılan panel etiketi görünmektedir.



Şekil 41. Santralde kullanılan panel bilgileri



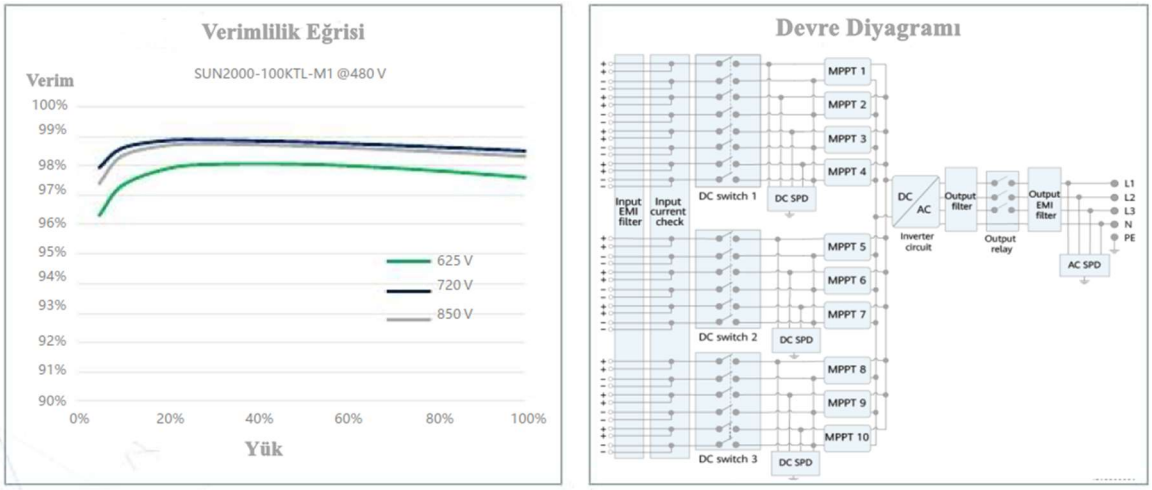
Şekil 42. Alfa solar A3S72M400 ışınım değerleri

4.2.2. Solar İnverter

Solar invertör, güneş panellerinin düzensiz doğru akımını (DC) alternatif akıma (AC) dönüştüren bir elektrik dönüştürücü olarak tanımlanabilir. Bu özelliğinin yanı sıra invertör tüm sistemin kontrol ve izlenmesine olanak sağlar. MPPT (Maksimum Güç Noktası Takipçisi) sayesinde fotovoltaik modülün radyasyona ve sıcaklığa bağlı olarak daima maksimum güçte çalışması sağlanır. Öte yandan elektrik şebekesinin sürekli izlenmesinden ve çeşitli güvenlik standartlarına uygunluğun sağlanmasından da sorumludurlar.



Şekil 43. Huawei Sun 2000 100 KTL-M1 solar inverter



Şekil 44. Huawei Sun 2000 100 KTL-M1 solar inverter devre diagram ve verim eğrisi

Santralde kullanılan solar inverterlerin bilgileri Tablo 3 de verilmiştir.

