

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BÜYÜK ÖLÇEKLİ ENTEGRE PV GÜÇ SİSTEMİNDE
BİRİNCİL FREKANS DESTEĞİ İÇİN YENİ BİR KONTROL
STRATEJİSİ

OMER ALİ OSMAN ALFAKİ

KOCAELİ 2024

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BÜYÜK ÖLÇEKLİ ENTEGRE PV GÜÇ SİSTEMİNDE
BİRİNCİL FREKANS DESTEĞİ İÇİN YENİ BİR KONTROL
STRATEJİSİ

OMER ALİ OSMAN ALFAKİ

Prof. Dr. Nurettin ABUT

Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Bekir ÇAKIR

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Server FIRAT

Jüri Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 13.02.2024

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje

kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....
Omer Ali Osman Alfaki

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi

ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐

Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐

Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒

Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....
Omer Ali Osman Alfaki

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Öncelikle tüm hayatım boyunca bana verdiği nimetten dolayı Rahman ve Rahim olan Allah'a hamdederim. Allah'ın salât ve selâmı, son Peygamber Muhammed (s.a.v.)'e, ailesine ve ashabına olsun.

Samimi ifade etmek isterim ki, Araştırma çalışmalarım boyunca sürekli desteği, rehberliği ve motivasyonu için Prof. Dr. Nurettin Abut'a teşekkür ederim. Mesleki yaklaşımı ve pratik bilgisi araştırmamı tamamlamamda bana yardımcı oldu. Anlayışlı rehberliğini takdir etmekten gurur duyuyorum. Araştırma çalışmalarına zaman ayırdığı, yorum ve önerileri için Doç. Dr. Mehmet Zeki BİLGİN'e teşekkür ederim.

Ayrıca bana bu burs ödülünü veren Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı'na (YTB) ve bu diplomayı almam ve bitirmem konusunda sürekli destek verdikleri için çok teşekkür ederim. Ayrıca Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nün tüm akademik personeline de çok teşekkür ediyorum.

Anneme, babama, kardeşlerime koşulsuz sevgileri, destekleri ve duaları için çok minnettarım. Ayrıca bu araştırmamı şu anda savaşın alevleriyle boğuşan tüm Sudan halkına ithaf ediyorum. Son fakat bir o kadar da önemlisi, sürekli teşvikleri, destekleri ve duaları için arkadaşlarıma ve sınıf arkadaşlarıma teşekkür etmek istiyorum.

Şubat – 2024

Omer Ali Osman Alfaki

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER	4
2.1. Giriş	4
2.2. Fotovoltaik Sistem Modeli.....	5
2.2.1. PV Elektriksel Özellikleri.....	6
2.3. Fotovoltaik Sistem Çeşitleri.....	9
2.3.1. Şebekeye Bağlı PV Sistemi	9
2.3.2. Bağımsız PV Sistemler	10
2.4. Maksimum Güç Noktası Takibi.....	12
2.4.1. Maksimum Güç Noktası Teknikleri	12
2.4.1.1. Perturb and Observe (P&O)	13
2.4.1.2. Incremental Conductance Algorithm	13
3. ENTEGRE PV SİSTEMLERİNDE GÜÇ KONTROLÜ VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ	16
3.1. PV Sistemin Büyük Ölçekli Entegrasyonu	16
3.2. PV Sistemlerinde Güç Kontrolü	16
3.2.1. PV Sistemlerinin Batarya Enerji Depolama Sistemi ile Entegrasyonu	17
3.2.1.1. PV Sistemleri ile BESS Kontrolü.....	18
3.2.2. Batarya Enerji Depolama Sistemi Olmadan PV Sistemlerinin Entegrasyonu	20
3.2.2.1. PV Aktif Güç Kısıtlaması	21
3.2.2.2. Delta Güç Kontrolü	21
3.2.2.3. DC Bağlantı Kondansatörü (DC- Link Capacitor).....	22
3.2.2.4. De-loaded Güç Kontrolü	22
3.3. PV Sistemde Güç Elektroniği	24
3.3.1. PV Sistemindeki Güç Elektroniği Topolojileri.....	24
3.3.2. PV Sistemlerinde Güç Elektroniği Kontrolü	27
3.3.2.1. Histerez Akım Kontrolörü (Hysteresis Current Controller).....	27
3.3.2.2. Öngörülü Akım Kontrolörü (Predictive Current Controller)	28
3.3.2.3. Lineer PI Akım Kontrolörü	28
4. SİSTEM TASARIMI VE ÖNERİLEN KONTROL STRATEJİSİ.....	31
4.1. Giriş	31
4.2. Eviriciler	31
4.2.1. Evirici Yapısı	31
4.2.2. Şebekeye Bağlı Eviricinin Matematiksel Modeli	32
4.3. Evirici Kontrolü	34
4.4. Önerilen Kontrol Stratejisinin Metodolojisi	35
4.5. Darbe Genişliği Modülasyonu	39

4.5.1. Sinüzoidal Darbe Genişliği Modülasyonu (SPWM)	40
4.6. LCL Filtre Tasarımı	42
4.6.1. LCL Filtresinin İndüktör ve Kapasitörleri	43
4.7. Faz Kilitli Döngü (PLL)	45
5. SİMÜLASYON SONUÇLARI	47
5.1. Simülasyon.....	47
5.1.1. Evirici Kontrolü	49
5.1.2. Darbe Genişliği Modülasyonu	52
5.1.3. LCL Filtresi	52
5.2. Bulgular ve Tartışma	54
5.2.1. Yedek Gücü Olmayan PV Sistemi	54
5.2.2. Yedek Güce Sahip PV Sistemi	56
5.3. Sonuçlar ve Önerileri	59
KAYNAKLAR.....	60
EKLER	64
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER.....	66
ÖZGEÇMİŞ.....	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Parazitik elemanlarla PV pillerinin temel yapısının elektriksel modeli	6
Şekil 2.2.	İdeal PV pilini temsil eden basit diyot devresi ve akım kaynağı	7
Şekil 2.3.	$G=1000\text{W/m}^2$ ve $T=25^\circ\text{C}$ 'de PV pili için akım-gerilim eğrisi	8
Şekil 2.4.	I-V eğrisinin aynı durumundaki güç- gerilim eğrisi.....	8
Şekil 2.5.	(a) güneş ışıınımı (b) sıcaklığının farklı değerleri için akım-gerilim eğrisi	9
Şekil 2.6.	Şebekeye bağlı PV sistemleri	10
Şekil 2.7.	DC yüklü basit bağımsız ftovoltaik sistem	11
Şekil 2.8.	AC yükü besleyen eviricili bağımsız fotovoltaik sistem.....	11
Şekil 2.9.	Ayarla ve Gözlemle Algoritması.....	14
Şekil 2.10.	Güneş enerjisi panelleri dizisi PV eğrisindeki artımlı iletkenlik algoritmasının prensibi	14
Şekil 2.11.	Artımlı iletkenlik yönteminin akış şeması	15
Şekil 3.1.	De-loaded PV sistemli güç-gerilim Eğrisi	17
Şekil 3.2.	BESS için DC-AC dönüştürücü kontrolü	19
Şekil 3.3.	PV sistemi için frekans droop kontrolü.....	21
Şekil 3.4.	Yüksüz (de-loaded) PV sistemi	23
Şekil 3.5.	Şebekeye bağlı eviricide tek kademeli topoloji.....	25
Şekil 3.6.	Şebekeye bağlı eviricinin çift aşamalı topolojisi.....	26
Şekil 3.7.	Şebekeye bağlı eviricinin çok aşamalı topolojisi	26
Şekil 3.8.	Üç fazlı şebeke bağlantılı evirici için histeresiz kontrolörü	28
Şekil 3.9.	şebekeye bağlı eviricideki Lineer-akım kontrolörü.....	29
Şekil 3.10.	senkron referans çerçevesinde akım-kontrol	29
Şekil 4.1.	İki seviyeli üç fazlı şebekeye bağlı evirici	32
Şekil 4.2.	Dış ve iç döngü akım kontrolörüne sahip şebekeye bağlı PV sistemi.....	35
Şekil 4.3.	MPP'de PV sistemi çalışması grafiği	37
Şekil 4.4.	De-loaded PV grafiği sestimi	37
Şekil 4.5.	PV sistemi için önerilen kontrol stratejisi	38
Şekil 4.6.	Önerilen stratejiyi kullanarak V_{dc_ref} i kontrol eden referans akımın üretimi	38
Şekil 4.7.	PV sistemi için de-loading stratejisinin akış şeması	39
Şekil 4.8.	Sinüzoidal Darbe Genişliği Modülasyon Bloğu.....	40
Şekil 4.9.	Sinüzoidal PWM'ye göre kapı sinyalleri ve gerilim dalga biçimleri	41
Şekil 4.10.	Şebekeye bağlı evirici eşdeğer devresi	42
Şekil 4.11.	Üç fazlı şebekeye bağlı LCL filtre eşdeğer devresi	43
Şekil 4.12.	Tek fazlı şebekeye bağlı LCL filtre eşdeğer devresi	44
Şekil 4.13.	Faz kilitli döngü (PLL) yapısı	46
Şekil 4.14.	Senkronizasyondan sonra (a) ve önce (b) şebeke geriliminin V_d bileşeninin vektör diyagramı	46
Şekil 5.1.	İncelenen 3-baralı sistemi.....	47
Şekil 5.2.	Sistemin Matlab Simulink'i	48
Şekil 5.3.	Üç fazlı iki seviye eviricisinin Simulink modeli	49
Şekil 5.4.	PV de-loaded kontrolörü ile akım kontrolü.....	50
Şekil 5.5.	De-loading stratejisi kullanılmadan ortak bağlantı noktasındaki akım	51
Şekil 5.6.	De-loading stratejisinin kullanımıyla ortak bağlantı noktasındaki akım	51

Şekil 5.7.	Matlab Simulink'te PWM yöntemi uygulanması	52
Şekil 5.8.	PWM örneği olarak S1 ve S4 için kapı kontrol darbeleri	53
Şekil 5.9.	LCL filtresi öncesi tek fazlı gerilim (evirici tarafı).....	53
Şekil 5.10.	LCL filtresinden sonra tek fazlı gerilim (şebeke tarafı)	54
Şekil 5.11.	De-loaded olmayan PV sistemi için referans voltajı (V_{mpp})	55
Şekil 5.12.	Yedek gücü olmayan PV sisteminden PCC'ye gelen aktif güç (P_{max})	55
Şekil 5.13.	PV sistemi yedek güç olmadan şebekeden alınan aktif güç	56
Şekil 5.14.	De-loaded PV sistemi için referans gerilimi ($V_{mpp} + \Delta V$)	57
Şekil 5.15.	Yedek güce sahip PV sisteminden PCC'ye gelen aktif güç	57
Şekil 5.16.	Yedek güce sahip PV sistemi olduğunda şebekeden gelen aktif güç	58
Şekil 5.17.	PV sistemi de-loaded ve de-loaded olmadığında frekans yanıtı	58



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

C	: Capacitance (kapasitans), (F)
C _{dc}	: DC link capacitance (DC bağlantı kapasitansı) , (μF)
d-q	: Direct and quadrature axis components (doğrudan ve karesel eksen bileşenleri)
E	: Şebeke geriliminin genliği, (KV)
ed, eq	: Senkron referans çerçevesindeki şebeke voltajı, (V)
fr	: Frekans modülasyonu, (Hz)
fres	: Rezonans frekansı
fsw	: Anahtarlama frekansı, (KHz)
G	: Insolation (Güneşlenme), (W/m ²)
Hc	: Atalet sabiti, (s)
İ1a, i1b, i1c	: Evirici tarafında üç faz (a,b, ve c) akımları, (A)
İ2a, i2b, i2c	: Şebeke tarafında üç faz (a,b, ve c) akımları, (A)
İca, icb, icc	: LCL filtre kondansatör akımları, (A)
Iph	: Diyot akımı, (A)
Isc	: Kısa devre akımı, (A)
Imp	: Maksimum güç noktasında akım, (A)
Ki	: Orantısal katsayı
Kp	: İntegral katsayısı
Ku	: Kritik değere
L	: İndüktans, (μH)
L1	: Evirici tarafındaki indüktans, (μH)
L2	: Şebeke tarafındaki indüktans, (μH)
M	: Genlik modülasyonu
Q1,..., Q6	: Eviricinin anahtarları
R	: Direnç, (Ω)
S	: Görünür güç, (KVA)
T	: Sıcaklık, (°C)
Tn	: Sandart test koşulunun sıcaklığı
Vdc	: DC Bağlantı gerilimi, (V)
Vcd, Vcq	: Filtre kondansatörünün gerilimi
Vin	: Giriş gerilimi, (V)
V*a, V*b ve V*c	: Akım kontrolörü tarafından üretilen referans gerilimleri, (V)
Va0, Vb0 ve Vc0	: İnvörtör çıkış gerilimleri, (V)
Vga, Vgb ve Vgc	: Şebeke üç faz (a,b, ve c) gerilimleri, (KV)
Vmp	: Maksimum güç noktasında gerilim, (V)
Voc	: Açık devre gerilimi, (V)
Vtri	: Taşıyıcı gerilimi, (V)
W	: Açısal frekans, (rad/s)
Wres	: Rezonans açısal frekansı, (rad/s)
Wsw	: Anahtarlama açısal frekansı, (rad/s)
Θ	: Tahmin açısı
Θg	: Şebeke geriliminin faz açısı
ΔV	: De-loading gerilimi, (V)
ΔP	: Rezerv güç, (MW)
Δf	: Frekans sapması, (Hz)

Kısaltmalar

AC	: Alternative Current (Alternatif Akım)
BESS	: Battery Energy Storage System (Pil Enerji Depolama Sistemi)
CPG	: Constant Power Generation (Sabit Enerji Üretimi)
CSI	: Current Source Inverter (Akım Kaynağı İnvörtörü)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
GCC	: Gravity Constant Changing (Yerçekimi Sabiti Değişiyor)
HCC	: Hysteresis Current Controller (Histerez Akım Kontrolörü)
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Junction Transistor (Yalıtılmış Kapılı Bipolar Bağlantı Transistörü)
LFC	: Load Frequency Control (Yük Frekansı Kontrolü)
MOSFET	: Metal–Oxide–Semiconductor field-Effect Transistor (Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistor)
MPP	: Maximum Power Point (Maksimum Güç Noktası)
MPPT	: Maksimum Güç Noktası Takibi
MW	: Megawatt
MVAR	: Megavolt Ampere Reactive (Megavolt Amper Reaktif)
PV (FV)	: Photovoltaic (Fotovoltaik)
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişliği Modülasyonu)
P&O	: Perturb and Observation (Gözlem)
PFC	: Primary Frequency Control (Güç Frekans Kontrolü)
PLL	: Phase Locked Loop (Faz Kilitli Döngü)
SOC	: State Of Charge (Şarj Durumu)
SRF	: Synchronous Reference Frame (Senkron Referans Çerçevesi)
SPWM	: Sinusoidal Pulse Width Modulation (Sinüzoidal Darbe Genişliği Modülasyonu)
SVM	: Space Vector Modulation (Uzay Vektör Modülasyonu)
STC	: Standard Test Condition (Standart Test Koşulu)
V _{mpp}	: Voltage Maximum Power Point (Maksimum Güç Noktası Gerilim)
V _{ref}	: Voltage Reference (Gerilim Referansı)
VSI	: Voltage Source Inverter (Gerilim Ara Devreli Evirici)

BÜYÜK ÖLÇEKLİ ENTEGRE PV GÜÇ SİSTEMİNDE BİRİNCİL FREKANS DESTEĞİ İÇİN YENİ BİR KONTROL STRATEJİSİ

ÖZET

Son araştırmalarla güneş enerjisi üretim sistemlerinin yapısı nedeniyle, fotovoltaiik sistemlerde maksimum güç noktası izleme teknikleri yoluyla olası maksimum güç üretimi yapılmaya çalışıldığı gözlenmektedir. PV sistemleri maksimum güçle çalıştığında, frekans ayarı sorunları genel sistem için ciddi riskler oluşturmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için yapılan çalışmaların çoğunda PV sistemlerinde enerji depolama kullanılmış; birkaç çalışmada ise güç rezervi kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Bu tezde, PV sistemlerinin frekans ayarını sağlamak için enerji depolama kullanmadan yeni bir kontrol stratejisi önerilmiştir. Kontrol stratejisi aracılığıyla, PV sistemi, ek gerilim değeri (de-loading voltage, ΔV) ekleyerek maksimum güç noktasından bir miktar farklı bir noktada çalıştırılmaktadır. Böylece yedek güce ulaşılmış olmaktadır. Frekansta bir sapma meydana geldiğinde, PV sistemi rezerve edilen gücün bir kısmını serbest bırakır. Sonuç olarak, PV sistemleri frekans ayarı kolay gerçekleşmektedir. Ayrıca önerilen kontrolör aracılığıyla, frekans sapmasına orantılı güç mevcut gücü aştığında, PV eğrisinin sol tarafında çalışmayı önlemek için sistem maksimum güç noktası modunda çalışmaktadır. Önerilen kontrolörün etkinliğini doğrulamak için PV sisteminde 3 baralı bir güç sistemi kullanılmıştır. Kullanılan bu sistem çalışması sonuçlarını gözlemlemek için, de-loading stratejisi olan ve olmayan PV sistemleri için Matlab@R2020b simülasyon sonuçları, stratejinin yedek güç elde etme ve bunu sistem frekans desteği için geri kullanma yeteneği kazandırma çalışma sonuçları denenmiştir. Tüm durumlar, standart test koşulları altında simüle edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: De-loaded Fotovoltaiik Sistemi, Eylemsizlik Yanıtı, Fotovoltaiik Sistem (PV), Maksimum Güç Noktası, Yedek Güç.

A NEW CONTROL STRATEGY FOR PRIMARY FREQUENCY SUPPORT IN LARGE-SCALE INTEGRATED PV POWER SYSTEM

ABSTRACT

Due to the intermittent nature of solar systems, recent research has spent enormous efforts to operate photovoltaic systems with maximum power that can be generated through maximum power point tracking techniques. When PV systems work with maximum power there will not be any reserve of power to participate in frequency regulation, which presenting a severe risk to the overall system inertia. The majority of studies that were conducted to overcome this issue used energy storage with PV systems, a few studies used power reserve control methods. In this thesis, a new control strategy without any use of energy storage has been proposed to enable PV systems to participate in frequency regulation. Through the control strategy, the PV system operated away from its maximum power point by adding additional voltage (de-loading voltage ΔV). Hence, reserve power is achieved. When a deviation in frequency occurs, the PV system releases part of the power that was reserved. Consequently, PV systems participated in frequency regulation. Furthermore, through the proposed controller, when the power proportional to the frequency deviation exceeds the available power, to avoid working at the left side of the PV curve, the system works at the maximum power point mode. PV system connected to 3-bus system to validate the effectiveness of the proposed controller. Matlab@R2020b simulation results for the PV system with and without using de-loading strategy approved the ability of strategy to achieve reserve power and use it back for system frequency support. All the cases taken at standard test conditions.

Keywords: De-loaded Photovoltaic System, Inertia Response, Photovoltaic System (PV), Maximum Power Point, Reserve Power.

1. GİRİŞ

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları, konvansiyonel üretimde elektrik enerjisinin ana kaynağı olarak hızla yaygınlaşmaktadır. Dahası, yenilenebilir enerjinin, sera gazı emisyonlarının en aza indirilmesi gibi sevimli doğası, küresel olarak hükümetleri bu tür endüstrilere büyük teşvikler yapmaya zorlamaktadır. Şebekeye bağlı fotovoltaik (PV) enerji üretimi, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre avantajları nedeniyle çoğu ülkede giderek daha popüler hale gelen çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. PV sistemlerinin bu genişleyen etkisi, geleneksel enerji santrallerinin büyük bir kısmının yerini almaktadır. Bu nedenle, yüksek güç üretim periyotlarında enerji dengesizliklerine neden olabilir. Bunun sonucunda yapılan çalışmalarda (Rajan ve diğ., 2021; Zhang ve diğ., 2023), güç sistemlerinin doğal dengesi bozulabilmektedir. PV dönüştürücülerin çoğunluğu maksimum üretimi sağlamak için maksimum güç noktasında (MPP) çalışacak şekilde tasarlanmaktadır. Üstelik bu dönüştürücü sistemler PV'yi şebekeden tamamen ayırır. Bu nedenle PV sistemleri sistem ataletine katılamamaktadır. Bu açıdan bakıldığında PV sistemlerinin frekans ayarına katılımının sağlanması son derece gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Literatürde (Zhong ve diğ., 2021), bataryalar veya ultrakapasitörler gibi enerji depolama sistemleri, boşaltma yükleri ve de-loaded PV sistemleri gibi azaltma gücü, büyük ölçekli PV sistemlerinin frekans düzenlemesine katkıda bulunmasını sağlamak için önerilen temel çözümler olarak görülmektedir.