Tablo 3

Huawei Sun 2000 100 KTL-M1 solar inverter datasheet

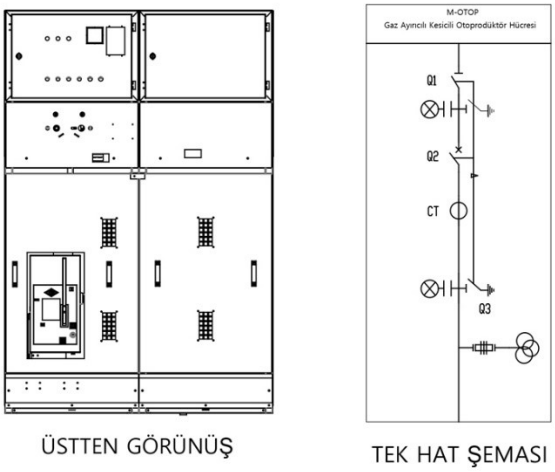
VERİM	
Maksimum Verim	%98.8-480 V , %98,6-380V/400V
Verim (Avrupa)	%98.6-480 V , %98,4-380V/400V
GİRİŞ	
Maksimum Giriş Gerilimi (V)	1100 V
Maksimum Akım (MPPT)	26 A
Maksimum Kısa Devre Akımı (MPPT)	40 A
Başlangıç Gerilimi (V)	200 V
Gerilim Aralığı (MPPT)	200V-1000V
Nominal Giriş Gerilimi (V)	720 V-480V_{ac} , 600 V-400 V_{ac} ,570 V-380 V_{ac}
Giriş Sayısı	20
MPPT İzleyici Sayısı	10
ÇIKIŞ	
Nominal AC Aktif Güç (W)	100.000 W
Maksimum AC Görünür Güç (VA)	110.000 VA
Maksimum AC Aktif Güç (W)	110.000 W
Nominal Çıkış Gerilimi (V)	480 V/400 V/380 V, 3W+(N)+PE
Şebeke Frekansı (Hz)	40 Hz/60 Hz
Nominal Çıkış Akımı (A)	120.3 A-480 V,144.4A-400 V,152,0 A-380 V
Maksimum Çıkış Akımı (A)	133,7 A-480 V,160,4 A-400 V,168,8 A-380 V
Ayarlanabilir Güç Faktörü	0,8 LG……..0,8 LD
Toplam Harmonik Bozulum	<3%

4.2.3. Hücreler ve Beton Köşk

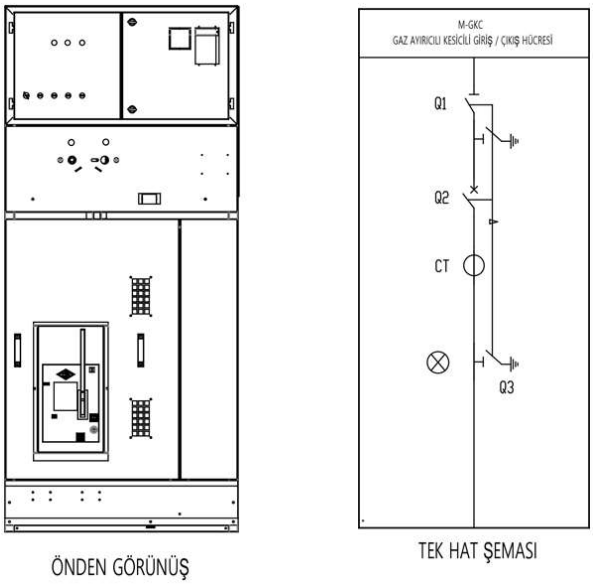
Santralde üretilen enerjinin sisteme bağlantı noktasında yüksek gerilim de 31,5-0,4 kV 1250 kVA trafo, anahtarlama elemanları olarak Otoprodüktör hücresi, trafoyu korumak için sigortalı trafo koruma hücresi ve üretilen enerjinin ölçümü için akım-gerilim ölçü hücresi kullanılmıştır. Bu hücrelerin bağlantılarının yapılabilmesi için 7400 mm uzunluğunda beton köşk kullanılmıştır.



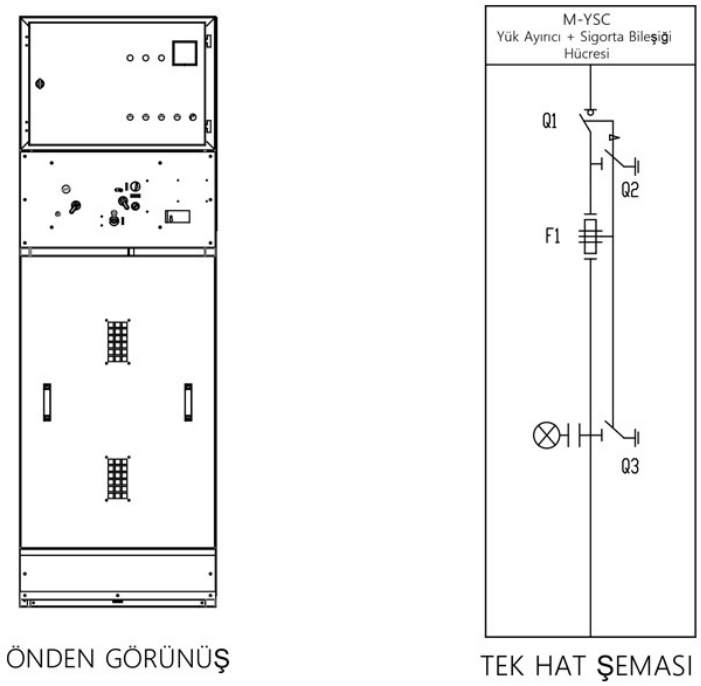
Şekil 45. Beton köşk ve hücreleri



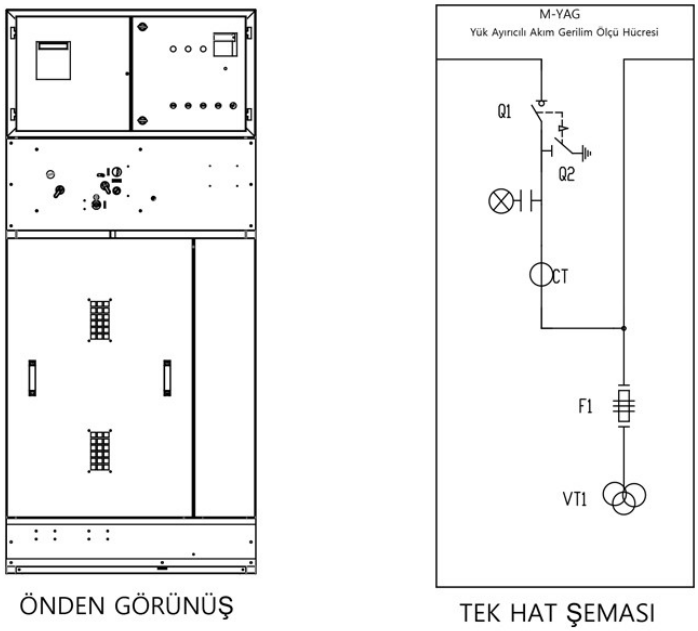
Şekil 46. Otoprodüktör hücresi



Şekil 47. Kesicili giriş-çıkış hücresi



Şekil 48. Yük ayırıcılı sigortalı trafo koruma hücresi



Şekil 49. Yük ayırıcılı akım-gerilim ölçü hücresi



Şekil 50. Hermetik tip trafo (0,4/31,5 kV)

4.3.Verim Analizi

Üzerinde çalışma yapılan santral üretime geçmiş olduğu tarihten itibaren üretim değerleri analiz edilmiş olup tablo 4'de belirtilmiştir.

Tablo 4

Aylık üretim değerleri tablosu

Tarih	Aktif Üretim (kWh)	Reaktif Güç Tüketimi (kVAr)	Verim Kaybı (%)
Eylül 21	194.837,03	4.816,20	2,47
Ekim 21	166.517,70	4.912,80	2,95
Kasım 21	107.859,08	5.283,67	4,90
Aralık 21	70.837,13	7.483,05	10,55
Ocak 22	87.479,93	7.131,15	8,15
Ortalama Verim Kaybı			**5,80**

Santralin üretime geçtiği tarihten itibaren aylık aktif güç, reaktif güç üretim değerleri cezaya girilen tarihler (iyileştirme yapılan tarihe kadar) tablosu yukarıdaki çizelgede belirtilmiş olup, 5 aylık verim kaybının ortalaması alınarak **%5,80** bulunmuştur. Santrallerde bu denli kayıplar göz ardı edilemeyecek kadar büyük bir kayıp anlamı taşıdığından dolayı iyileştirme yapılması kaçınılmaz hale gelmiştir.