PV de-loading kontrolü ile DC-link gerilim kontrolü arasındaki koordinasyonu sağlayan bir kontrol stratejisi (Lyu ve diğ., 2018)'te önerilmiştir. Ekonomik özellikten ödün verilmesini önlemek için PV sisteminin MPP'da çalıştırılması ve PV penetrasyon seviyesine bağlı olarak yük boşaltma moduna geçilmesiyle optimum çalışma tekniği refereste (Rajan ve Fernandez, 2019) gerçekleştirilmiştir. Yumuşak teknikler (Verma ve diğ., 2021)'te önerilmiştir. Bu araştırmadaki teknikler, rezerve edilecek aktif güç yüzdesinin elde edilmesi için yapay sinir ağı (YSA) ve bulanık mantık kontrolü kullanılarak maksimum kullanılabilir güç bilgisine ulaşılmıştır. (Zarina ve diğ., 2014)'da de-loaded PV olan sistemini uygulamak için kullanılan bir PI kontrolörü, yedek güce ulaşmak için de-loading gerilimi ekleyerek MPP'tan bir miktar çalışmasını sağlar ve onu sadece frekans sapmasına değil aynı zamanda mevcut rezerve de bağlı olarak kullanır. (Xin ve diğ., 2013)'de önerilen, frekans düşüşü kontrol modu ve acil durum kontrol modu

olan iki çalışma modu bulunmaktadır. Bu çalışma daha çok ortam koşullarına önem vermektedir. PV sistemlerinin hızlı aktif güç kontrolü, beklenmedik olaylarda hızlı frekans yanıtına sahip PV sistemlerine olanak tanıyan çalışmalar (Hoke ve diğ., 2017)'de önerilmiştir. Ayrıca MPP'i bu çalışmada çevrimiçi olarak tahmin edilmiştir. Ancak yalnızca kısmi gölgeli olmayan PV sistemlerine uygulanmıştır. Referans (Zhong ve diğ., 2021)'de gerçekleştirilen güç rezervi kontrolü, PV dizi akım ve gerilim bilgilerinden tahmin edilen mevcut maksimum güç kullanılarak yapılmıştır. Frekans regülasyonunu sağlamak için birleşik sanal atalet kontrolü ve düşüş kontrolü uygulanır. (Sangwongwanich ve diğ., 2017)'da ana ve bağımlı PV'ler kavramı kullanılmıştır. Master (Ana) PV'lerin MPP izleyici (MPPT) modunda çalıştırılmasıyla MPP'in bilgileri elde edilmiştir. Daha sonra bu bilgiler rezerv edilen gücü kontrol etmek için bağımlı PV'ler tarafından kullanılmıştır. Tek diyotlu bir matematiksel model ve dalgalanma kontrolü uygulanarak, en küçük kareler eğrisi uyarlama yöntemi kullanılarak MPP'i belirlemek için (Batzelis ve diğ., 2017)'da ölçülen numuneler kullanılmıştır.

Bu tezde de-loading tekniği olarak tanımlanan, yedek güç için bir kontrol stratejisi önerilmektedir. PV sisteminin MPP'tan belirlenmiş farklı bir mesafede çalıştırılması ve frekans sapma sinyaline bağlı olarak rezerve edilen gücün gerektiğinde geri kullanılması sağlanarak uygulanmıştır. Yedek olarak belirlenen güç, PV sistemi, de-loading gerilimi (ΔV) eklenerek MPP'ten uzakta çalıştığında elde edilmektedir. Dolayısıyla PV sistemi ($V_{mpp} + \Delta V$) geriliminde çalışır. Önerilen strateji, bahsedilen tekniklerin aksine tek aşamalı topoloji ile uygulanmış olup kontrol kolaylığı sağlamaktadır. Ayrıca önerilen de-loading tekniğinin Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM) kontrolöründe yer alması, sistemi, literatürde kullanılan, karmaşık sistemlere benzemeyen basit bir hale getirmektedir. Bu stratejiyi diğerlerinden ayıran özellik, hala yedek güce ihtiyaç varken MPP eğrisinin sol tarafında çalışmamayı garanti etmesidir. Bu nedenle, frekans sapma sinyali mevcut yedek güçten büyük olduğunda PV, MPP'da çalışacaktır. Yöntemin detaylı açıklama ve anlatımları, Bölüm 4'te gösterilmektedir.

Tezin çalışmalarında Bölüm 2'de güneş pilleri ve PV sistem uygulamalarının tarih boyunca ve gelişimi anlatılmıştır. Ayrıca elektriksel özellikleri, PV sistemin modelleri ve PV sistem türleri de bu bölümde ele alınmıştır. Kullanılan MPP izleme tekniklerine ilişkin kısa bilgiler verilmektedir. Bölüm 3'te PV sistemlerin büyük ölçekli entegrasyonu ve

enerji depolamalı ve depolamasız PV sistemlerinin güç kontrolü ayrıntıları verilmiştir. Güç elektroniği topolojileri ve bunların kontrolü de bu bölümde sunulmaktadır. Önerilen kontrol stratejisinin metodolojisi, sistem tasarımı ve genel bilgiler, Bölüm 4'te sunulmaktadır. Sistem simülasyonu, sonuçlar ve değerlendirme irdellemeler sonuç kısmı olan Bölüm 5'te verilmiştir.



2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

2.1. Giriş

Fotovoltaik, güneş radyasyonunu elektriğe dönüştürmenin doğrudan yöntemi olarak kabul edilir (Hoffmann, 2007). Fotovoltaik etkiye dayalı olarak üretilen elektrik temiz enerji olduğundan, yenilenebilir enerji kaynaklarının büyük küresel desteği nedeniyle PV sistemlerin kullanımı yakın gelecekte elektrik üretim kaynağı olarak ana rol oynayacaktır (Krauter, 2006).

Büyük ölçüde ısınımın, elektrik enerjisine dönüşmesinden sorumlu olan güneş pillerinden oluşur. Pratik olarak ve güneş pillerini ortamdaki koşullardan korumak ve esas olarak daha yüksek bir gerilim sağlamak amacıyla, güneş pilleri seri olarak bağlanır ve PV paneli oluşturmak için cam ve plastik levha arasına paketlenir. Daha sonra panel gruplarının seri veya paralel bağlanmasıyla PV dizisini oluşturulur (Hairat ve Ghosh, 2017).

Güneş pillerinin ilk ticari kullanımı uzay araçlarında olmuştur. 1970'lerin başına kadar, bu birincil ticari uygulamaydı (Krauter, 2006). Sonraki yıllarda güneş pillerine olan talep hızla artarak sınırlı bir endüstriyel üretime yol açtı. Sonuç, pillerin elektriksel özelliklerinde bir iyileşmenin yanı sıra fiyatlandırmada bir düşüş oldu. Daha sonraları, konut uygulamalarında güneş pillerinin mütevazı bir kullanımına yol açmıştır. Bununla birlikte, on yıldan fazla bir süredir uzay birincil pazar olarak kaldı. 1973/74 yıllarında yaşanan petrol krizi döneminde, güneş pilin üretim potansiyelinin yeniden değerlendirilmesini teşvik etti (Krauter, 2006). Bu dönemde, mütevazı başlangıçlardan karasal bir güneş pili işi ortaya çıktı ve son yıllarda çarpıcı bir şekilde büyüdü. Karbondioksit emisyonlarını azaltmaya yönelik küresel ilginin artması ve "küresel ısınmanın etkileri" ile mücadelede ilk adım olarak, sanayileşmiş ülke hükümetleri, PV teknolojileri geliştirmek için büyük teşvikler ayırdı. Sonuç olarak PV sistemlerinin fiyatlarının düşmesine yol açtı. Bu, önemli bir elektrik enerjisi üretimi kaynağı olarak PV pillerin kullanımını artırmaya yardımcı oldu.

PV sistemlerin yaygın kullanımından sonra tüketicilere enerji sağlamak için bağımsız, şebekeye bağlı ve hibrit olmak üzere üç ana konfigürasyon gerçekleştirildi. Buradaki tez çalışmasında, arızalar sırasında birincil frekans regülasyonunu desteklemek için büyük ölçekli şebekeye bağlı PV sisteminin kabiliyeti, incelenen şebekeye bağlı model ele

alınacaktır. Özellikle dağıtılmış üretimde (DG), şebekeye bağlı PV sistemleri kullanmanın çeşitli faydaları nedeniyle, kullanımları yaygın olarak artmıştır. Bu yeni senaryo, çeşitli çalışma koşulları altında dinamik performanslarını doğru bir şekilde tahmin edebilen ve teknolojinin elektrik şebekesine entegrasyon için uygunluğunun kapsamlı bir değerlendirmesine izin veren, şebekeye bağlı etkili bir PV sistem değerlendirme aracının geliştirilmesini gerektiriyor (Hu, 2016). Genişleyen PV sistemlerinin penetrasyonu geleneksel senkron enerji büyük bir bölümünün yerini aldı. Bu nedenle, maksimum güç üretim periyotları sırasında dengesizliklere ve dolayısıyla güç sisteminin doğal atalet tepkisinin bozulmasına neden olabilir (Rajan ve diğ., 2021). PV dönüştürücülerin çoğu maksimum üretim sağlamak MPP'da çalışacak şekilde tasarlandığından, dönüştürücülerle PV sistemler şebekeden tamamen ayırır.

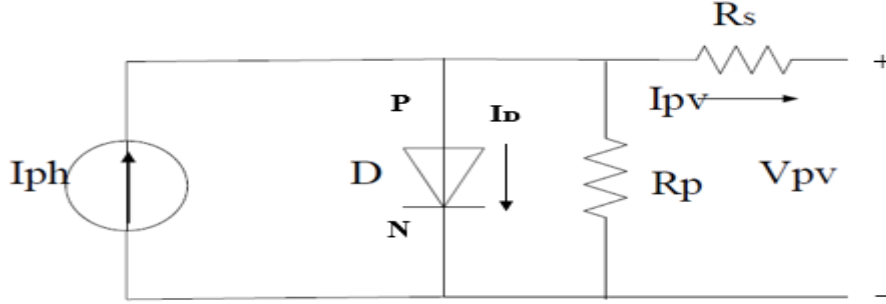
PV sistemlerinin frekans regülasyonuna katılmasını sağlamak için kullanılacak bataryalar veya ultrakapasitörler gibi enerji depolama sistemleri, boşaltma yükü ve PV de-loaded sistemi gibi gücü azaltma olmak üzere üç ana yöntem kullanılmaktadır. Enerji depolama ünitelerinin kurulumu, yüksek işletme ve bakım maliyetleri içerip sistemin karmaşıklığını artırır. Ayrıca bataryaların ömrü PV pillere göre daha kısadır. Güç rezervi kontrolüne dayalı bir frekans düzenleme tekniğinin, güç sisteminin frekans tepkisini artırma açısından enerji depolamadan üstün olduğu önerilmektedir (Zhong ve diğ., 2021). Bu nedenlerle tez çalışmada, PV sistemin MPP'tan uzakta, deload gerilimi ekleyerek çalışmasını sağlayıp yedek güç kaynağı olarak PV de-loaded sistemi kullanılacaktır. Bu nedenle PV sistemi, bozulmalarda sistemin ayrılmış gücü kullanmasını sağlayan maksimum güç altında çalışır.

2.2. Fotovoltaik Sistem Modeli

Güneş pilleri, kendisini "geleneksel" enerji kaynaklarından ayıran bazı özelliklere sahip bir elektrik birimidir. Bu nedenle, şebekeye bağlı veya bağımsız cihazları beslemek üzere PV pillerin doğru boyutlandırılması ve tasarımı gerekir. Dolayısıyla, güvenli bir kurulum sağlamak ve özellikle arızaları belirlemek ve PV sistemleri monte etmek için PV pil özelliklerinin ön koşulları iyi bilinmelidir.

Bir PV pili, aslında foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren geniş alanlı bir p-n yarı iletken bağlantısıdır. Bir PV pilinin temel yapısı, temel elektrik bileşenleri olarak

gösterilebilir ve modellenenebilir (Frede Blaabjerg, 2017). Şekil 2.1, p-n bağlantısını ve PV pilini oluşturan diğer elemanları göstermektedir. Fotonun elektrona dönüşümü akım kaynağı I_{ph} olarak gösterilebilir, Üretilen akım, pile çarpan ışığın yoğunluğu ile orantılıdır. Diyot ve akım kaynağı, PV pilin ideal modelini oluşturur.



Şekil 2.1. Parazitik elemanlarla PV pillerinin temel yapısının elektriksel modeli

2.2.1. PV Elektriksel Özellikleri

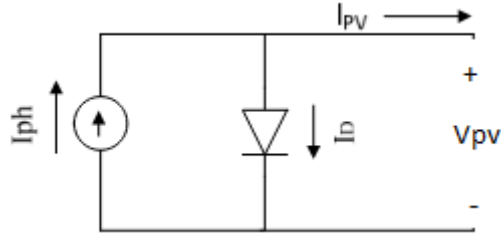
PV panelinin elektriksel özellikleri, akım-gerilim karakteristikleri ile açıklanabilir. W/m^2 olarak ölçülen güneş ışığı G , ve santigrat derece ($^{\circ}C$) olarak ölçülen sıcaklık T , bir PV pilinin çalışma özelliklerini ve güç üretimini belirleyen en önemli iki çevresel parametredir (Frede Blaabjerg, 2017). Bu iki değişken ile PV işletme özellikleri arasındaki ilişkiyi göstermek için matematiksel model uygulanabilir. Esasen Şekil 2.1'de gösterildiği gibi akım kaynağı ve diyottan oluşan basit PV modelini temsil etmek kolaydır. Denklem (2.1)'in gösterdiği gibi, üretilen akım I_{ph} , güneş ışığına ve sıcaklığa bağlıdır.

$$I_{ph}(G, T) = [I_{scn} + K_i(T - T_n)] * \frac{G}{G_n} \quad (2.1)$$

I_{ph} , I_{scn} , K_i , T_n ve G_n değerleri ticari PV pillerinin veri sayfasından alınabilir. Diyot akımı ve gerilim, I_d ve V_d sırasıyla Denklem (2.2)'deki gibi üstel ilişki olarak temsil edilir.

$$I_d(T_d, V_d) = I_s(T) \left[\exp\left(\frac{V_d}{aV_t(T)}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

PV akımı ve PV gerilimi arasındaki ilişki, Şekil 2.2 dikkate alınıp Kirchhoff'un akım yasası kullanılarak kolayca bulunabilir.



Şekil 2.2. İdeal PV pilini temsil eden basit diyot devresi ve akım kaynağı

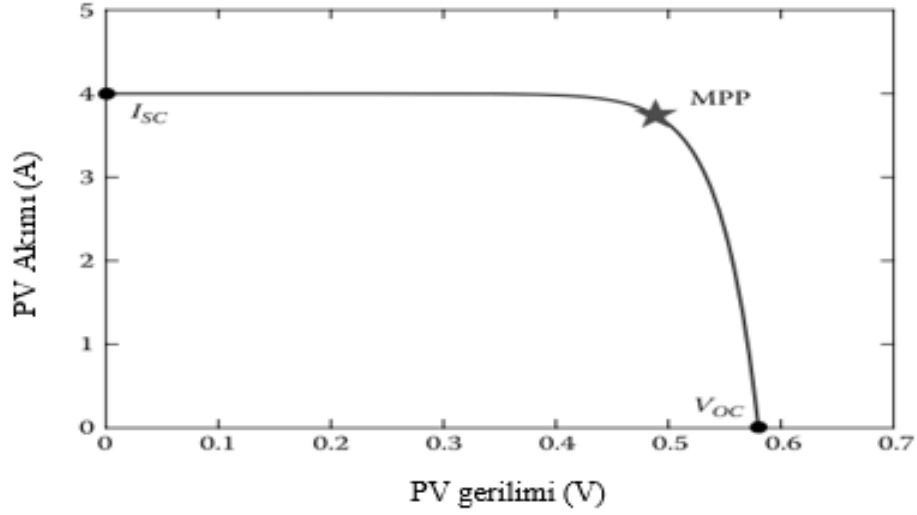
$$I_{pv} = I_{ph}(G, T) - I_d(T, V_{pv}) \quad (2.3)$$

Denk.(2.1) ve Denk.(2.2)'ye göre, Denklem (2.3)'teki gibi PV akım I_{pv} 'ye bağlı olarak tanımlanır. Çıkış akımının güneş ışığı G ve sıcaklık T ile orantılı olduğu açıktır. Denklem (2.3)'te, güneş ışığına ve sıcaklığa verilen belirli bir gerilim için PV akımını hesaplamakta kullanılabilir. Bu denklemler ile, temel cebirsel yöntemler kullanılarak belirli bir akıma dayalı olarak PV gerilimi hesaplanabilir. Belirli bir güneş ışığı G , sıcaklık T , PV gerilimi ile I-V eğrisi elde edilebilir. Çiftin PV gerilim ve akım değerlerinin çarpılmasının sonucu olarak çıkış gücü bulunabilir.

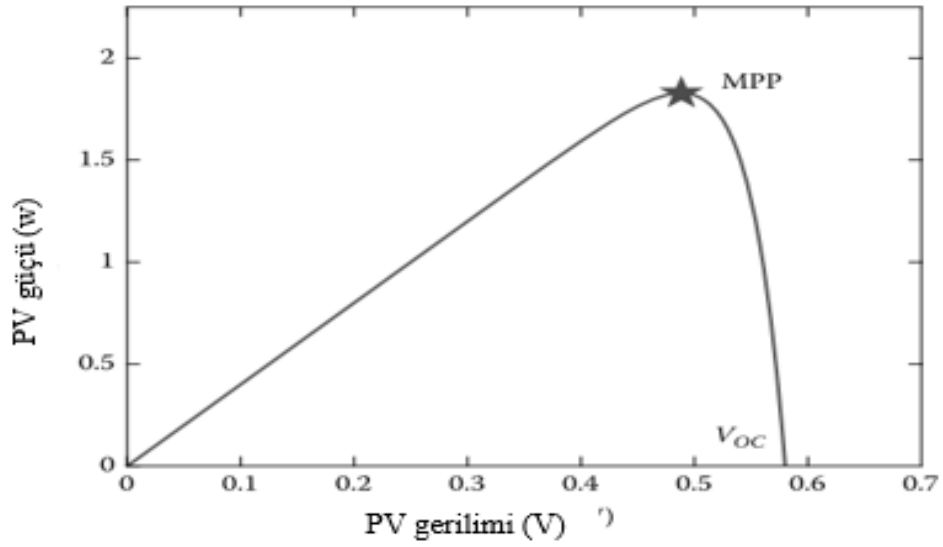
Şekil 2.3'te gösterilen PV pilin I-V eğrisinde, MPP olarak adlandırılan ve yıldızla gösterilen noktayı tanımlar. Şekil 2.3'te V_{oc} ile gösterilen açık devre gerilimi, PV akımı 0A'ya eşit olduğunda PV gerilimini gösterir. Ayrıca PV kısa devre akımı, I_{sc} ile gösterildiği gibi PV gerilimi 0V'a eşit olduğu noktada PV akımı gösterilir. PV kısa devre akımı ve açık gerilim değerleri PV pil üreticisinin veri sayfasında bulunabilmektedir.

Gerilim-güç eğrisi, I-V eğrisine dayalı olarak Şekil 2.4'te gösterildiği gibi elde edilebilir. PV akımının kısa devre noktasında maksimum değere sahip olmasına rağmen, gerilim ve akımın çarpımı sonucu, bu noktada gerilim sıfır olduğu için elde edilen güç de sıfırdır. Açık devre noktasında akım ve gerilim ters çevrilir, böylece güç bir kez daha sıfır olur (Frede Blaabjerg, 2017). Değişen güneş ışınlamı ve sıcaklığın akım-gerilim eğrisi üzerindeki etkisi Şekil 2.5'te gibi gösterilebilir. PV akım özellikleri, güneşlenme ile orantılıdır. Dolayısıyla ışıma arttıkça kısa devre akımı ve MPP akımı da artacaktır. Öte yandan, PV açık devre gerilimi sıcaklıkla ters orantılıdır, dolayısıyla sıcaklık arttıkça açık devre gerilimi de azalacaktır. Genel olarak güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürme işlemi incelendiğinde, güneş pillerine çarpan ışığın sadece bir kısmının elektrik enerjisine

dönüştüğü söyleyebilir. Dolayısıyla PV pillerinin verimlilik değeri, çıkış elektrik enerjisinin güneş ışınımının girişine oranıdır.