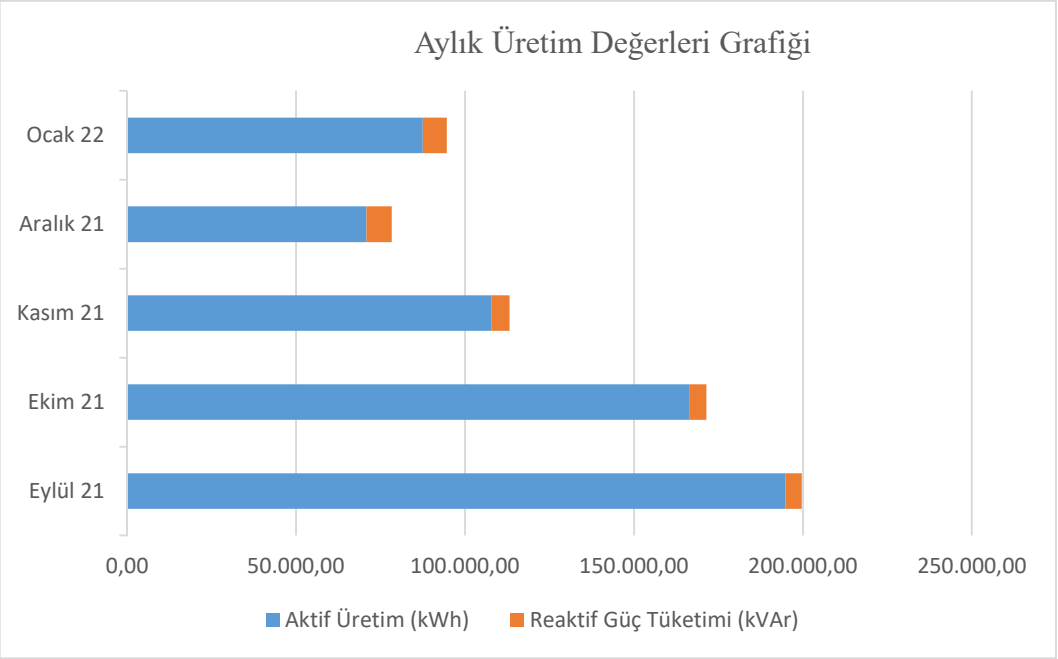
Tablo 5

Güç üretim ve tüketim değerleri tablosu

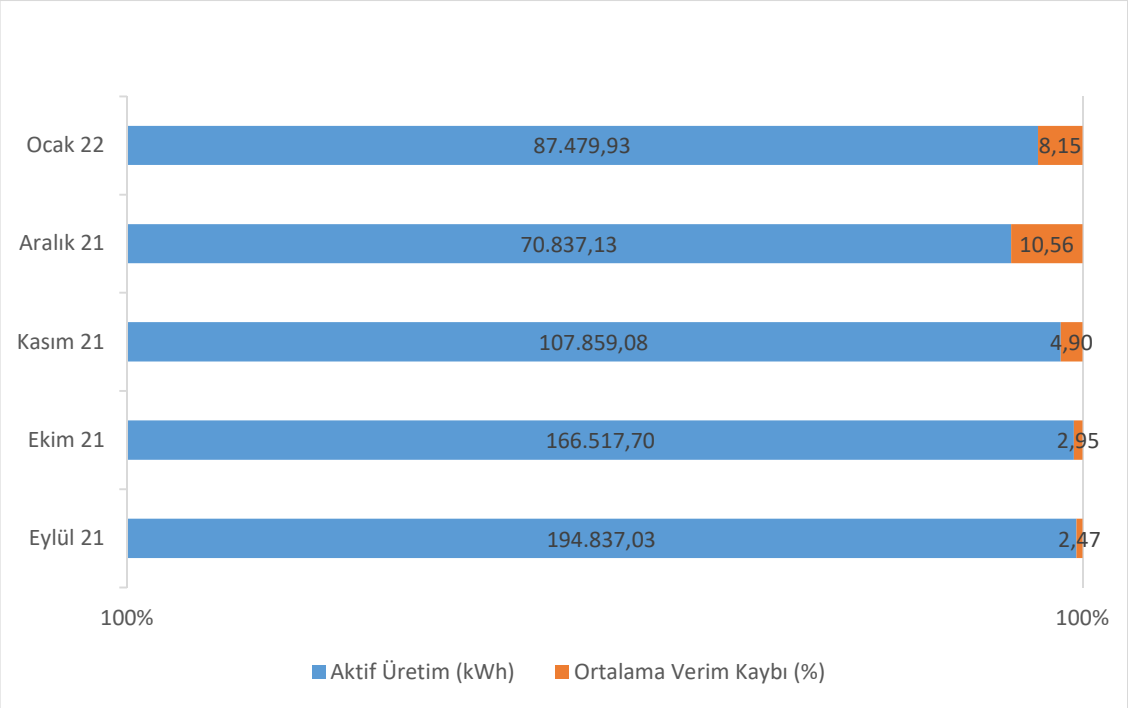
SON OKUMA TARİHİ	31.12.2021	AKIM TRAFO ORANI		REAKTİF		
SONRAKİ DÖNEM	2022/03	GERİLİM TR. ORANI		KAPASİTİF		
ÖNCEKİ YIL TÜKETİMİ(kWh)	0,000	CARİ TÜKETİMİ (kWh)	0,000			