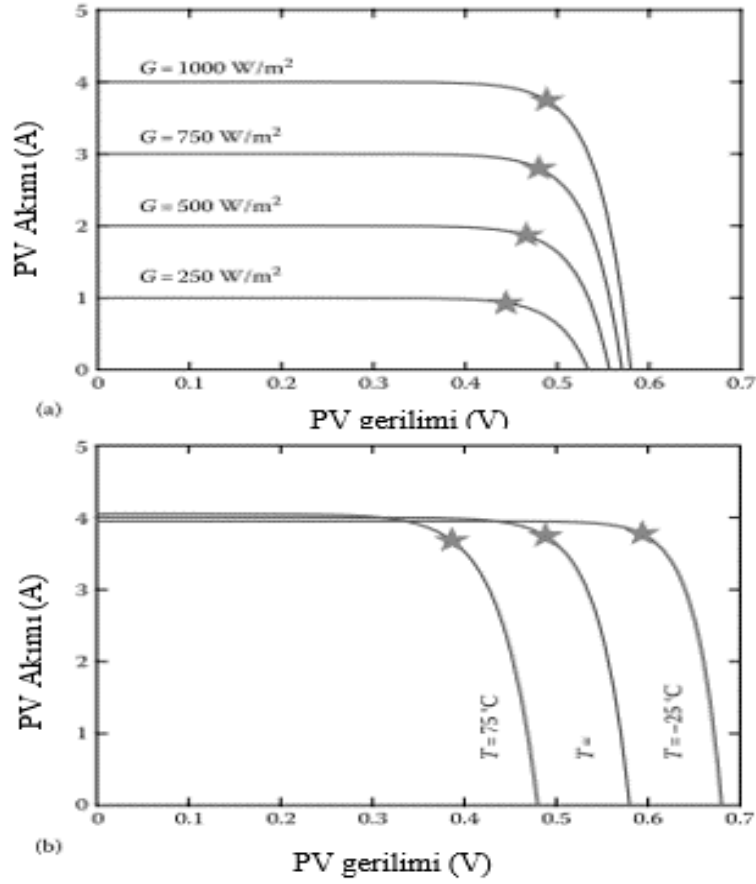


Şekil 2.3. $G=1000\text{W/m}^2$ ve $T=25^\circ\text{C}$ 'de PV pili için akım-gerilim eğrisi



Şekil 2.4. I-V eğrisinin aynı durumundaki güç- gerilim eğrisi

Tek güneş pilleri arasındaki boşluklar nedeniyle güneş ışığı tüm PV panelini kapsamadığından, tek güneş pilinin verim değeri panelden daha büyüktür, çünkü ışınım tek güneş pilinin tamamını kaplar.



Şekil 2.5. (a) güneş ışınlımı (b) sıcaklığının farklı değerleri için akım-gerilim eğrisi

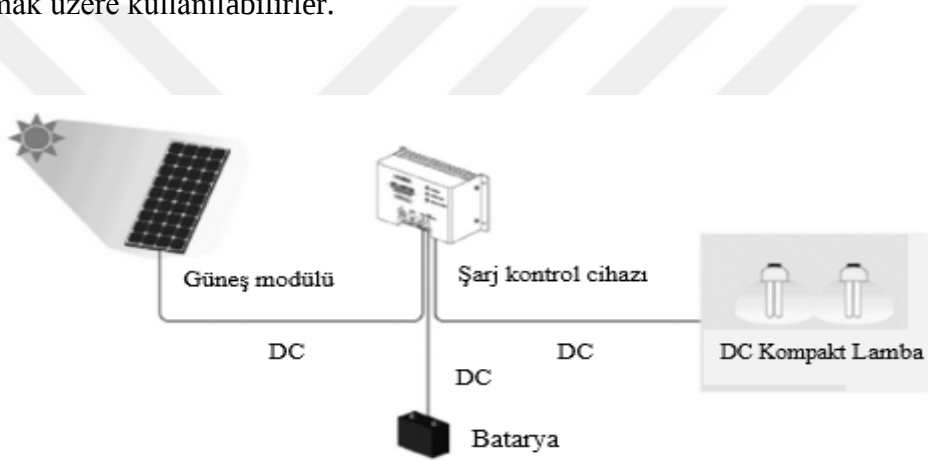
2.3. Fotovoltaik Sistem Çeşitleri

Sistem konfigürasyonuna göre, PV sistemi genel olarak iki ana tipe sınıflandırılabilir: Bunlar, şebekeye bağlı PV sistemi ve bağımsız PV sistemidir (Sumathi ve diğ., 2015). PV sisteminin temel ilkeleri ve unsurları aynı kalıp temel bileşenlerin türü ve sayısı değiştirilerek, sistemler belirli ihtiyaçları karşılayacak şekilde uyarlanabilir.

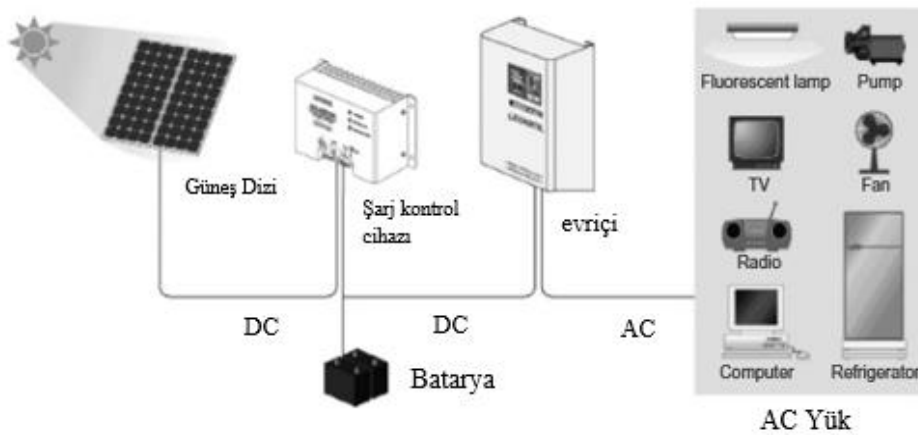
2.3.1. Şebekeye Bağlı PV Sistemi

Çeşitli uygulamalar için hızla artan şebekeye entegre PV sistemleri, yerleşimdeki yükleri beslemek için kullanılmaktaydı. Aşırı yüklemelerde, gerekli güç talebi şebekeden sağlanabildiğinden bataryasız sistemler kullanılabilmektedir. Ancak günümüzde PV sistemleri şebekenin ana tedarikçisi olarak kullanılmaktadır. PV sistemler şebeke frekans desteği için bataryalarla birlikte kullanılabilir. Bu tez çalışmalarında, PV sistemleri bataryalar olmadan frekansı destekleyebilecek şekilde tasarımı planlanmaktadır.

konfigürasyon ile bataryalar kullanılarak bunları aşırı şarjdan veya derin deşarjdan korumak için kullanılan şarj regülatörlerini de içerecektir. batarya sistemi, gündüz üretilen enerjiyi gece veya kötü ortam koşullarında kullanılmak üzere tutmak için yeterli depolama kapasitesine sahip olacak şekilde iyi tasarlanmalıdır. PV sisteminden üretililecek tüm gücü kullanmak için, bağımsız PV sistemiyle birlikte MPPT'yi kullanır, ayrıca maksimum güç üretmek için sistem empedansını eşleştirmek gerekir. Ulusal şebekeye erişimi olmayan uzak bölgelerdeki birçok yükü beslemek için kullanılan güneş enerjisi evsel tip sistemlerinde (SHS) gibi çok sayıda cihaz bağımsız PV sistemi ile beslenebilir. Ayrıca konut sistemleri olarak bilinen sistemlerde tek bina talep gücü temini için de kullanılabilir. Ayrıca su pompalama sistemlerinin talep gücünü karşılamak üzere kullanılabilirler.



Şekil 2.7. DC yüklü basit bağımsız ftovoltaik sistem(Salas, 2017)



Şekil 2.8. AC yükü besleyen eviricili bağımsız fotovoltaiik sistem(Salas, 2017)

2.4. Maksimum Güç Noktası Takibi

Maksimum güç noktası izleyicili PV panelleri, gerçekleştirebilecekleri tüm gücü üretmelerine izin verecek şekilde çalıştırılır. Mekanik sistemler yerine, özel izleme algoritmaları kullanılan kontrol sistemine bağlı olarak MPP'yi takibi gerçekleştirilebilir. Işınım ve sıcaklıktaki değişikliklere dayalı olarak, güneş enerjisi dizisinden en büyük gücü elde etmek için MPPT algoritmaları kullanılır. Dikkat edilmesi gereken hususlardan biri, sistem MPP'da çalıştığında PV sistem frekans düzenlemesine katkı sağlanamama ihtimalidir. Bu nedenle, PV sisteminin frekansının ayarlanmasına desteklemesine izin vermek için, ,bataryalar-ultrakapasitörler gibi enerji depolama sistemlerinin MPP konumunda çalıştığında PV sistemi ile birleştirilebilir.

2.4.1. Maksimum Güç Noktası Teknikleri

Yıllar boyunca, ihtiyaç duyulan sensörler, yakınsama hızı, uygulama için gerekli ekipman gibi çok sayıda kritere dayalı olarak MPP'yi takibinin uygulanması için farklı teknikler kullanılmıştır (Sumathi ve diğ., 2015). MPP algoritmalarının başlıca kullanılanları şunlardır:

1. Perturb and Observe (P&O)	Ayarla ve Gözlemle
2. Incremental conductance algorithm	Artımlı İletkenlik İşlemi
3. Fractional open circuit voltage	Kesirli Açık Devre Gerilimi
4. Fractional short circuit current	Kesirli Kısa Devre Akımı
5. Fuzzy Logic Control	Bulanık Mantık Kontrolü
6. Neural networks method	Yapay Sinir Ağları Yöntemi
7. Ripple Correlation Control	Dalgacık Bağlılık Kontrolü
8. dP/dV or dP/dI Feedback control	Türevsel Geribesleme Kontrolü

P&O- Ayarla ve Gözlemle yöntemi ve Artımlı İletkenlik algoritmaları, karmaşık güç hesaplamaları gerektirmemesi gibi diğer MPPT algoritmalarıyla karşılaştırıldığında çeşitli avantajları nedeniyle en yaygın kullanılan algoritmalarından bazılarıdır. Bu iki yöntem de ayrıntılı olarak incelenmektedir.

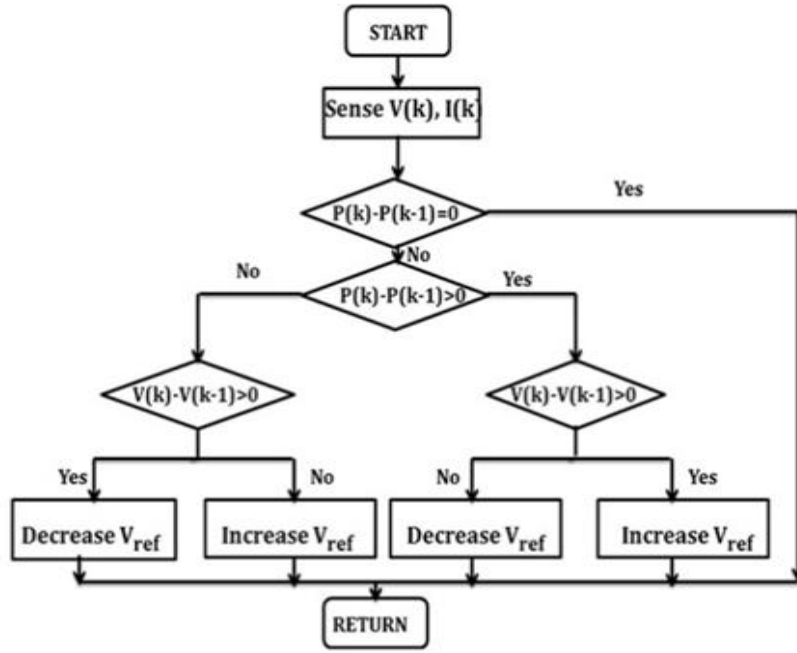
2.4.1.1. Perturb and Observe (P&O)

Ayarla ve gözlem algoritmasının maliyeti düşüktür. Çünkü PV dizisinin gerilimini algılamak için yalnızca bir sensör kullanır. P&O algoritması tipik olarak iki teknik kullanılarak uygulanır: Birinci kontrol parametresi olarak PV jeneratörü çıkış gerilimi için bir referans değeri kullanan referans gerilim pertürbasyonu ve ikinci parametre ise, MPPT dönüştürücünün görev oranını doğrudan kontrol parametresi olarak kullanan doğrudan görev oranı pertürbasyonu (Elgendy ve diğ., 2012). Bu yöntemde bir sonraki bozulmayı belirlemek için önceki bozulmanın işareti ve önceki güç artışının işareti kullanılmaktadır.

Gerilimdeki pertürbasyon, güç çıkışında bir değişikliğe neden olacaktır. Artan gerilim, güçte bir artışa neden oluyorsa, çalışma noktası MPP'den daha düşüktür; bu nedenle MPP'ye ulaşmak için daha yüksek gerilimler için daha fazla gerilim pertürbasyonu gereklidir. Öte yandan, artan bir gerilim, güçte bir azalmaya neden oluyorsa, MPP'ye ulaşmak için daha düşük gerilimlere doğru ek pertürbasyon gerekir. Sonuç olarak, algoritma bir dizi pertürbasyondan sonra MPP'ye yakınsar. Bu algoritmanın uygulanması, Şekil 2.9'da görüldüğü gibi akış şeması ile özetlenebilir. Bu algoritmanın en büyük dezavantajı, çalışma noktasının MPP'de durmaması, MPP'nin etrafında hareket etmesidir. Bu sorunu çözmek için yeterli bir hata limiti oluşturulabilir veya algoritmanın zaman karmaşıklığını azaltmak için bir bekleme fonksiyonu kullanılabilir. Ayrıca, bu algoritma güneş ışınımındaki hızlı değişimden olumsuz etkilenir. Bunu pertürbasyon nedeniyle MPP'de bir değişiklik olarak yorumlayarak yanlış MPP'nin hesaplanmasına neden olur.

2.4.1.2. Incremental Conductance Algorithm

Güç-gerilim eğrisinin eğimine bakılarak Artımlı iletkenlik, PV dizisi MPP'ye ulaştığında eğimin sıfır, MPP'nin sol tarafında Pozitif ve MPP'nin sağ tarafında negatif olduğu gerçeği üzerine inşa edilmiştir. Şekil 2.10'da bu yöntem gösterilmektedir. Artımlı iletkenlik ($\Delta I/\Delta V$) ve anlık iletkenlik (I/V) arasındaki karşılaştırmaya dayanarak artımlı iletkenlik algoritması MPP'yi izleyebilir. Bu durum, Denklem (2.4)-(2.6) da gösterilmektedir.

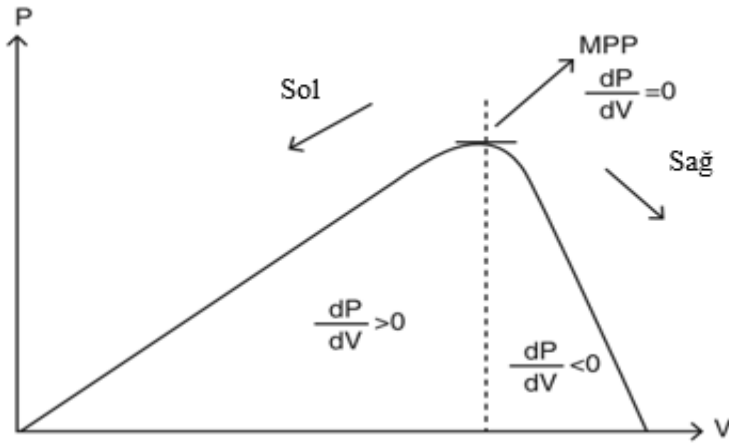


Şekil 2.9. Ayarla ve Gözlemle Algoritması

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad \text{At MPP} \quad (2.4)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad \text{Left of MPP} \quad (2.5)$$

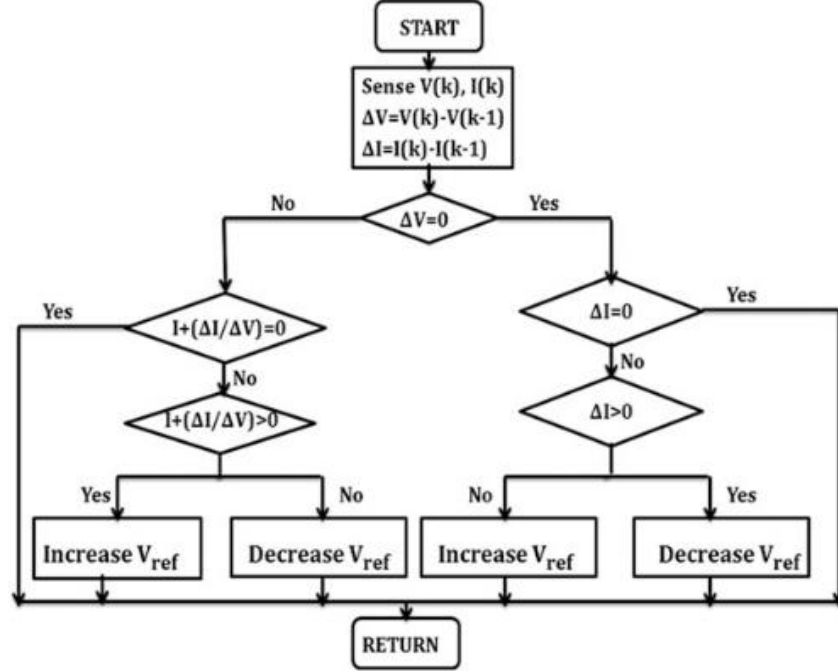
$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad \text{Right of MPP} \quad (2.6)$$



Şekil 2.10. Güneş enerjisi panelleri dizisi PV eğrisindeki artımlı iletkenlik algoritmasının prensibi

Çıkış iletkenliğindeki değişim oranı, negatif çıkış iletkenliğine eşit olduğunda, güneş enerjisi dizisi maksimum güçte çalışacaktır. MPPT, $(I/V) + (I/V) = 0$ koşulu karşılanana

kadar DC-DC yükseltici dönüştürücünün PWM kontrol sinyalini kontrol eder. Şekil 2.11, artımlı iletkenlik yönteminin akış şemasını göstermektedir.



Şekil 2.11. Artımlı iletkenlik yönteminin akış şeması

3. ENTEGRE PV SİSTEMLERİNDE GÜÇ KONTROLÜ VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ

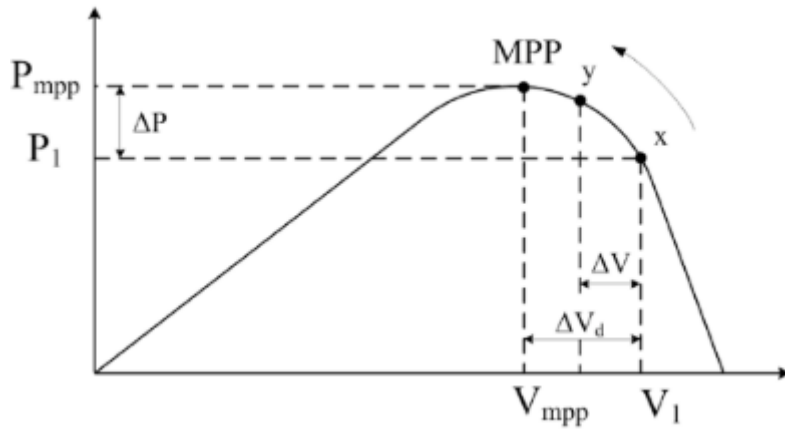
3.1. PV Sistemin Büyük Ölçekli Entegrasyonu

Gerek enerji kaynaklarına bağımlılık açısından kaynak çeşitliliği ve gerekse çevre kirliliği kaygısı nedeniyle temiz enerjiye olan ihtiyaç hızla artmaktadır. Çözümlerin başında gelecek vaad eden enerji kaynaklarından biri olan güneş enerji önemli hale gelmektedir. Önceleri, güneş enerjisinin yüksek maliyeti nedeniyle kullanımları sınırlıydı. Günümüzde PV sistemlerin Konvansiyonel elektrik üretim tesislerinin büyük bir kısmının ikame edilmesinde ortaya çıkan bu durum, dönme eylemsizliğinin azalması sonucu sistemin doğal eylemsizlik tepkisinde bozulma gibi güç sistemini büyük zorluklara maruz bırakmaktadır. Referans (Rajan ve diğ., 2021)'de verilen, dünya çapındaki RES kurulumuna ilişkin istatistiksel verilerin PV kapasitesinin 2017 ve 2018'de diğer tüm RES'lerden daha fazla kurulduğunu gösteren birkaç örnek vardır. PV sistemlerinin küresel enerji geçişinde kritik bir rol oynaması bekleniyor. Ayrıca, PV sistemleri gelecekte dönel üretim kapasitesinin büyük bir bölümünün yerini alabilir. Koşullar uygun olduğunda, anlık penetrasyon artar. Bu da daha düşük sistem eylemsizliğine neden olur. Yük dengesizliğinin küçük değerlerinde bile, azaltılmış eylemsizlik, önemli bir frekans sarması sorununa neden olabilir ve frekans değişim hızı (RoCoF), jeneratörleri durdurmak ve yük atma kontrolörünü etkinleştirmek için yeterli olacaktır. Bu nedenle, PV sisteminin yüksek penetrasyonunun bahsedilen dezavantajlarının üstesinden gelmek için yeni güç kontrol stratejileri geliştirmek önemlidir. Sonraki bölümler PV enerjide, güç kontrol stratejileri tanılmaktadır.

3.2. PV Sistemlerinde Güç Kontrolü

Gücü kontrol etmenin temel işlevi, yük ve üretim arasındaki dengeyi korumaktır. Geleneksel güç üretiminde, kontrolün farklı mekanizmalar ile yapıldığı görülmektedir. Ayrıca, PV sistemler gibi yenilenebilir enerjilerin yüksek penetrasyonu, genel sistem eylemsizliğinde azalmaya neden olur. Sonuç olarak, geleneksel kontrol sistemleri kullanılarak arızalar sırasında yük ve üretim dengesini korumak zorlaşır bu nedenle yeni kontrol stratejileri önerilmektedir. Örneğin birkaç yazar, büyük ölçekli PV entegrasyonunun neden olduğu kararsızlık sorunları ve azaltılmış dönme eylemsizliği için eylemsizlik tepkisini taklit etmek ve telafi etmek için potansiyel bir çözüm olarak sanal

atalet kavramını önermektedir. Böylece PV sistemlerinin aktif güç kontrolünü ve geleneksel jeneratörlerin koordineli kontrolü önerilmiştir. Bu tez çalışmasında de-loaded olarak tanımlanan strateji sistemi, PV sistemde bozulma meydana geldiğinde kullanılmak üzere bir güç rezervine sahip olmasını sağlamak için bir alternatif rezerv olarak kullanılacaktır. Bu strateji ile PV sistemi, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi maksimum gerilime Vde-load gerilimini eklenerek maksimum güç noktasından farklı noktada çalışması sağlanır. Burada ΔP ayrılmış aktif güç, P1 ve V1 de-loaded kaldıktan sonraki güç ve gerilimdir. PV ünitesi çıkış gücü, çeşitli kontrol mekanizmaları sayesinde sistem durumuna ve çalışmasına bağlı olarak değişir. Sonuç olarak, yeni kontrol ayarlamaları, gelecekte daha fazla PV sistemini barındırmak için mevcut güç sisteminin esnekliğini geliştirir. PV ünitelerinde gelir arttırımı ve enerji tasarrufunu en üst düzeye çıkarmak için MPP'da çalışma hedeflenmektedir. Sonuç olarak, PV sistemleri varsayılan olarak sistem eylemsizliğine katkıda bulunmaz. Bu nedenle, entegre PV sistemlerinde bir miktar aktif gücün rezerve edilmesi, sistem kararlılığı için kritik öneme sahiptir. PV sistemlerindeki güç rezervleri, enerji depolama cihazları yerleştirilerek veya PV de-loading sistemi uygulayarak sağlanabilir. Sonraki bölümlerde sunulacak olan enerji depolama sistemi kullanılarak veya enerji depolama sistemi olmadan gücü korumak için kullanılan kontrol stratejileri incelenmektedir.



Şekil 3.1. De-loaded PV sistemli güç-gerilim Eğrisi

3.2.1. PV Sistemlerinin Batarya Enerji Depolama Sistemi ile Entegrasyonu

Bataryada enerji depolama sistemleri (BESS), çıkış gücünü kontrol etmek için PV sistemleri farklı konfigürasyonlarda tasarlanır (Zhao ve diğ., 2023). Bu nedenle, bozulma meydana geldiğinde özellikle birincil frekans yanıtı ile daha fazla frekans desteği elde

edilebilir. Bataryalar, kontrol ve güç koşullandırma sistemi (c-pcs), batarya enerji depolama sisteminin ana bileşenidir.

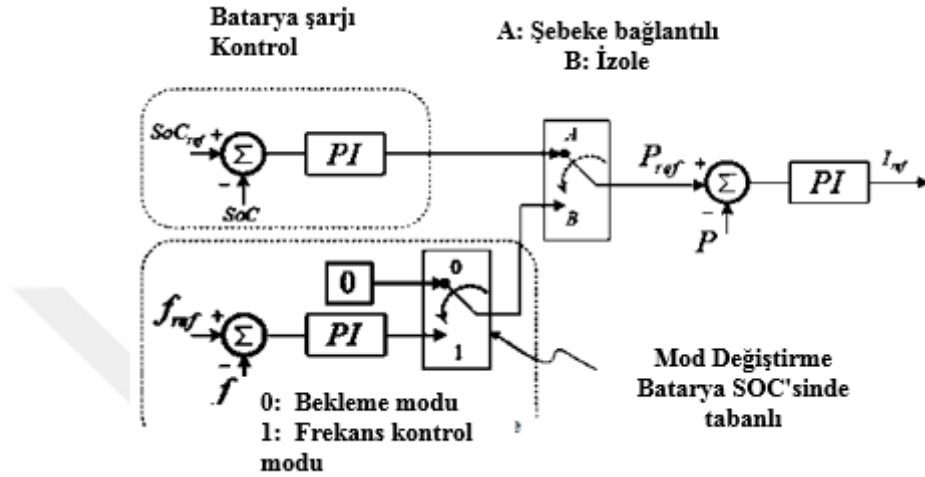
Kullanılan çok sayıda batarya türü vardır, ancak kurşun asitli batarya, güç sistemi uygulamalarının büyük bir bölümünde kullanılmış olan en eski ve en yerleşik teknolojidir (Divya ve Østergaard, 2009). Li-ion, NaS ve NiCd bataryalar, yüksek güç yoğunluğuna sahip batarya uygulamalarında gelişmiş modeller olarak görünmektedir. Bu Li-ion bataryalar arasında, küçük boyut ve hafifliğe ek olarak, yüksek enerji yoğunluğu ile %100'e yakın depolama verimliliğine sahip olmaları, uygun taşınabilir cihazlar haline getirmektedir.

3.2.1.1. PV Sistemleri ile BESS Kontrolü

Kontrol stratejisi, BESS için önemli bir kavramdır. Bataryaları yüke bağlar ve Bataryaları n şarj ve deşarj oranını kontrol eder. Kontrol maliyeti yüksek olup, enerji depolama sisteminin toplam maliyetinin %25'ini oluşturur. Ancak yenilenebilir ve dağıtılmış enerji kaynaklarının güç koşullandırma sistemlerindeki son gelişmeler sayesinde bu teknoloji hızlı gelişim göstermektedir.

Genel olarak BESS'in kontrolörleri, BESS'in PV entegre sistemlerle kullanıldığında ana amaca ulaşmasını sağlamak için birçok kategoride tasarlanmıştır (Shazon ve diğ., 2022). Referans (Aghamohammadi ve Abdolahinia, 2014)'de çoklu PV jeneratörlü mikro şebekelerde frekans regülasyonu için BESS'nin boyutunu küçültmek için yeni bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntem, bir mikro şebekenin birincil frekans düzenlemesini iyileştirmek için BESS boyutunu optimize eder. BESS'in aşırı yükleme kapasitesini azaltmak ve hizmet süresini artırmak için, BESS için DC/AC dönüştürücü için bir kontrol stratejisi tasarlanmıştır. Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, mod değişimi BESS'in şarj durumuna (SOC) bağlıdır. Referans (Datta ve diğ., 2012)'de , enerji depolama birimlerinin eylemsizliği taklit etmek için bir güç elektroniği dönüştürücü sistemi kullanılarak hem merkezi hem de yerel olarak yönetildiği büyük ölçekli bir dağıtılmış enerji depolama sistemi için bir LFC kontrolü önerilmektedir. Eylemsizlik yanıtı, sistemin birincil frekans yanıtını iyileştiren, şebeke frekansı türeviyle ters orantılı olarak depolama cihazlarının aktif çıktısını ayarlayarak uyarılır. Referans (Claessens ve diğ., 2019)'de, maksimum yedek kapasite sağlayan ve yüklerin stokastik doğası gereği hızlı

değişen frekans gezisini önlemek için hem PFC hem de öz tüketim için kullanılabilen bir batarya depolama sistemi için verimli bir kontrol yaklaşımı önerilmektedir. Referans (Ramírez ve diğ., 2018)'de, frekans değişimine referansla BESS'in aktif güç kontrolü için sarkma kontrol (droop control) fonksiyonu tasarımı önerilmektedir. Ancak, bu yaklaşım BESS SOC sınırını göz ardı edilerek parçaların çoğunu analiz edilebildiği önerilmektedir.



Şekil 3.2. BESS için DC-AC dönüştürücü kontrolü (Rajan ve diğ., 2021)

Referans (Jami ve diğ., 2020)'de, eylemsizlik tepkisini simüle etmek için bir süper kapasitör (SC) ve bir BESS kullanılan bir kontrol tekniği önerilmektedir. Hızlı dinamiğe sahip SC, frekans değişikliklerine hızla yanıt verir. Sistem, bir dış gerilim döngüsü ve bir iç akım döngüsü aracılığıyla kontrol edilir. SC'deki eylemsizlik ve gerilimin her ikisi de döngü tarafından kontrol edilir. Sistemin avantajı, SC'nin kısa sürede maksimum gücü sunabilmesidir. BESS üzerindeki stresi azaltarak ömrünü uzatabilir.

Prototip olarak 720 KVA'lık bir performans, mikro şebekenin elektrik şebekesine farklı hizmetler sunması için Li-ion BESS (Namor ve diğ., 2019)'de doğrulanmıştır. PV sistem dalgalanmasının neden olduğu şebeke frekansının sürekli değişimini engellemek için, BESS kullanımı, çeşitli yardımcı hizmetler için uygun enerji kapasitesini ve güç sınırını değiştirme amacıyla tasarlanan optimizasyon amacıyla BESS kullanılabilir.

PV ile entegre güç sistemleri için birincil frekans düzenleme hizmetini iyileştirmeye yönelik çeşitli stratejilerin ayrıntılı bir incelemesini takiben, BESS'in büyük bir güç sistemi için uygun bir yaklaşım olmadığı görülür. BESS'in döngü verimlilik ve ömür çalışmaları devam etmektedir. Ek olarak, bakım ve değiştirme maliyeti, yatırım

gereksinimlerini artırır ve sistem operatörlerine ek bir yük getirir (Andrenacci ve diğ., 2018). Enerji depolama cihazları, önceki araştırmalara göre, şebeke ölçeğindeki güç sistemlerinin eylemsizlik tepkisini geliştirmek için ekonomik olarak uygun bir alternatif değildir (Rajan ve diğ., 2021). Güç sistemi uygulamaları için çeşitli tip ve boyutlarda bataryaların çevresel sonuçları (Dehghani-Sanij ve diğ., 2019; Divya ve Østergaard, 2009)'da geniş çapta incelenmektedir.

Basıncılı hava enerji depolaması ve pompalı hidroelektrik santralleri gibi alternatif depolama yöntemleri, çevresel etkileri BESS'inkinden çok daha düşük olduğu için bazı çalışmalarda önerilmektedir. Mevcut drumuda, PV'nin popülaritesi arttığından, frekans regülasyonu gibi en önemli yardımcı hizmeti BESS kullanmadan sağlamaya yönelik alternatif bir yöntem kritik öneme sahiptir.

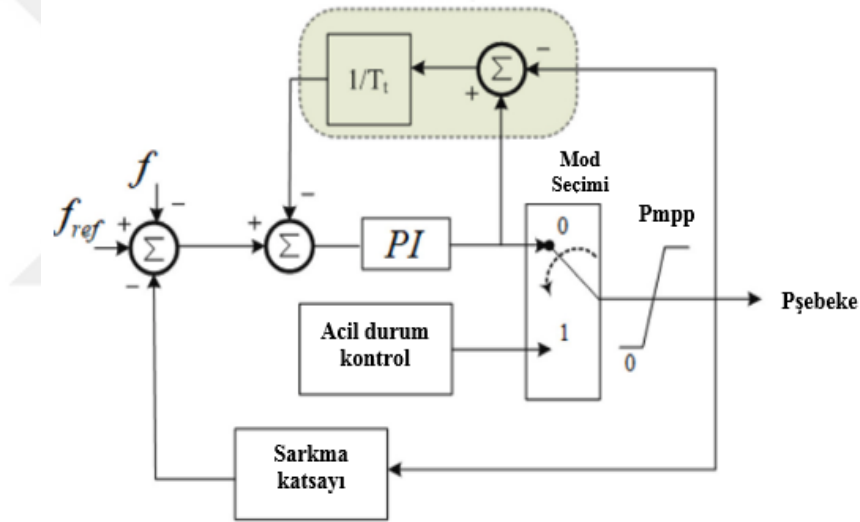
3.2.2. Batarya Enerji Depolama Sistemi Olmadan PV Sistemlerinin Entegrasyonu

PV sistemleri, BESS kullanılmadan şebekeye entegre edilebilir ve bu, sistemin frekans düzenlemesine katılmasına yardımcı olan çeşitli biçimler alır.

Yardımcı ve ana (slave and master) PV dizileri şeklinde tasarlanan panellerde, ana diziler MPPT'de çalışırken yardımcı diziler tarafından ayrılmış gücü kullanarak sistemin frekans ayarına olumlu katkı sağlar. Bu çalışma düzeni, Delta Güç kontrol yönteminde kullanılabilir (Sangwongwanich ve diğ., 2017). Şebekeye bağlı eviricilerin DC bağlantı kapasitansından yararlanılarak eylemsizlik cevabı modellenenebilir. Dolayısıyla şebeke frekansı ayarı için uygun işlem kolaylığı sağlanabilir (Guo ve diğ., 2019). PV sistemin maksimum gerilim değerine $V_{de-load}$ eklenerek maksimum güç noktasına yakın çalışmasını sağlayan de-loading yaklaşımı kullanılıp, rezerv edilmiş PV gücü aracılığıyla güç sistemi kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Bu kontrol modelinde, herhangi bir depolama sistemi kullanılmaksızın, frekans ayarında PV sistemle diğer geleneksel enerji üreteçleri arasında koordineli bir kontrol tasarlanabilir (Sekhar ve Mishra, 2016). Bulanık mantık gibi gelişmiş kontrol yaklaşımları, sistemde bataryalarla enerji depolama yapılmadan, güç sistemindeki geleneksel kontrolörlerin performansını artırmak mümkündür.

3.2.2.1. PV Aktif Güç Kısıtlaması

Güç Kısıtlama, sistemi iyileştirmek için PV çıkış gücünü kontrol etmenin yollarından biridir. (Xin ve diğ., 2013)'te gösterildiği gibi, kontrol şeması iki farklı mod kullanılarak uygulanmıştır. (1) sistemi geliştirmek için atalet tepkisi sarkma kontrolü(droop) kullanılmıştır (2) sistemin çökmesini engelleyen acil durum kontrol modu Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Referans (Datta ve diğ., 2011) 'te, BESS olmadan çıkış gücünü kontrol etmek için PV-dizel hibrit enerji sistemlerine bulanık kontrol uygulanmıştır. Sayısal sonuçların incelenmesiyle bazı avantajlar elde edilmiş olduğu görülmektedir. Frekans sapanması durumunda, PV gücü kontrol eden PV jeneratörü ile frekans ayarı yapılmaktadır. Güvenirlik ile birlikte, yalıtılmış şebekeye maksimum miktarda PV güç sağlanarak ESS kapasitesinin düşürülür.



Şekil 3.3. PV sistemi için frekans droop kontrolü

3.2.2.2. Delta Güç Kontrolü

Çalışma sırasında PV panellerinden aktif gücün bir kısmını ayırma stratejisidir. Referans (Sangwongwanich ve diğ., 2017)'da gösterildiği gibi, çıkarılan PV gücü, değiştirilmiş MPPT algoritmaları ile sınırlandırılmıştır. Bu yöntem için, mevcut çalışma koşulunda ilk olarak MPP'deki PV gerilim tahmin edilir. Daha sonra MPP'deki gerilim kullanılarak, doğrusal ve ikinci dereceden yaklaşımın kombinasyonu yoluyla tahmin edilen mevcut maksimum güç belirlenir. Uygulanan bu kontrol stratejisi ile, PV panellerini maksimum kullanılabilir gücünün tahmini için, MPPT modunda çalışan ana PV dizisi ve yardımcı (slave) PV dizisinde sabit güç üretimi (CPG) modunda paylaşımlı çalıştırılır.

3.2.2.3. DC Bağlantı Kondansatörü (DC- Link Capacitor)

DC bara kapasitör kontrolü aracılığıyla şebekeye bağlı dönüştürücüler tarafından benzetilmiş sanal eylemsizlik, yeni araştırmalarda rağbet kazanmıştır. Şebekeye bağlı dönüştürücüler (GCC'ler) tarafından taklit edilen sanal eylemsizlik, DC bağlantı kapasitansı ile orantılı olduğundan, DC bağlantı kapasitansı, eylemsizlik sabitini değiştirerek GCC'yi taklit eden eylemsizliğin dinamik performansını doğrudan etkileyebilir. GCC'nin atalet öykünmesi için DC-bağlantı kondansatöründe depolanan enerjiyi kullanarak güç sistemi kesintilerine yanıt vermesini sağlamak için bir sanal atalet kontrol bloğu (Fang ve diğ., 2018)'te tanıtılmıştır ve GCC'nin DC-bağlantı kapasitörü tarafından sağlanan eylemsizlik gücü belirtilmiştir. Denklem (3.1)'deki gibi. DC-bağlantı kapasitörü, eylemsizlik öykünmesi için GCC'lerin dinamik performansında hayati bir rol oynamaktadır. DC-bağlantı kapasitansının seçim yöntemi ayrıntılı olarak (Guo ve diğ., 2019)'de sunulmuştur.

$$\Delta P_{GCC} = \frac{C_{dc} V_{dc-ref}^2}{V_{Arated}} \frac{dV_{dc}}{dt} = 2H_c \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (3.1)$$

3.2.2.4. De-loaded Güç Kontrolü

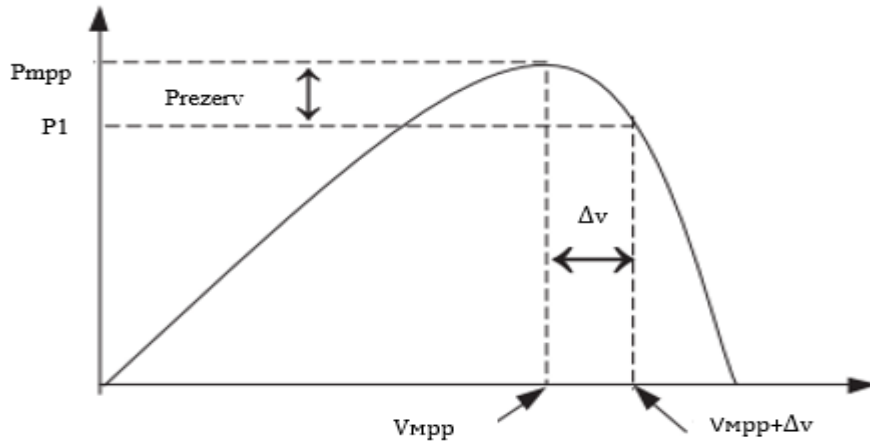
PV sistemin çalışma noktasının MPP'den farklı bir yere alınmasını sağlayan sistem, frekans ayarını olumlu yönde düzenler.