AKTİF	SON ENDEKS	İLKENDEKS	ÇARPAN	ÜRETİM (kWh)	TR KAYBI(kWh)	EK ÜRETİM	BİRİM FİYAT	AKTİF ENERJİ BEDELİ
U0	793,843	751,236	1725	73.497,075			0,227527	16.722,57
U1	692,604	650,490	1725	72.646,650			0,227527	
U2	100,252	99,958	1725	507,150			0,227527	
U3	0,987	0,788	1725	343,275			0,227527	
AKTİF ÜRETİM TOPLAMI (kWh)				73.497,075		TOPLAM TUTAR 1:		16.722,57

REAKTİF	SON ENDEKS	İLK ENDEKS	Oran	TÜKETİM (kVARh)	EK TÜKETİM	BİRİM FİYAT	REAKTİF TÜKETİM BEDELİ
ENDÜKTİF(Ç)	0,000	0,000	0,000				
KAPASİTİF(Ç)	39,793	35,455	0,000	7.483,050		0,381999	2.858,52
ENDÜKTİF(V)	45,959	40,759	0,122				
KAPASİTİF(V)	4,984	4,535	0,011				
REAKTİF TÜKETİM TOPLAMI (kVARh)				7.483,050	TOPLAM TUTAR 4:		2.858,52



Şekil 51. Santral aylık üretim değerleri grafiği



Şekil 52. Aktif üretime göre verim (%) kaybı grafiği

4.4. Düzeltici Faaliyetler

Santral verileri, faturaları ve üretim değerleri incelendiğinde 5 aylık süreçte işletme Reaktif güç tüketiminin yasal sınırları aştığından dolayı cezaya girdiği ve ortalama %5,80 verim kaybı yaşadığı gözlemlenmektedir.

Verilere göre Aralık 2021 üretim ve tüketim değerleri göz önüne alındığında;

Aktif Güç (P): 2.659,95 W (İç tüketimden kaynaklanmaktadır.)

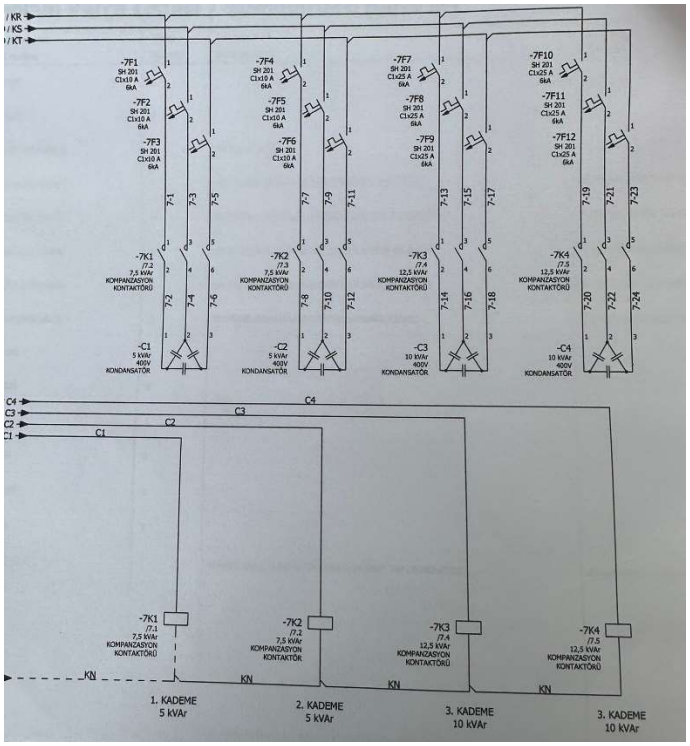
Reaktif Güç (Q): 7.483,05 kWAr (İç tüketimden kaynaklanmaktadır.)

Görünür Güç (VA) : $S2 = \sqrt{P^2 + Q^2}$ = 73.924,90 VA

$\cos \varphi = \frac{P}{S}$ = 0,035

φ = 87,99^0 bulunmaktadır. Bu değeri sıfır (0) dereceye yaklaştırmak zorunda olduğumuz için kompanzasyon yapılması mecburiyet kazanmaktadır.

Bu kaybın önüne geçebilmek için 30 kVAr lik klasik bir Reaktif güç kompanzasyonu tasarımı yapılarak sisteme entegre edilmiştir.



Şekil 53. Reaktif güç kompanzasyon tasarımı ve tek hat şeması

Sisteme entegre edilen 30 kVAR lik kompanzasyon panosunun üreticiye maliyeti 4500 $ olup, reaktif güç tüketiminden dolayı cezaya girilen ortalama tüketim 5 aylık 29.686,25 kVAR'dir. Güncel kur rakamlarına bakıldığında 1$=12,18 TL dir. kVAr güç tüketimine karşılık gelen rakam 0,34 TL=0,027$/kVAr olmaktadır. 5 aylık ortalama reaktif güç tüketim değerine karşılık gelen ceza değeri 0,027$*29.686,25=801.52 $ olmaktadır. Toplamda 28 ay (2,3 yıl) içerisinde kendisini amorti etmektedir. Ortalama santral ömrü 25 yıl olarak kabul edilirse kendisini çok kısa süre içerisinde amorti edebilmektedir.



Şekil 54. Reaktif güç kompanzasyon panosu

30 kVAr lik kompanzasyon panosu sisteme entegre edildikten sonra inverterlerden alınan değerler incelenmiş olup aşağıdaki Tablo 6 da gösterilmiştir.

Tablo 6

İnverterlerin güç faktörü değerleri

Güç Faktörü(Inverter1)	Güç Faktörü(Inverter10	Güç Faktörü(Inverter2)	Güç Faktörü(Inverter	Güç Faktörü(Inverter	Güç Faktörü(Inverter5	Güç Faktörü(Inverter6	Güç Faktörü(Inverter7	Güç Faktörü(Inverter8)	Güç Faktörü(Inverter9)
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ VE ÖNERİLER

Ülkemizde ve Dünya da fosil kaynaklı enerji üretimi artık yerini yenilenebilir enerji kaynaklarına bırakmaktadır. Artan enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için yenilenebilir enerji kaynakları (güneş enerjisi, hidroelektrik, rüzgar, jeotermal enerji santralleri) popülerliğini gün geçtikte artırmaktadır. Enterkonnekte şebeke sistemine dahil olan bu santraller ulusal elektrik dağıtım şebekesinde bir takım problemleri beraberinde getirmiştir. Bunlardan en önemlilerinden bazıları gerilim kararlılığı, harmonik bozulmalar ve Reaktif güç problemidir.

Yapılan çalışma kapsamında Güneş enerji santralinde aylık üretim değerleri incelenmiş olup verim kayıpları ortaya çıktığı görülmüştür. Ortaya çıkan bu kaybı engellemek adına kompanzasyon tasarımı yapılmış ve pano üretimi gerçekleştirilerek sisteme entegre edilmesi halinde %5,80 gibi büyük bir oranda verim artışı yaşanmıştır. Mevcut yönetmelikler incelendiğinde endüktif reaktif güç tüketimi aktif gücün %20'si kapasitif reaktif güç tüketimi ise aktif gücün %15 ine kadar müsaade edilmektedir. Ancak bu kayıplar üretim tesisleri açısından büyük verim kayıpları oluşturmaktadır. Kompanzasyon ile ilgili tüketim tesislerine yönelik yönetmelik maddeleri bulunmasına rağmen üretim tesisleri için net bir emredici hüküm bulunmamaktadır.

Sadece üretim tesisleri değil tüketim tesisleri (fabrikalar, işletmeler vb.) de dahil kaliteli elektrik (sabit gerilim seviyesi ve kesintisiz enerji) için kompanzasyon parametresine büyük önem verilmelidir.

KAYNAKÇA

ABB. 2014. Technical Application Papers No.10 Photovoltaic plants. Crystal Silicom Modüles (s.12-13) Erişim: 14 Şubat 2024, https://library.e.abb.com/public/9b867d77d5e0da7fc1257ca60057221b/QT10%20EN%202013.pdf

Balaman, O. (2012). Reaktive Power Compensatıon. (Yayın Numarası: 328448). Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Lisanüstü Eğitim Enstitüsü, İzmir.Ulusal Tez Merkezi adresinden erişildi.