PV de-loaded sistemi uygulamalarında, birçok kontrol stratejisi önerilmiştir. Referans (Zarina ve diğ., 2014)'da, depolama sistemlerine ihtiyaç duymadan PV'nin çıkış gücünün kullanımı ile frekans ayar stratejisi önerilmektedir. Bu amaçla, on iki PV sistemi MPP'ından biraz uzakta ve çoklu-bara sistemine bağlı iki geleneksel üreteç ile çalıştırılmaktadır. PV sistemi MPP'sinden farklı bir noktada çalıştığında, yedek güç PV'nin ürettiği güç ile birlikte kullanılabilir. Üretime ihtiyaç duyulduğunda, bu ayrılmış güç kullanılarak performans artışı ve frekans ayarı gerçekleştirilecektir. Bu tez çalışmasında önerilen kontrol stratejisine göre bozunumlardan dolayı, şebekeye aktarılacak güç, frekans sapmaları ile orantılıdır. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, PV sistemi V1'in çıkış gücü P1 olarak tanımlandığında, Vmpp'den daha büyük bir gerilimlerde çalıştığında, maksimum kullanılabilir güç çıkarılmadığından PV sisteminin de-loaded konumunda çalıştığı söylenebilir. Şekil 3.4'te gösterilen bu çalışmada, de-loaded, Vmpp

değerinin, verilecek güç rezervine orantılı bir gerilim olan $V_{de-load}$ ile artırılmasıyla gerçekleştirilir. PV’de frekans değişikçe sistem gücünün de değişmesi gerektiğinden, Denklem (3.2)'de gösterildiği gibi, DC referans geriliminin frekans sapmasına Δf karşılık gelen bir sinyal eklenir.

$$V_{dc ref} = (V_{mpp} + V_{de-load} - V_{dc} \text{ proportional to } \Delta f) \quad (3.2)$$

Bu tezde daha ileri bir kontrol stratejisi olan, frekansta bozulma değeri sisteme eklenen $V_{de-load}$ gerilim değerini aşmasını engelleyen bir yöntem içermektedir. Bu koşullarda çalışan sistem V_{mpp} 'in değerinden daha az bir değerde çalışacaktır. Bu durumda çıkış gücü maksimum kullanılabilir güçten daha az olacaktır. Bu nedenle yeni strateji, Δf ile orantılı V_{dc} , $V_{de-load}$ değerini aştığında PV sistemini V_{mpp} ile çalışmaya zorlar. Bir sonraki bölümde detaylı açıklanan stratejinin ayrıntıları anlatılmaktadır. Referans (Hoke ve Maksimović, 2013)'de, MPP'nin altında çalışan PV sistemi ile ilgili birçok çalışmayı gözden geçirerek aktif güç kontrolü kavramı tanımlanmıştır. Bu çalışmalardan birinde güneş ışınlı bulanık mantık denetleyicisine girdi olarak alınmaktadır. Sonrasında güç komutu, ışınlı ve frekans sapmasında değişiklik durumunda üretilmektedir.



Şekil 3.4. Yüksüz (de-loaded) PV sistemi

Referanstaki başka bir çalışmada, PV dizilerinin anlık açık devre gerilimi (V_{oc}) bilinmektedir ve PV dizisi, MPP'nin altında çalışma ile sonuçlanan sabit bir V_{oc} oranında (örneğin %95) çalışacak şekilde kontrol edilir.

3.3. PV Sistemde Güç Elektroniği

PV dizilerinin elektrik şebekesiyle uygun şekilde entegrasyonu, genellikle şebekeye bağlı veya şebeke ölçeğinde PV sistemlerinin temel sorunlarından biridir. PV sisteminin değişken bir DC çıkış gerilimi ürettiği bilinmektedir. AC şebekesinin genlik ve frekans gereksinimlerini karşılamak ve buna senkronize güç enjekte etmek için ek bir koşullandırma devresi gereklidir. Basit bir biçimde bu koşullandırma devresi, şebeke tarafındaki AC yükünün PV sisteminden üretilen DC geriliminin kullanımını sağlayan güç dönüştürücüler olan eviricilerdir. Bu PV arayüzü, uyarlanabilir, verimli ve güvenilir olmanın yanı sıra yüksek kaliteli elektrik üretmelidir. Bilindiği gibi, güneş ışınımı ve sıcaklık gibi ortam koşullarından dolayı PV çıkış gücünün kesintili olması, yük dengesini etkiler. Bu nedenle, şebekeye maksimum gücü göndermeye yardımcı olan tüm mevcut güneş ışınımından yararlanmak için, genellikle MPPT tekniği kullanılır. Bu nedenle, farklı algoritmalarla DC-DC dönüştürücüler gibi güç elektroniği donanımı kullanılır. Yenilenebilir enerjinin geniş bir alana yayılması dolayısıyla, güç sisteminde fazla zorluklar üretir. Güç elektroniği donanımı ve teknolojilerindeki gelişmelerle bu zorluklar kolaylıkla çözülebilmektedir. PV sistemlerinde kullanılmakta olan güç elektroniği donanımı, güç aşamalarına bağlı olarak üç topolojiye göre sınıflandırılır, Tek aşamalı, çift aşamalı ve çok aşamalı sınıflandırmalar olarak bilinir. PV dizileri, gerilim ara devreli (VSI) ve akım ara devreli (CSI) olarak bilinen topolojilerden biri kullanılmakta ve AC şebekesine entegre edilmektedir. Bağımsız olarak kontrol edilen çıkış, gerilim dalgası şeklinde olduğundan, gerilim ara devreli inverter olarak tanımlanmaktadır. VSI, bu konfigürasyonda PV panellerine paralel olarak bağlanmış bir DC bara kapasitörü tarafından desteklenmektedir. Akım ara devreli eviricileri ise, AC akım dalga biçimini kontrol eder. Evirici, bu kurulumda büyük bir DC bara indüktörü ile çalışmaktadır. Bu konfigürasyonların piyasadaki en yaygın kullanımı, verimlilik ve daha yüksek güvenilirlik ve daha hızlı dinamik yanıt gibi özelliklere sahip olması nedeniyle VSI'dır. Şebekeye bağlı eviricilerin çıkış geriliminin etkin ve düzgün kontrolü için Ayarlı PWM teknikleri kullanılmaktadır.

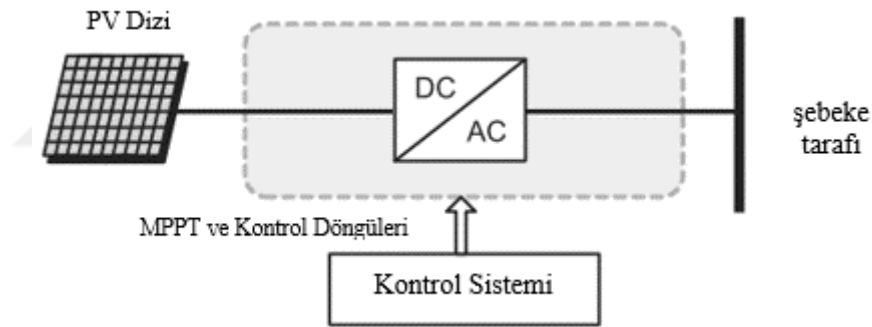
3.3.1. PV Sistemindeki Güç Elektroniği Topolojileri

Güç elektroniği dönüştürücü donanımında, elektrik şebekesi ile optimum uyumluluk sağlayan PV sistemleri ile sağlamak için yapılan araştırmalarda birçok farklı topoloji

kullanılmıştır. Dönüştürücüler tarafından oluşturulan güç kademesi sayısına göre tek kademeli, çift kademeli ve çok kademeli topolojiler olmak üzere üç ana kategori yaygın olarak kullanılmaktadır (Hu, 2016). Literatürdeki bazı kaynaklarda, PV eviriciler, merkezi eviriciler, dizi eviriciler, çoklu dizi eviriciler ve modül entegre eviriciler olarak sınıflandırmıştır (Krauter, 2006). Bu çalışmada en yaygın topolojilerden olan ilk üç türle ilgilenilmektedir.

1. Tek aşamalı topoloji

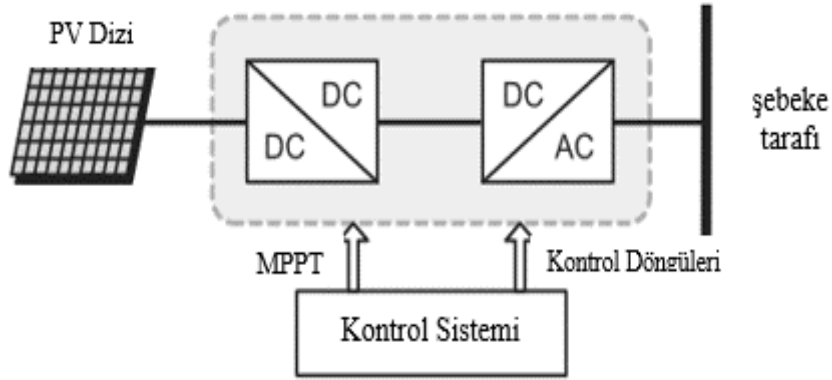
Bu topolojide tek güç elektroniği donanımı olan evirici üzerinden elektrik şebekesine verilen güç, çoğu zaman MOSFET veya IGBT gibi yarıiletken güç anahtarları ile aktarılır. Tek kademeli topolojide tek evirici olduğundan MPPT'yi ve evirici kontrolü bu donanımla entegre edilebilir. Bu tezde, akım ara devreli evirici kullanıldığından, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, bu topolojide büyük ölçekli PV şebekesi seçilmiştir.



Şekil 3.5. Şebekeye bağlı eviricide tek kademeli topoloji

2. Çift aşamalı topoloji

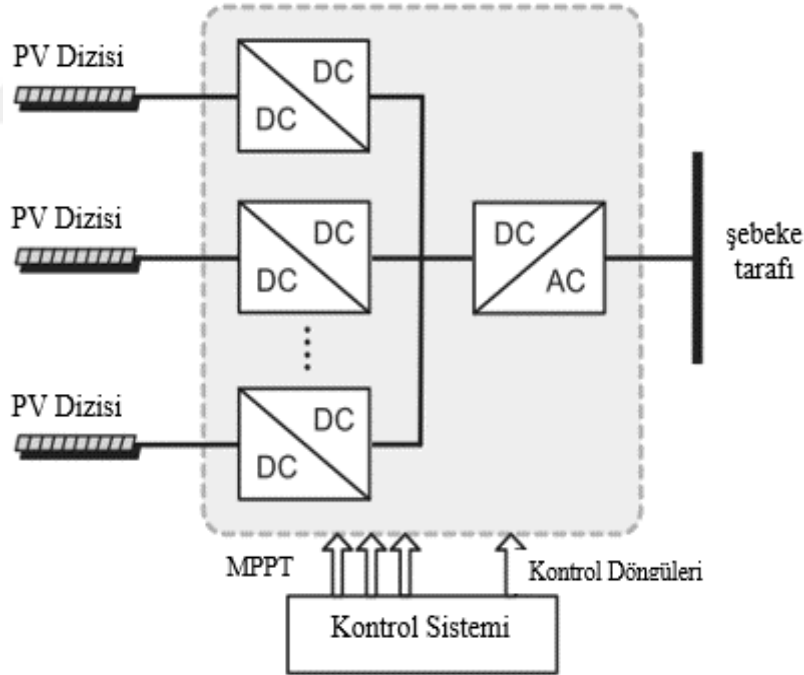
Çift kademeli, PV dizisi, MPPT kontrolünü idare ettiği DC-DC dönüştürücünün DC bağlantısına doğrudan bağlıdır. Dönüştürücü çıkışı, üretilen gücü elektrik şebekesine aktarmak için DC-AC eviricisine bağlanır. PV tabanlı dağıtılmış jeneratörlerden yüksek kaliteli, güvenilir ve esnek elektrik gücü üretme yeteneği gibi modern dağıtılmış enerji kaynaklarının getirdiği yeni kısıtlamalar nedeniyle, çift aşamalı topoloji, literatürde daha fazla popülerdir (Hu, 2016).



Şekil 3.6. Şebekeye bağlı eviricinin çift aşamalı topolojisi

3. Çok aşamalı topoloji

İki aşamalı topolojiye benzeyen bu topolojide, herbir diziye bağlı DC-DC dönüştürücü olup sıralı PV gibi değildir. MPPT'yi uygulamak için DC-DC dönüştürücüler kullanılmaktadır. Akım ve gerilim kontrol döngülerini uygulamak için DC-AC dönüştürücüsü olan evirici kullanılmaktadır.



Şekil 3.7. Şebekeye bağlı eviricinin çok aşamalı topolojisi

3.3.2. PV Sistemlerinde Güç Elektroniği Kontrolü

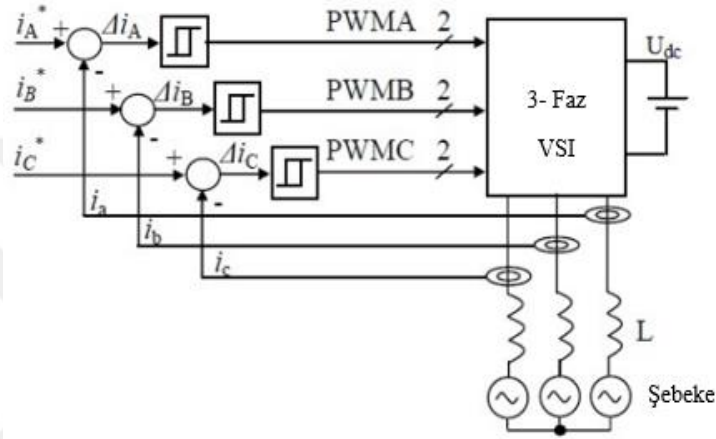
Güç elektroniği donanımı, şebeke bağlantılı PV sistemlerinde önemli işlevler için farklı topolojilerde kullanılmaktadır. Maksimum güç elde etmek için DC-DC dönüştürücüler, elektrik şebekesine önceden tanımlanmış gerilim ve/veya akım enjekte etmek için eviriciler kullanılmaktadır. Bu amaçla, güç dönüştürücünün etkinleştirilmesi, darbe genişliği modülasyon teknikleri gibi kontrol stratejileri uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Eviricideki anahtarlamaların sorunsuz gerçekleştirilmesi önemlidir. 180° iletim ve 120° iletim gibi, eviriciye iki farklı kontrol sinyali uygulanır (Ahmed, 2015). Evirici kontrolünde iki farklı stratejisi uygulanır. Birincisi gerilim kontrolü olup, burada güç akışı kontrolü için evirici çıkış gerilimi ile şebeke gerilimi arasındaki faz açısı kullanılır. İkincisi de darbe genişlik modülasyonu tekniklerinden birini kullanarak şebekeden enjekte edilen akımın aktif ve reaktif bileşenleri kontrol edilir (Ahmed, 2015). Akım kontrolü ile elde edilebilecek avantajlar ile birlikte, şebeke gerilim bozunumlarına ve gerilim faz kaymasına daha az duyarlıdır. Bu kontrolör hızlı tepkiye sahiptir ve şebekeye bağlı evirici kontrolü için tavsiye edilir. Bu tezde akım denetleyicisi kullanılarak kontrol gerçekleştirilmektedir. Üç fazlı bir AC yükündeki akımların referans sinyallerini takip etmeye zorlamak, akım kontrol darbe genişlik modülasyon dönüştürücü kontrolünün birincil işlevidir.

3.3.2.1. Histerez Akım Kontrolörü (Hysteresis Current Controller)

Histerezis akım kontrolörü (HCC) açık-kapalı kontrolör olarak tasarlanmaktadır. HCC, esas olarak üç fazlı şebeke bağlantılı PWM VSI için kullanılır. Oluşturulan PWM durumu ve akımdaki hata kompanzasyonu bir kontrol ünitesinde gömülüdür (Ahmed, 2015). Şekil 3.8'de gösterildiği gibi, evirici çıkış akımları ölçülerek doğrudan eşdeğer faz akımı referanslarıyla ayrı ayrı karşılaştırılır. Daha sonra, ortaya çıkan üç akım hatasını kullanan histerezis karşılaştırmaları tarafından doğrudan güç anahtarları için PWM sinyalleri üretilir. Akım koruması ve dinamik yanıtın iyileştirilebilir olması, HCC'nin ana avantajlarıdır. Buna karşılık değişken anahtarlama frekansı ve yüksek akım dalgalanmaları, HCC'nin dezavantajları olarak, düşük akım kalitesi ve filtre tasarımını etkileyen nedenler olarak kabul edilebilir.

3.3.2.2. Öngörülü Akım Kontrolörü (Predictive Current Controller)

Öngörülü kontrolör, açık çevrim akım kontrol stratejilerindendir. Bu kontrol sistem modelinde, kontrol edilen değişkenlerin davranışını tahmin etmek için öngörücü kontrolör kullanılır. Bilinen optimizasyon standardına göre, kontrolör bu bilgileri optimum çalışma elde etmek için kullanır. Bu yöntemde sistem modeli, sonraki örnekleme anında gerekli referans değerini hesaplamak için kullanılır.



Şekil 3.8. Üç fazlı şebeke bağlantılı evirici için histeresiz kontrolörü

Kontrolörde optimum çalıştırmaya ulaşıldığında, modülatör gerilim değerini uygulamak için kullanılır. Bu kontrolör sistem parametresine bağlı olduğundan, evirici çıkış akımı, filtre indüktöründen ve bazen de kuplaj transformatöründen geçer. Tüm bu parametreler frekansa bağlıdır. Ayrıca bu parametreler ortam koşullarından etkilenir. Sonuçta, parametre duyarlılığı sorunlarına neden olabilir.

3.3.2.3. Lineer PI Akım Kontrolörü

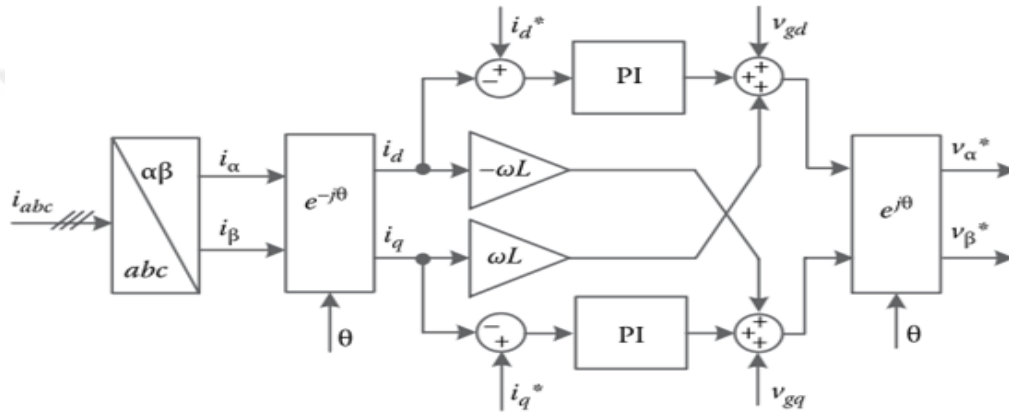
Oransal – integral (PI) kontrolör, endüstride akım kompanzasyonu için en yaygın kullanılan kontrolörlerdendir. Bu kontrolörün ana işlevi, şebekeye enjekte edilmesi gereken referans akım ile şebekeden ölçülen gerçek akım arasındaki hatayı en aza indirmektir. Bu kontrolör senkron referans çerçevesinde (SRF) gerçekleşir. Burada kontrol değişkenleri DC bileşeni kullanılır. Bu DC bileşeni (d-q), faz görünümlü döngü (PLL) tarafından sağlanan şebeke geriliminin faz bilgilerinden yararlanılarak, Clarke-park dönüşümü kullanılarak gerçek ölçülen değer dönüştürülmesiyle elde edilir.

Denklem (3.3) ve (3.4), enjekte edilmek istenen aktif ve reaktif gücü gösterir. Buradan referans d-q akım bileşenleri elde edilir (Frede Blaabjerg, 2017).