Bhole, S. S., Nigam, P. (2015). "Improvement of Voltage Stability in Power System by Using SVC and STATCOM" . *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* , 4(2), 749-755.

Chethan, M., Kuppan, R. (2024). "A review of FACTS device implementation in power systems using optimization techniques*". Journal of Engineering and Applied Science* , 1-36.

Çelik, A. N., Koç, F. (2020). "Polikristal Tür bir Fotovoltaik Panelin I-V Karakteristiğinin Analitik Modellenmesi ve Deneysel Doğrulanması". *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2491–2515.

Çifci,A.,2015. Facts Cihazları Kullanılan Elektrik Güç Sistemlerinde Enerji Fonksiyonu İle Gerilim Kararlılığı Analizi. (Yayın Numarası: 413358). Doktora Tezi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya. Ulusal Tez Merkezi adresinden erişildi.

Çöteli , R., Aydoğmuş, Z. (2007). "DGM-Statcom ile Reaktif Güç Kompanzasyonu", *Politeknik Dergisi*, 10(2),123-128. https://doi.org/10.2339/2007.10.2.123-128

Dixon, J., Moran, L., Rodriguez, J., Domke, R. (2005). "Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review". *Proceedings of the IEEE*, *93*(12), 2144-2164.

Duffie, J., Beckman, W. (2020). *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. Wıley:New Jersey

Gutierrez, J. H., Montano, J. C. (2002). "Power-quality improvement in reactive power control using FC-TCR circuits", *Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference*, (880-885).

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2022). *Bilgi Merkezi, Enerji, Güneş* (10 Mayıs 2024). Erişim adresi: https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes.

Hekim, M. (2011).Fotovoltaik-Rüzgar Türbini Hibrit Enerji Üretim Sistemlerinin Ulusal Elektrik Şebekesine Etkilerinin İncelenmesi. (Yayın Numarası: 287633). Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli. Ulusal Tez Merkezi adresinden erişildi.

İbrahim, D. (2011). *Güneş Enerjisi Uygulamaları*. Emo Yayınları: Ankara

İçel, Y. (2019). Günes Panelleri İle Üretilen Enerjinin Ortam Bilgileri Kullanılarak Yapay Sinir Ağları İle Tahmini. (Yayın Numarası: 575318). Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya. Ulusal Tez Merkezi adresinden erişildi.

İşin, E. (2022). Güneş Enerji Santrallerinde Güç Faktörü Ve Gerilim Kararlılığının Belirlenmesi. (Yayın Numarası: 748170). Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya. Ulusal Tez Merkezi adresinden erişildi.

Kayri, İ. (2017). Güneş Panelleri İle Üretilen Enerjinin Ortam Bilgileri Kullanılarak Yapay Sinir Ağlarıyla Tahmini. (Yayın Numarası: 484265). Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitsü, Elazığ. Ulusal Tez Merkezi adresinden erişildi.

MEB (2011). Elektrik Elektronik Teknolojisi. *Kompanzasyon Cihazları ve Montajı* (s. 3-14), Erişim: 15 Mart 2024, https://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Kompanzasyon%20Cihazları%20Ve%20Montajı.pdf

Léna, G. (2013). Rural Electrification with PV Hybrid Systems. *Internatıonal Energy Agency Photovoltaıc Power Systems Programme Club Of Afrıcan Natıonal Agencıes And Structures In Charge Of Rural Electrıficatıon,* Erişim: Temmuz 2013, http: www.iea-pvps.org

Madhurankata, T., Manohar, D. (2016). “A Review on Power System Voltage Stability and Optimization Techniques”. *Int. Journal of Engineering Research and Application* , 6(11), 6-14.

Oymak, A. (2021). Günes Enerjisi Dağıtım Sistemlerinde PV-STATCOM’un Etkileinin İncelenmesi.(Yayın Numarası: 666607). Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya. Ulusal Tez Merkezi adresinden erişildi.

Öztürk, H.ve Kaya, D. (2013). *Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi, Fotovoltaik Teknoloji.* Umuttepe Yayınevi: Kocaeli

Öztürk, H. H. (2017). “Güneş enerjisinden fotovoltaik yöntemle elektrik üretiminde güç dönüşüm verimi ve etkili etmenler”. *Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi Bildirileri*, 18-21 Ekim 2017, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, İzmir.1-14.

Rezk, H., Hasaneen, E.-S. (2015). “A new MATLAB/Simulink model of triple-junction solar cell and MPPT based on artificial neural networks for photovoltaic energy systems”. *Ain Shams Engineering Journal*, 2015(6), 873-881, http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2015.03.001

Said, İ. K., Pirouti, M. (2009). “Neural network-based Load Balancing and Reactive Power Control by Static VAR Compensator”. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 1(1), 1793-8198.

Saner, Y. (2016). *Güç Kompanzasyonu* . Birsen Yayınevi: İstanbul

Şahin, M.E., Okumuş, H. İ. (2013). “Güneş pili modülünün matlab/simulink ile modellenmesi ve simülasyonu”. *EMO Bilimsel Dergisi,*4(2), 17-25.

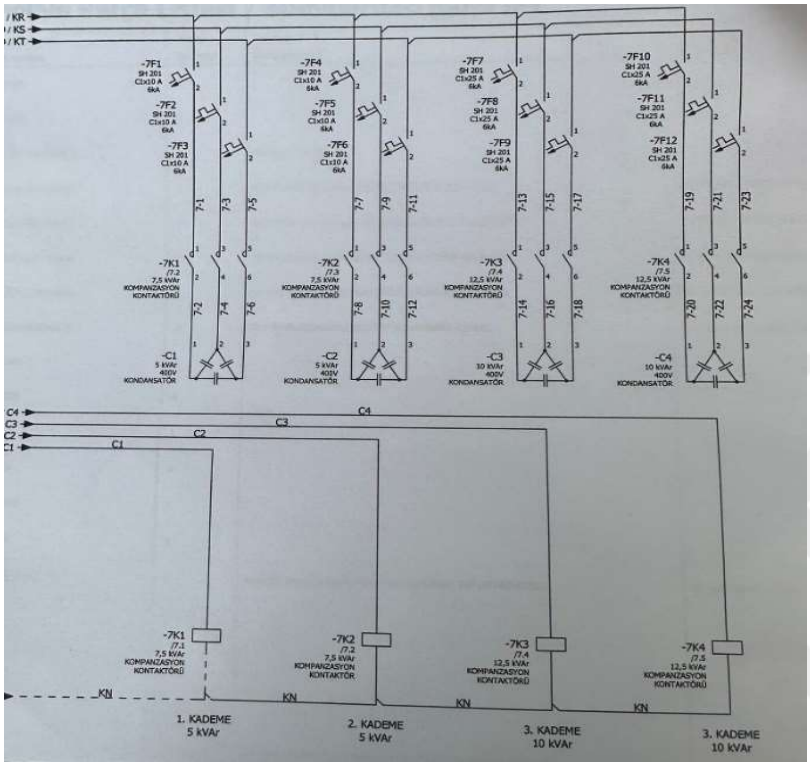
Venkata CH, R., Manjunatha , A. (2021). “Compensation of Reactive Power in Grid-Connected Solar PV Array System Using STATCOM and Fixed Capacitor Bank”. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 69(10), 128-136. https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I10P216

Zahedi, A. (2006). “Solar Photovoltaic (PV) Energy: Latest Developments İn The Building İntegrated And Hybrid PV Systems”, *Renewable Energy*, 711-718.

EKLER

Ek Şekil 1

Reaktif güç kompanzasyon tasarımı ve tek hat şeması



Ek Tablo 1

İnverterlerin kompanzasyon sonrası güç faktörü değerleri

Güç Faktörü(Inverter1)	Güç Faktörü(Inverter10	Güç Faktörü(Inverter2)	Güç Faktörü(Inverter	Güç Faktörü(Inverter	Güç Faktörü(Inverter5	Güç Faktörü(Inverter6	Güç Faktörü(Inverter7	Güç Faktörü(Inverter8)	Güç Faktörü(Inverter9)
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.998	0.998	0.998	0.996

EK 1

TÜRKİYE MÜLKİ İDARE HARİTASI