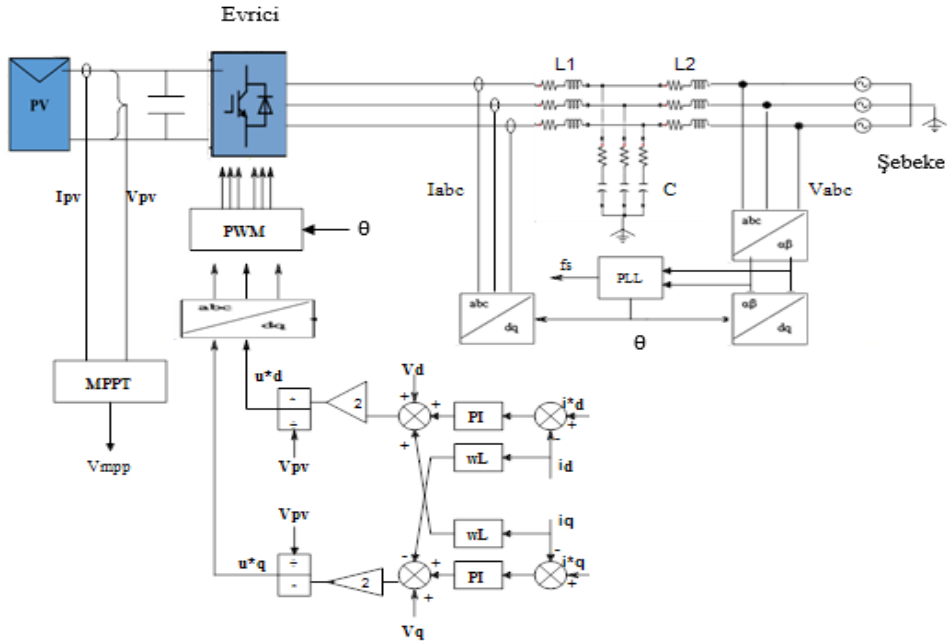
$$P^* = V_{gd}i_d + V_{gq}i_q \quad (3.3)$$

$$Q^* = -V_{gq}i_d + V_{gd}i_q \quad (3.4)$$

Kararlı bir DC gerilimi sağlamak için d eksenini akımındaki aktif gücü değiştirmek için VDC kontrolörü kullanılır. Daha sonra modülatörün girişi olan referans gerilimi, Şekil 3.9'da gösterildiği gibi, ters park dönüşümü kullanılarak elde edilir. Bilindiği gibi PI kontrolörü, sırasıyla orantılı ve integral sabitleri K_p , K_i olmak üzere iki terimden oluşur.



Şekil 3.9. Şebekeye bağlı eviricideki Lineer-akım kontrolörü



Şekil 3.10. Senkron referans çerçevesinde akım-kontrol

K_p terimi, genel hatayı en aza indirmekten sorumludur. Daha sonra hata sıfıra ulaştığında rolü etkisini azaltır. İntegral terimi K_i küçük kararlı hal hatalarıyla ilgilenir. PI kontrolörünün performansı, çapraz kuplaj terimi ($\pm wL$) kullanılarak iyileştirilir. Ayrıca bu kontrol şeması, aktif ve reaktif gücü ayrı ayrı kontrol eden özelliğe sahip olup, Şekil 3.10'de gösterilmektedir.



4. SİSTEM TASARIMI VE ÖNERİLEN KONTROL STRATEJİSİ

4.1. Giriş

Kontrol stratejisini test etmek amacıyla şebekeye bağlı PV sistemi tasarlanmıştır. PV jeneratörleri gibi birçok bileşenden oluşan bir sistemdir. Şebekeye bağlı üç fazlı iki seviyeli evirici, DC güç kaynağını elektrik şebekesine enjekte edilecek AC gücüne dönüştürme görevi yapar. Dönüşümün etkili bir şekilde uygulanabilmesi için, akım veya gerilim kontrolü olarak doğru kontrol stratejisinin seçilmesi gerekir. Birçok avantajı nedeniyle tezde bu işlevi gerçekleştirmek için doğrusal PI akım kontrolörü seçilmiştir. Darbe genişlik modülasyonu tekniği, referans gerilim sinyallerini alan bir donanım olup, sistem yapısının önemli bir parçasıdır. Daha sonra evirici çıkışında istenen gerilimi elde etmek için evirici anahtarlarının çalışmasını kontrol etmekte, PWM tarafından kapı kontrol sinyalleri üretilir. Çıkış gerilim/akım dalgalanmalarını azaltmak ve dolayısıyla şebekede güç kalitesi gerekliliklerine uymak için, eviriciyi elektrik şebekesine entegre etmek için LCL filtresi kullanılmaktadır. Evirici çıkış gerilimi ile şebeke gerilimi arasındaki senkronizasyon, faz kilitli döngü (PLL) ile yapılır. Sonuçta bu işlem şebeke geriliminin faz açısını tahmin etmek için kullanılır. Enerji sistemi temel olarak üç fazlı evirici, akım kontrolörü, PWM tekniği, LCL filtresi ve faz kilitli döngüden oluşur. Bu donanımın detayları, sonraki alt bölümlerde irdelenmektedir. Önerilen kontrol stratejisi ise Bölüm (4.4)'te tanıtılmaktadır.

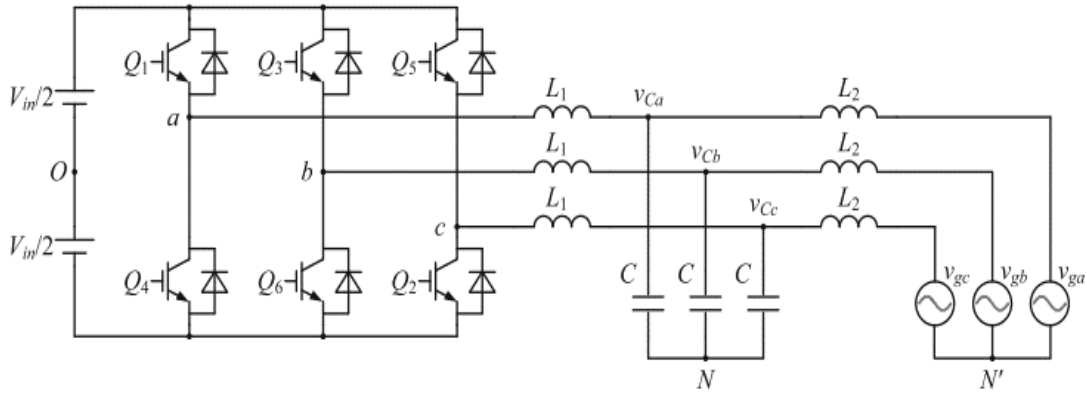
4.2. Eviriciler

Eviriciler, PV güneş enerjisi sistemleri gibi DC gerilimlerini, elektrik şebekesi veya AC yükleri beslemek üzere AC gerilimine dönüştürmek için kullanılan güç elektroniği donanımdır. Eviriciler çıkış gerilimine göre tek fazlı veya üç fazlı olarak tasarlanırlar (Kumar ve Alexander, 2021). Bu tez çalışmasında üç fazlı iki seviyeli eviriciler kullanılmaktadır.

4.2.1. Evirici Yapısı

Burada tek kademeli topoloji şeklinde üç fazlı iki seviyeli evirici kullanılmaktadır. Dolayısıyla şebeke akımının kontrolü, gerilim yükseltilmesi ve MPPT gerçekleştirilebilmektir (Kumar ve Alexander, 2021). Yaygın olarak kullanılan iki

seviyeli üç fazlı eviricinin, her biri serbest diyotla bağlanan altı güç anahtarından ve Şekil 4.1'de gösterildiği gibi, DC bağlantı kapasitöründen oluşmaktadır. Bu anahtarlar için açma/kapama sinyalleri PWM tekniklerinden biri kullanılarak üretilir. Şekil 4.1'de gösterilen bu altı anahtarlardan ikişer anahtar ($Q_1\&Q_4$, $Q_3\&Q_6$, $Q_5\&Q_2$) ile DC-barası kısa devre olacağından, aynı anda kapanmaması gerekir. İstenmeyen çıkış gerilimini önlemek için bu anahtarların her birinin aynı anda kapalı (açık devre) olması engellenir (Ahmed, 2015). En yaygın kullanılan darbe genişliği modülasyonu teknikleri, sinüzoidal PWM (SPWM) ve uzay vektör modülasyonudur (SVM). Burada SPWM kullanılacaktır çünkü iki seviyeli eviricilerde yaygın olarak kullanılan modülasyon teknikleridir. Evirici anahtarları 180° iletim verimli çalışma konumunda kullanılmaktadır.



Şekil 4.1. İki seviyeli üç fazlı şebekeye bağlı evirici

4.2.2. Şebekeye Bağlı Eviricinin Matematiksel Modeli

Şekil 4.1'de gösterilen sistemin matematiksel modeli için, DC kaynak barası, iki seviyeli evirici, LCL filtre ve elektrik şebekesi kullanılmaktadır. Bu model için transformatör ve yük dikkate alınmamaktadır. Model, literatürde çok sayıda çalışmada incelenmiştir. Dolayısıyla burada detaylı bilgi sunumuna gerek duyulmamıştır. Daha detaylı bilgi, referans (Bao ve diğ., 2013)'de verilmektedir. Şebeke faz akımları i_{ga} , i_{gb} ve i_{gc} , kararlı durumda şebekenin aynı fazı gerilimleri v_{ga} , v_{gb} ve v_{gc} ile aynı fazda olacak şekilde kontrol edilerek Denklem (4.1) ile gösterilebilir.

$$\begin{bmatrix} v_{ga} \\ v_{gb} \\ v_{gc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos(\omega t) \\ V_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Burada, W ve V_m sırasıyla şebeke kaynağının açısal frekansı ve faz geriliminin genliğidir. Sistemi sabit üç fazlı (abc), d-q senkron referans çerçevesine dönüştürmek için Denklem (4.2)'deki park dönüşümü kullanılmıştır.

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(wt) & \cos(wt - \frac{2\pi}{3}) & \cos(wt + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(wt) & -\sin(wt - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(wt + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Park dönüşümünden sonra ortalama model kullanılarak sistemin matematiksel modeli Denklem (4.3)'teki matriste gösterilebilir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i1d \\ i1q \\ Vcd \\ Vcq \\ i2d \\ i2q \\ Vdc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & w & -\frac{1}{L1} & 0 & 0 & 0 & \frac{md}{L1} \\ -w & 0 & 0 & -\frac{1}{L1} & 0 & 0 & \frac{mq}{L1} \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & w & -\frac{1}{C} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & -w & 0 & 0 & -\frac{1}{C} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L1} & 0 & 0 & w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L2} & -w & 0 & 0 \\ -\frac{md}{Cdc} & -\frac{mq}{Cdc} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i1d \\ i1q \\ Vcd \\ Vcq \\ i2d \\ i2q \\ Vdc \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L2} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} ed \\ eq \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Senkron Referans Çerçevesindeki sistem,

$$x = [i1d \ i1q \ Vcd \ Vcq \ i2d \ i2q \ Vdc]^T$$

durum değişkeniyle gösterilir. Bunlar evirici tarafındaki akımı, filtre kondansatörünün gerilimini, şebeke tarafındaki akımı ve DC gerilimini sembolize eder. Senkron referans çerçevesindeki şebeke gerilimi ed , eq olarak temsil edilir. Doğrusal olmayan darbe genişliği modülasyon değişkenleri sırasıyla md , mq olarak gösterilmiştir. Burada w açısal frekansı temsil etmektedir.

4.3. Evirici Kontrolü

Üçüncü bölümünde bahsedildiği gibi, şebekeye bağlı evirici, akım kontrolü ve gerilim kontrolü şeklinde iki temel yöntemle kontrol edilmektedir. Bu tezde, birçok avantajı nedeniyle akım kontrolü kullanılacaktır. Akım kontrol tekniklerinden doğrusal PI akım kontrolörü, tahminli akım kontrolöründe olduğu gibi sistemin modeline bağlı değildir. Dolayısıyla kontrolörün sağlamlığı ve kararlılığı sistem parametre değişimlerinden etkilenmemektedir. Ayrıca doğrusal PI akım kontrolörü, akım hata kompanzasyonu ve modülasyon mekanizmasını ayırarak histerezis akım kontrolünden daha iyi sonuç vermektedir. Dolayısıyla, iyi tanımlanmış harmonik spektrum, sabit anahtarlama frekansı ve DC bara kullanımı gibi açık çevrim modülatörlerin avantajlarından yararlanılmaktadır. Doğrusal PI akım kontrolü, sabit ($\alpha\beta$) bir referans çerçevesinde uygulanabilir ve aynı zamanda senkron (dq) bir referans çerçevesinde de uygulanabilir. Burada senkron (dq) referans çerçevesi kullanılacaktır. Senkron referans çerçevesinin, şebeke akımının aktif ve reaktif bileşenlerini düzenlemekten sorumlu iki PI kontrol donanımını kullanan iki iç döngü akım kontrolünden oluşur. Sonuç olarak, Şekil 3.10'da gösterildiği gibi, şebekeye enjekte edilecek güç ayarı gerçekleştirilir. Ayrıca, sırasıyla Denklem (4.4) ve (4.5)'te görülebileceği gibi, PI denetleyici performansını (Sumathi ve diğ., 2015) geliştirmek için bu konfigürasyonda ileri besleme ve çapraz bağlantı terimleri ($\pm wL$) kullanılır. Ayrıca, Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, DC bara gerilimini sabit tutmak için dış döngü gerilim kontrolü kullanılabilir.

$$L \left(\frac{di_d}{dt} \right) + Ri_d = V_d - e_d + wLi_q$$

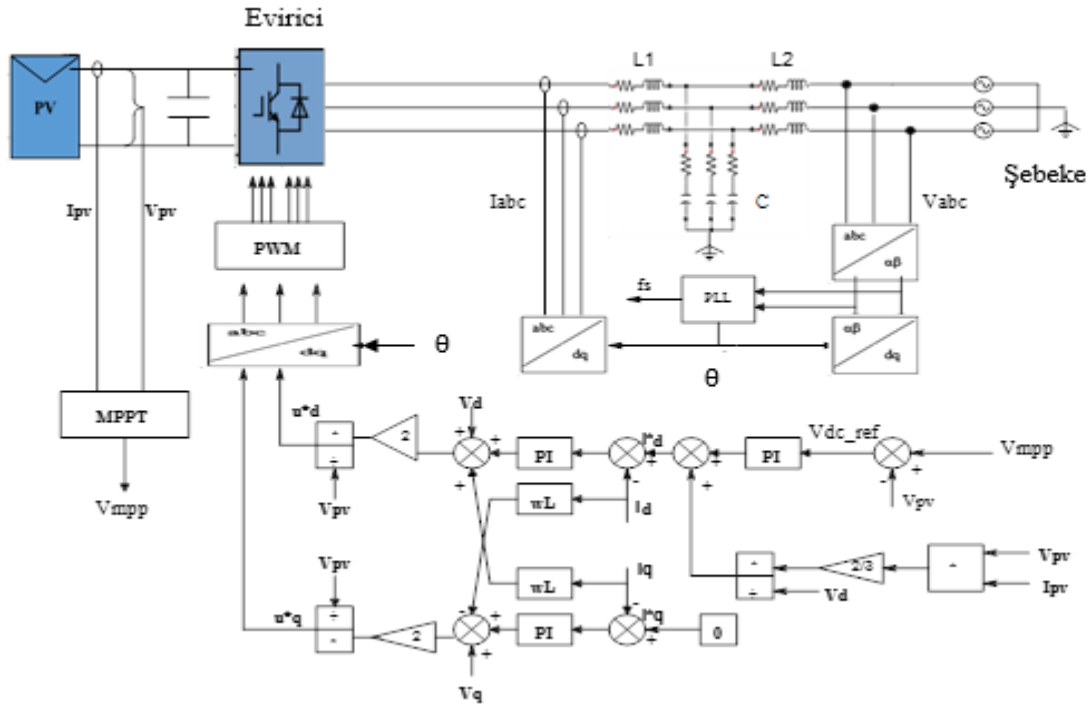
$$L \left(\frac{di_q}{dt} \right) + Ri_q = V_q - e_q - wLi_d \quad (4.4)$$

kabul edilerek

$$\tilde{v}_d = V_d - e_d + wLi_q$$

$$\tilde{v}_q = V_q - e_q - wLi_d \quad (4.5)$$

denklemleri elde edilir. Akım kontrol donanımının PI kontrolü aracılığıyla çıkış gerilimi, Denklem (4.7)'deki gibi olur. Dolayısıyla, d eksenli akımı i_d ve q eksenli akımı i_q ,



Şekil 4.2. Dış ve iç döngü akım kontrolörüne sahip şebekeye bağlı PV sistemi

$$\tilde{v}_d = \left(kp + \frac{ki}{s} \right) (i^*d - id)$$

$$\tilde{v}_q = \left(kp + \frac{ki}{s} \right) (i^*q - iq) \quad (4.6)$$

$$V^*d = ed - wLiq + \tilde{v}_d$$

$$V^*q = eq + wLid + \tilde{v}_q \quad (4.7)$$

şeklinde tanımlanabilir.

4.4. Önerilen Kontrol Stratejisinin Metodolojisi

Elektrik şebekesine enjekte edilecek gücü kontrol etmek için, entegre PV sistemi ile birçok güç elektroniği topolojisi kullanılmıştır. En yaygın kullanılan topolojiler, tek aşamalı ve çift aşamalı konfigürasyonlardır. Tek aşamalı konfigürasyonda, MPPT'yi gerçekleştirmek ve elektrik şebekesine önceden tanımlanmış gerilim ve/veya akımı enjekte etmek için yalnızca bir güç elektroniği donanımı olan evirici kullanılabilir. Öte yandan, çift kademeli iki evirici kullanılarak, MPP elde etmede bir yükseltici tip DC-DC dönüştürücü ve elektrik şebekesine enjekte edilecek gücü kontrol etmek için bir DC-AC

evirici kullanılır. Bölüm 3'te bahsedildiği gibi, evirici akım kontrolü kullanılmaktadır. Bu nedenle ve daha basit olması açısından tek aşamalı konfigürasyon daha uygundur. Çünkü evirici akım kontrolünde MPPT eviricisiyle entegre edilebilir. Böylece çift kademeli topolojide olduğu gibi daha fazla DC-DC dönüştürücüye ihtiyaç kalmayacaktır. dq çerçevesindeki aktif güç, Denklem (4.8)'deki gibi verilebilir. Burada, d ve q indisleri, doğrudan eksen ve karesel eksen bileşenleridir. Vd gerilimini şebeke gerilimine eşitlerken, vd=1 ve vq=0 olarak varsayılmaktadır. Dolayısıyla güç için Denklem (4.9)'daki eşitlik tanımlanabilmektedir.

$$P = vd \cdot id + vq \cdot iq \quad (4.8)$$

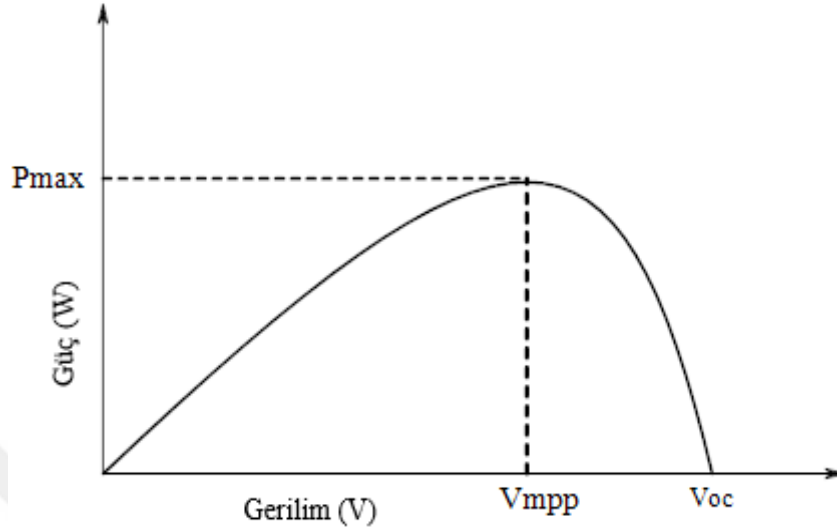
$$P = vd \cdot id \quad (4.9)$$

Burada asıl hedef, şebeke frekansını desteklemek olduğundan aktif gücü kontrol etmek için Denklem (4.9) aracılığıyla güç, id akımı değiştirilerek kolayca kontrol edilebilir. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, idc_ref (i*d), Vdc_ref'i değiştirerek doğrudan dış döngü kontrolörü aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Son zamanlardaki birçok araştırma, Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, MPPT algoritmalarını kullanarak PV panellerin üretebileceği tüm gücü kullanmak için Vdc_ref'i maksimum güç noktasındaki Vmpp gerilim değeri olarak almaktadır. Sonuçta, PV sistemlerinin frekans ayarına etkileri tartışılmaktadır.

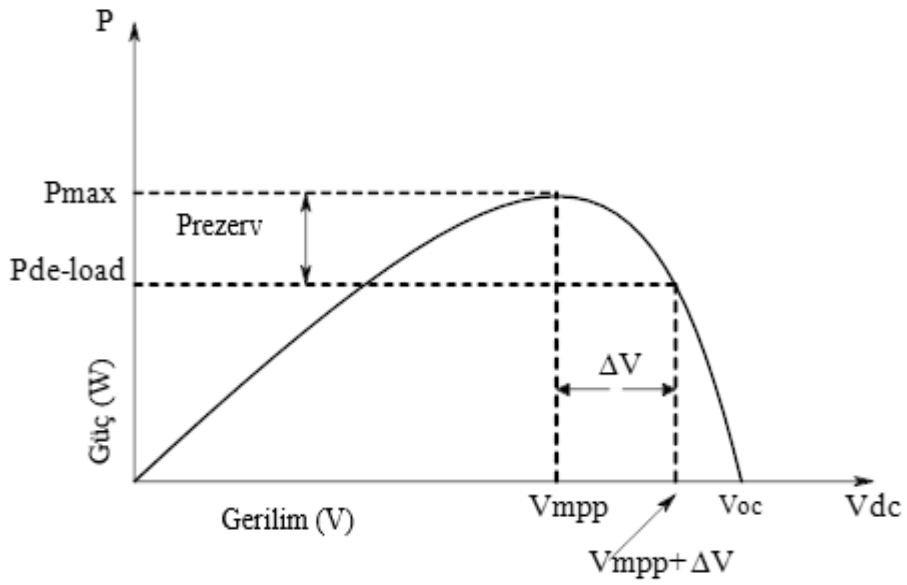
Önerilen kontrol stratejisi sayesinde Vdc_ref değeri Vmpp olarak alınmak zorunluluğu olmayacaktır. Burada, PV de-loading tekniğini kullanarak PV sistemini MPP'sinden uzakta, Vmpp'den daha yüksek bir gerilimde çalıştırılmaktadır. Böylece şekil 4.4'te gösterildiği gibi yedek bir güç rezervine ulaşılmış olacaktır. Sistem, Şekil 4.5'te gösterilen, 2 numaralı noktada gösterildiği gibi frekans sapmalarına bağlı olarak önerilen kontrol stratejisi ile yedek gücü serbest bırakılarak ayar yapılabilir. Bu kontrol stratejisi, aynı zamanda Şekil 4.5'deki 3 no'lu noktada olduğu gibi, frekans sapması ayrılmış güçten daha büyük olduğunda sistemin MPP'si altında çalışmasını önlemesiyle tercih edilmektedir.

Şekil 4.6'daki blok diyagramı, önerilen stratejiyi kullanarak Vdc_ref'i kontrol edip referans akımı üretme prosedürünü göstermektedir. Seçme anahtarı, yedek güç varken mod 1'de çalışır. Güç ihtiyacında MPP altında çalışmayı önlemek için, frekans sapması

yedek güçten büyük ise, mod 2'ye dönüşerek sırasıyla Denklem (4.10) ve (4.11) tanımlanabilir.

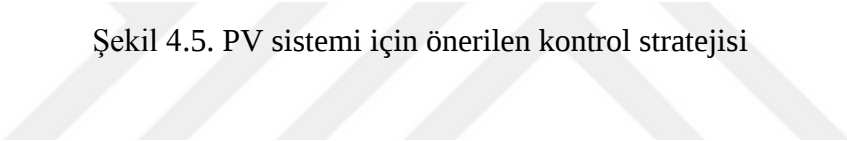


Şekil 4.3. MPP'de PV sistemi çalışması grafiği



Şekil 4.4. De-loaded PV grafiği

Denklem (4.10)'da olduğu gibi hala yedek güç varken de-loading stratejisi uygulanarak Denklem (4.11) yazılabilir. MPP'nin altında çalışmayı önlemek için yedek güç

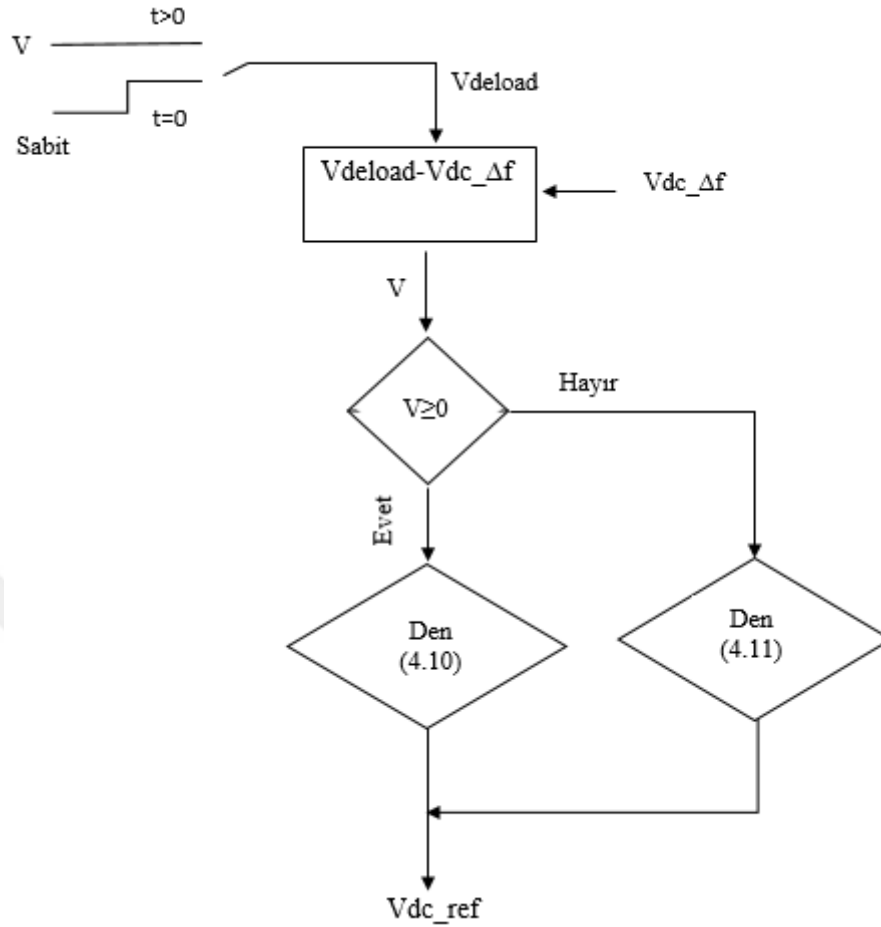


Şekil 4.5. PV sistemi için önerilen kontrol stratejisi

Şekil 4.6. Önerilen stratejiyi kullanarak V_{dc_ref} 'i kontrol eden referans akımın üretimi

$$V_{dc_ref} = V_{mpp} + \Delta V - V_{dc_df} \quad (4.10)$$

$$V_{dc_ref} = V_{mpp} \quad (4.11)$$



Şekil 4.7. PV sistemi için de-loading stratejisinin akış şeması

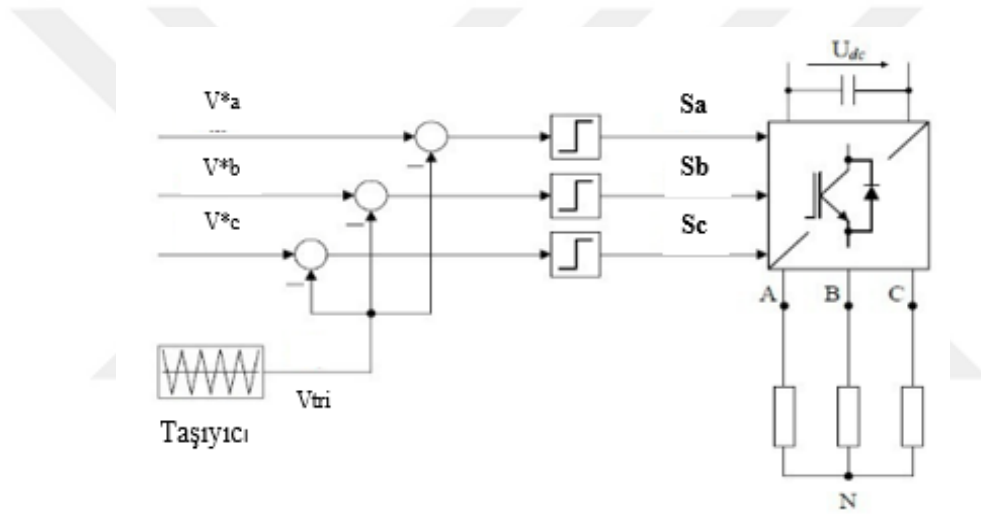
4.5. Darbe Genişliği Modülasyonu

PWM, bireysel evirici anahtarlarının açılıp kapatılması için kapı kontrol darbeleri üreten bir mekanizmadır. Eviriciden sabit bir gerilim elde etmek için, akım kontrolöründen üretilen V^*a , V^*b ve V^*c referans gerilimlerinden yararlanılır (Ahmed, 2015). Bu amaçla kullanılan birçok PWM tekniği türü vardır. PWM teknikleri için seçim kriterleri, evirici yapısında kullanılan yarı iletken cihazlara, kabul edilebilir çıkış gerilim harmonik içeriğine ve güç seviyesine bağlıdır (Sumathi ve diğ., 2015). Literatürde kullanılan temel PWM tekniği vardır; sinüzoidal darbe genişliği modülasyonu (SPWM) ve uzay vektör modülasyonu (SVM). SPWM'nin temel çalışması, akım kontrolörü tarafından üretilen üç fazlı referans sinüzoidal modülasyon sinyallerini yüksek frekanslı üçgen taşıyıcı dalga formuyla karşılaştırmaktır. Mikroişlemci teknolojilerinin gelişimi, üç fazlı eviriciyi tek bir ünite olarak ele alan SVM'nin ortaya çıkmasına ve popülerliğine yol açmıştır. SVM,

aktif ve sıfır vektörlerin doğru kombinasyonunu belirleyerek belirli bir referans gerilimine yaklaşmayı amaçlayan dijital bir modülasyon tekniğidir. Detaylı olarak referans (Ahmed, 2015)'te tanımlanan SPWM tekniği, tez çalışmasında kullanılmakta olup gerekli açıklama ve irdelemeler sonraki alt bölümde ele alınmaktadır.

4.5.1. Sinüzoidal Darbe Genişliği Modülasyonu (SPWM)

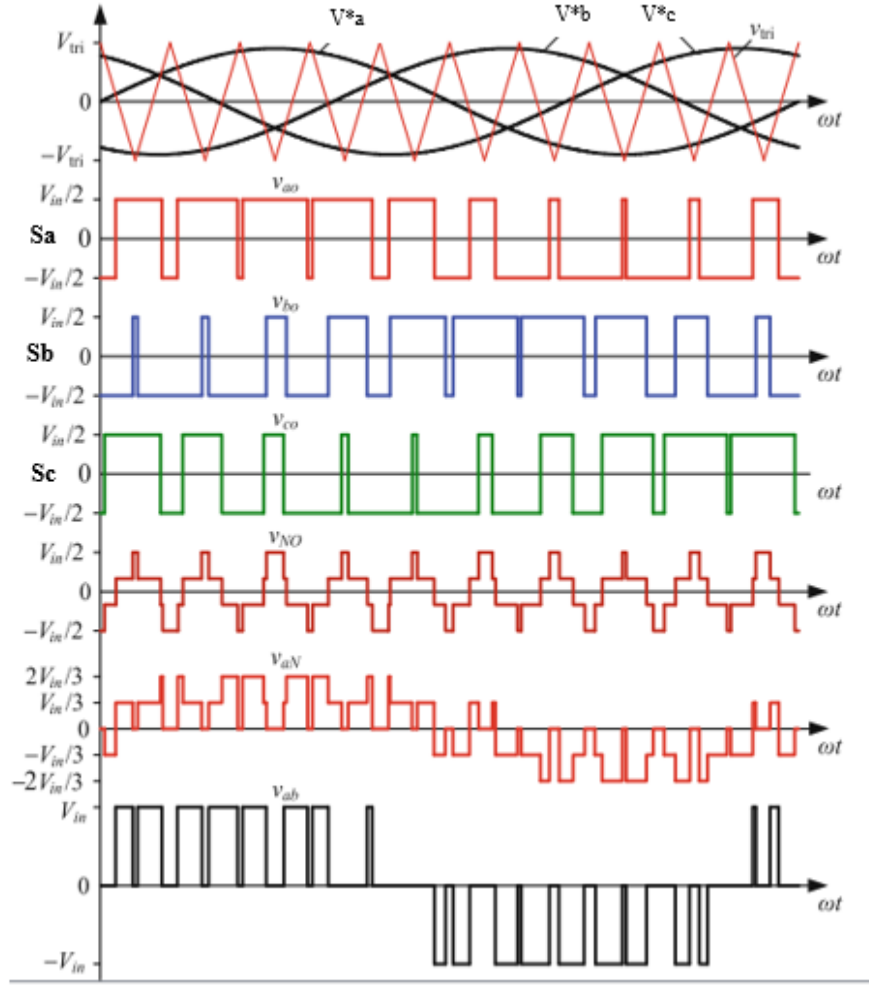
SPWM, kontrol tekniği ile üretilen üç fazlı referans modülasyon sinyallerini (V^*_a , V^*_b ve V^*_c), yüksek frekansa sahip üçgen taşıyıcı dalga ile karşılaştırmak için kullanılır. Bir DC-AC dönüştürücü olan evirici ile sabit bir çıkış gerilimi elde etmek için, Şekil 4.8'de gösterildiği gibi, ilk olarak kapı kontrol sinyalleri (S_a , S_b , S_c) üretilmiştir.



Şekil 4.8. Sinüzoidal Darbe Genişliği Modülasyon Bloğu (Ahmed, 2015)

Şekil 4.9, sinüzoidal modülasyon sinyallerinin her fazının üçgen taşıyıcı (V_{tri}), (V^*_a & V_{tri} , V^*_b & V_{tri} , V^*_c & V_{tri}) ile karşılaştırılması sonucu oluşturulan kapı kontrol sinyallerini (S_a , S_b , S_c) göstermektedir. Kapı kontrol sinyali üretmenin mantığı, Şekil 4.9 görüldüğü gibi, referans sinyallerinin (V^*_a , V^*_b , V^*_c) taşıyıcı dalgadan büyük olması durumunda çıkışın yüksek, tersi olduğunda çıkışın düşük olması sonucunda üretilmektedir.

Şekil 4.1'de, Şekil 4.10'daki şebekeye bağlı bir evirici eşdeğer devresi gösterilmektedir. Burada, orta nokta 0'a göre evirici çıkış gerilimi (V_{a0} , V_{b0} , V_{c0}), evirici tarafı indüktör akımları (i_{1a} , i_{1b} , i_{1c}), şebeke tarafı indüktör akımları (i_{2a} , i_{2b} , i_{2c}) ve filtre kapasitör akımları (i_{ca} , i_{cb} , i_{cc}) gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Sinüzoidal PWM'ye göre kapı sinyalleri ve gerilim dalga biçimleri (Ruan ve diğ., 2018)

$$V_{a0} = j\omega L_1 * i_{1a} + V_{ca} + V_{N0}$$

$$V_{b0} = j\omega L_1 * i_{1b} + V_{cb} + V_{N0} \quad (4.12)$$

$$V_{c0} = j\omega L_1 * i_{1c} + V_{cc} + V_{N0}$$

Kondansatör gerilimleri, Denklem (4.13)'te gösterildiği gibi hesaplanır.

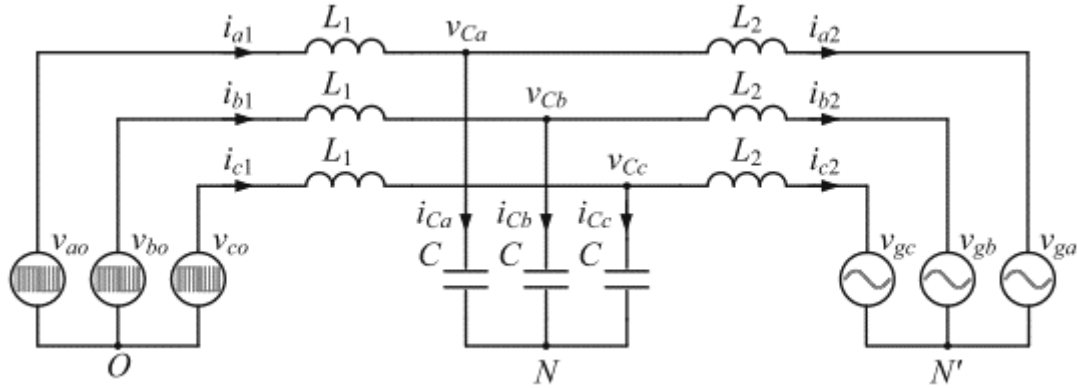
$$V_{ca} = \frac{i_{ca}}{j\omega c}$$

$$V_{cb} = \frac{i_{cb}}{j\omega c}$$

$$V_{cc} = \frac{i_{cc}}{j\omega c}$$

$$(4.13)$$

Benzer şekilde, V_{N0} , V_{NN} , V_{aN} , V_{bN} ve V_{cN} 'nin hesaplanması kolayca gerçekleştirilebilir (Ruan ve diğ., 2018).



Şekil 4.10. Şebekeye bağlı evirici eşdeğer devresi.

Modülasyon performansını doğrudan etkileyebilecek, modülasyon indeksi (m) ve frekans modülasyonu (fr) şeklinde iki ana parametre vardır.

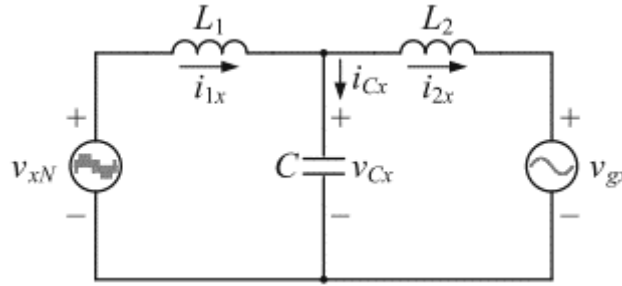
Modülasyon İndeksi, temel referans dalgasının büyüklüğü ile taşıyıcı dalga arasındaki oran olarak $m = V_m/V_{tri}$ şeklinde tanımlanır. Burada, V_m referans dalga formunun tepe büyüklüğüdür ve V_{tri} ise, taşıyıcı dalga formunun tepe büyüklüğüdür. $0 < m \leq 1$. Frekans modülasyonu taşıyıcı dalganın frekansı ile referans dalganın temel frekansı arasındaki orandır.

4.6. LCL Filtre Tasarımı

Şebekedeki güç kalitesi gereksinimlerine bağlı olarak, eviriciyi elektrik şebekesine entegre etmek için bir filtre kullanılmaktadır. Böylece evirici çıkış geriliminde harmonik azalması sağlanır (Beddar ve diğ., 2023). Bu görevi gerçekleştirmek için kullanılan üç ana filtre türü vardır. İndüktör filtresi en yaygın kullanılan filtredir. Yüksek dereceli filtrelerin aksine, indüktör filtresi rezonansa maruz kalmaz. Bunun aksine, salınımların azaltılması için anahtarlama frekansı ve indüktörün yeterince yüksek olması gerekir. Dolayısıyla, filtre boyutu büyür (Ahmed, 2015; Sumathi ve diğ., 2015). Anahtarlama frekansının küçültülmesi için, bir indüktöre paralel bağlanan bir kapasitör, rezonans frekansı şebeke empedansına göre değiştiği için nadiren kullanılan bir LC filtresiyle desteklenir. Avantajları nedeniyle LCL filtreler, şebekeye bağlı evirici için uygun arayüzler olarak ortaya çıkmaktadır.

4.6.1. LCL Filtresinin İndüktör ve Kapasitörleri

Şekil 4.10'da gösterilen üç fazlı şebekeye bağlı evirici eşdeğer devresi, üç fazlı şebeke geriliminin kararlılığı sağlandığında, Şekil 4.11'de gösterilen eşdeğer devre gibi basitleştirilebilir (Ruan ve diğ., 2018). LCL filtre devresi sırasıyla bir evirici tarafı indüktörü, bir şebeke tarafı indüktörü ve bir kapasitörden (L_1 , L_2 , C) oluşmaktadır. Evirici tarafı indüktör akımları, şebeke tarafı indüktör akımları ve kapasitör gerilimi sırasıyla (i_{1x} , i_{2x} ve V_{Cx}) olarak gösterilir. Burada (x), üç fazı ($x = a, b$ ve c) temsil eder.



Şekil 4.11. Üç fazlı şebekeye bağlı LCL filtre eşdeğer devresi

1. Filtre kapasitörü

LCL filtre kondansatörü şebeke frekans değerinde üretilen reaktif güce göre tasarlanmıştır. Pratikte Q reaktif gücü, invertör çıkış aktif gücünün (P_r) kesin bir oranıyla sınırlıdır, normalde üç fazlı tam köprü eviricinin bir fazının %5'i olarak alınmaktadır (Ruan ve diğ., 2018).

$$Q = \frac{V^2}{\frac{1}{2\pi f c}}, \quad Q = \%5 \text{ of } P_r$$

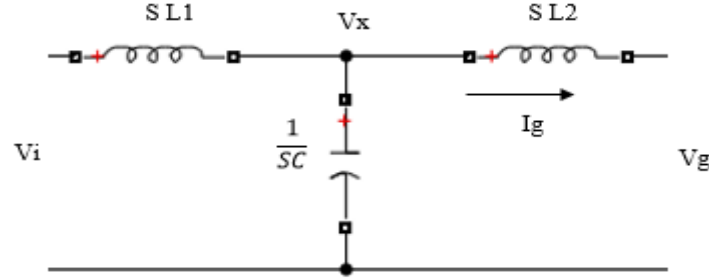
$$\frac{V^2}{\frac{1}{2\pi f c}} = \%5 \text{ of } P_r$$

$$V^2 * 2\pi f c = \%5 * P_r$$

$$C = \frac{0.05 P_r}{2\pi f V^2} \quad (4.14)$$

2. Filtre indüktörleri

İzin verilen maksimum akım dalgalanması, filtre indüktörünün tasarımındaki ana faktördür. Pratik olarak akım dalgalanmaları nominal akımın %20'si olacak şekilde seçilir. Şekil 4.12'ye göre;



Şekil 4.12. Tek fazlı şebekeye bağlı LCL filtre eşdeğer devresi

$$\frac{V_i - V_x}{S L_1} I_g + \frac{V_x}{\frac{1}{SC}} \quad (4.15)$$

$$V_x = I_g * S * L_2 \quad (4.16)$$

yazılabilir. Filtre aktarım fonksiyonu;

$$\frac{I_g}{V_i} = \frac{1}{(S^3 * L_1 * L_2 + S(L_1 + L_2))}$$

When ($L = L_1 + L_2$, and $L_P = \frac{L_1 * L_2}{L_1 + L_2}$)

$$\frac{I_g}{V_i} = \frac{1}{S L (1 + S^2 C L_P)} \quad , W_{res} = \frac{1}{\sqrt{C L_P}} \quad (4.17)$$

ile tanımlanabilir. Anahtarlama frekansı (f_{sw}), rezonans frekansı (f_{res}) ve kapasitans değeri C seçildikten sonra.

$$\frac{I_g}{V_i} = \frac{1}{S L (1 + S^2 / W_{res}^2)} \quad , S \rightarrow j W_{sw}$$

$$\frac{I_g(sw)}{V_i(sw)} = \frac{1}{j W_{sw} L (1 + (j W_{sw})^2 / (W_{res}^2))}$$

$$\left| \frac{I_g(sw)}{V_i(sw)} \right| = \frac{1}{W_{sw} L (1 + (W_{sw})^2 / (W_{res}^2))}$$

$$L = \left| \frac{1}{W_{sw} * \left(\frac{I_g(sw)}{V_i(sw)} \right) * \left(1 - \frac{W_{sw}^2}{W_{res}^2} \right)} \right| \quad (4.18)$$

IEEE standardına göre $I_g(sw) = i_g$ 'in %0.3'ü, Denklem (4.19) minimum indüktans değerini gösterir.

$$L_1 = L_2 = \frac{L}{2} \quad (4.19)$$

Maksimum indüktans değeri, genelde şebeke geriliminin %20'si ile sınırlı olan indüktanstaki gerilim düşümüne göre hesaplanır.

$$L_{max} = \frac{0.2V_{grid}}{(2*\pi*F*I_g)} \quad (4.20)$$

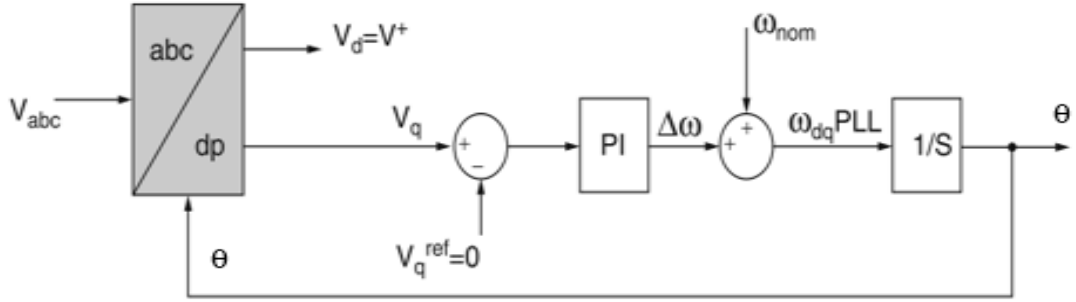
4.7. Faz Kilitli Döngü (PLL)

Şebekeye bağlı eviricinin en önemli yönlerinden biri şebeke gerilimi veya akımı ile senkronizasyonudur. Literatürde sıfır geçiş dedektörleri ve faz kilitli döngü (PLL), şebekeyle senkronizasyonu için kullanılan iki ana teknik türüdür. Son zamanlarda sıfır geçiş dedektörlerine göre avantajları nedeniyle PLL'ler etkili bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Dört tip PLL vardır; tezde senkron referans çerçevesi PLL (dq PLL) kullanılacaktır. DqPLL'nin ana işlevi, üç fazlı sabit gerilimleri, abc ve dq bileşenlerine dönüştürmek için yapılan park dönüşümünde kullanmak üzere, Denklem (4.21)'de gösterildiği gibi, şebeke geriliminin faz açısını tahmin etmektir. Uygulama, örnek bir dq-senkron referans çerçevesinde (SRF) gerçekleştirilecektir. Doğrudan eksen gerilim bileşeni Vd geriliminin üzerinde olduğunda sistem kilitlenir. Dolayısıyla tahmin edilen faz açısı şebeke geriliminin faz açısına eşittir. Şekil 4.13'te görülebileceği gibi, karesel eksen gerilim bileşeni Vq'nun bir orantısal-integral PI kontrolörü aracılığıyla sıfır izlemeye zorlanmasıyla başarılabılır. Dönüşüm kullanılarak d ekseni ve q ekseni bileşeninin değeri Denklem (4.22)'deki gibi temsil edilebilmektedir.

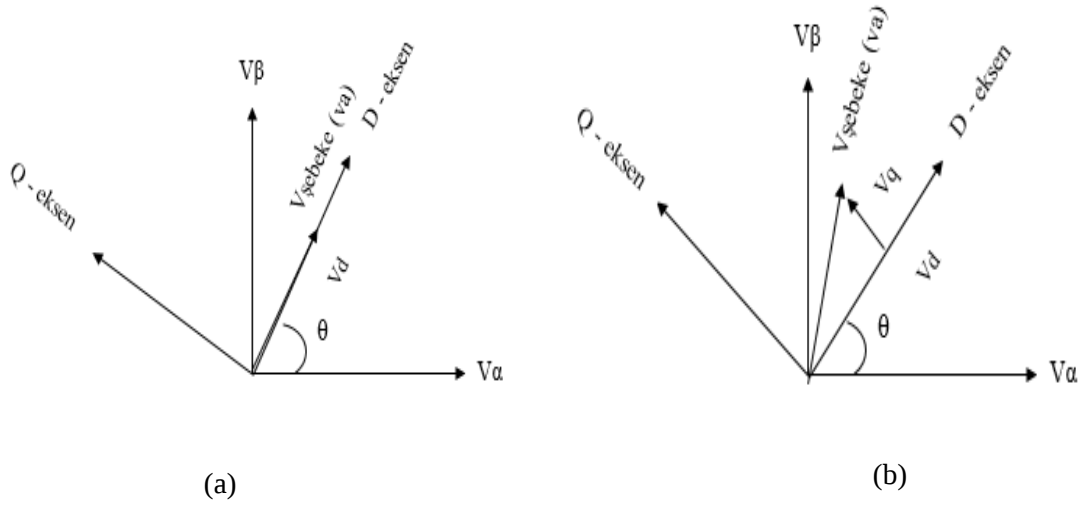
$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120) & \cos(\theta + 120) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 120) & -\sin(\theta + 120) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \cos(\theta - \theta_g) \\ E \sin(\theta - \theta_g) \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

E, şebeke geriliminin genliği, θ tahmini açı ve θ_g , şebeke geriliminin faz açısıdır. Dolayısıyla sistem kilitli olduğunda ve $\theta = \theta_g$ olduğunda, Vd şebeke geriliminin genliğine eşit olur ve Vq=0 olur. Şekil 4.14 ayrıca sistemi (b) kilitlenmeden önce ve (a) kilitlendikten sonraki durumları göstermektedir.



Şekil 4.13. Faz kilitli döngü (PLL) yapısı

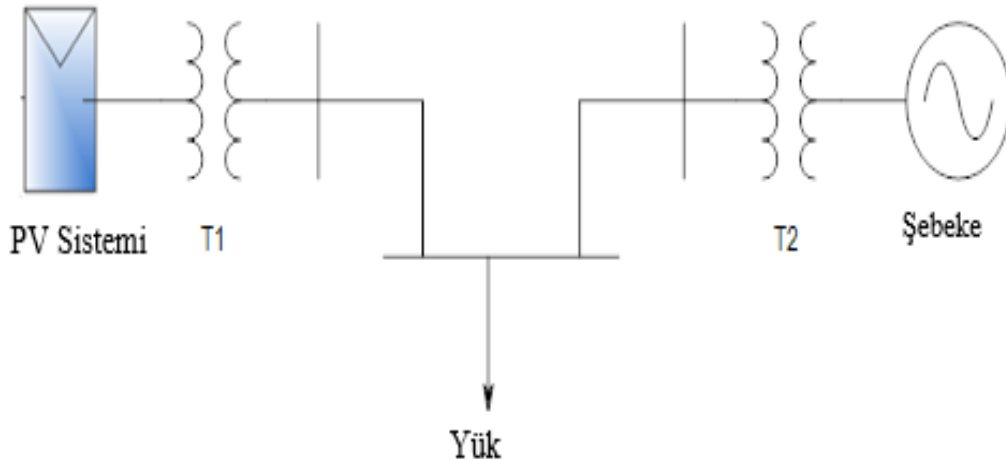


Şekil 4.14. Senkronizasyondan sonra (a) ve önce (b) şebeke geriliminin V_d bileşeninin vektör diyagramı

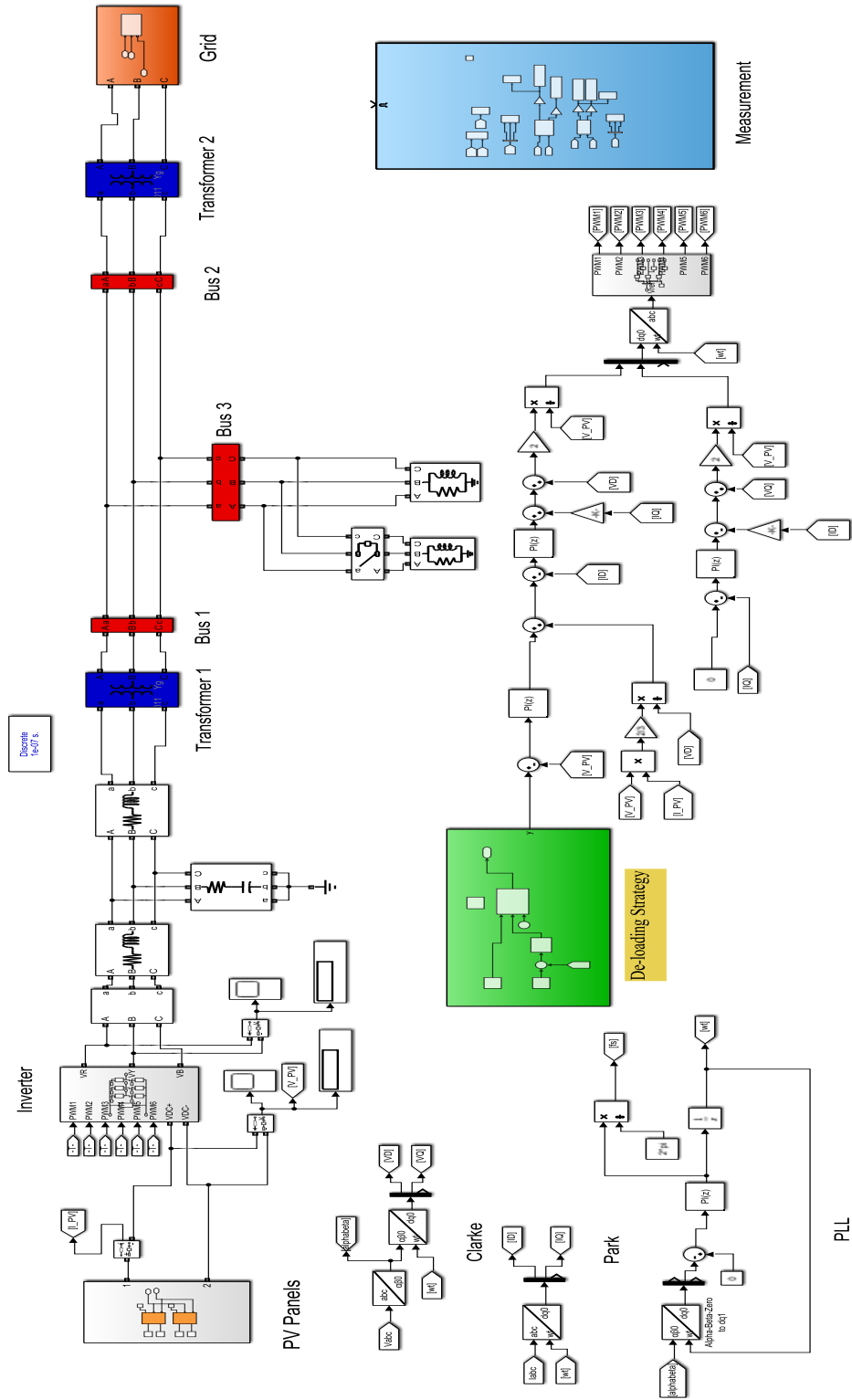
5. SİMÜLASYON SONUÇLARI

5.1. Simülasyon

Sistem frekansını desteklemek amacıyla önerilen yedek güç kontrol stratejisinin etkinliğini doğrulamak için, Şekil 5.1'de gösterildiği gibi, üç baralı bir sistem tasarlanmıştır. Önerilen kontrolörü doğrulamak amacıyla üç veriyollu sistemin modelini simüle etmek için Matlab Simulink kullanılmıştır. Şekil 5.2’de, PV dizileri, üç fazlı, iki seviyeli bir evirici, bir LCL filtre, bir akım kontrolörü, PWM modülü, bir AC şebeke, bir dinamik yük, iki transformatör, bir faz kilitli döngüden oluşan Matlab Simulink'teki sistemin ayrıntıları gösterilmektedir. Bu model ile PV de-loading stratejisi kullanılan sistemi göstermektedir. Ayrıca sistem de-loading tekniği kullanılmadan önce de simüle edilerek sonuçlara ulaşılmıştır. PV sistemi, de-loading stratejisini kullanmadan önce 30 MW güç değeri alınmıştır. Bu nedenle, PV de-loading sistemi kullanıldığında, PV çıkış gücünün, rezerve edilecek güçle orantılı olarak daha büyük olacak şekilde tasarlanması gerekir. Bu nedenle PV sistemi 40 MW çıkış gücünde tasarlandı. PV sistemi MPP noktasından $V_{mpp} + \Delta V$ kadar uzakta çalışabilmesi için V_{mpp} değerinin %11'i de-loaded gerilimi olan ΔV değeri eklenerek de-load edilmiştir. Koşullar, sistem standart test durumunda STC çalışırken uygulandı. PV de-loading stratejisini kullanmadan önce ve kullandıktan sonra sistem davranışını görmek için 0.3 saniyede 3. baralı sisteme yeni bir yük eklenmiştir.



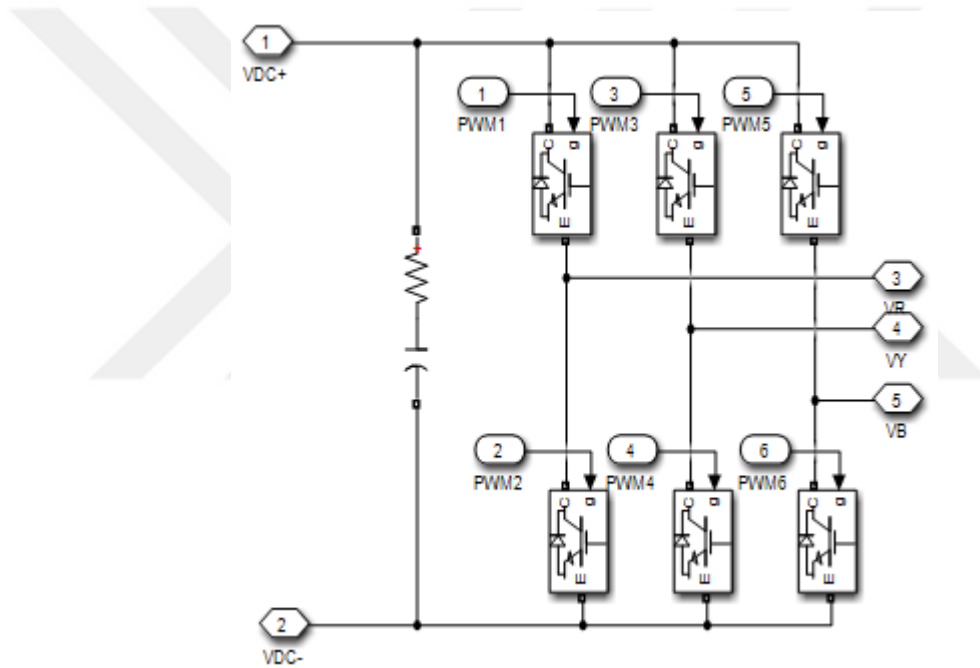
Şekil 5.1. İncelenen 3-baralı sistemi



Şekil 5.2. Sistemin Matlab Simulink'i

5.1.1. Evirici Kontrolü

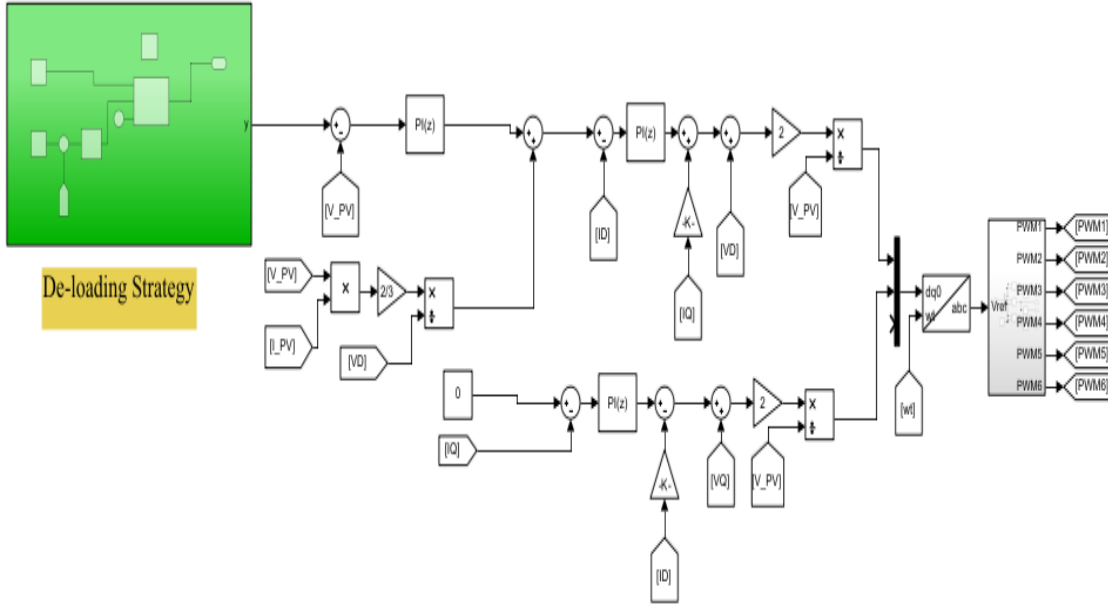
PV sistemi, şebekesine bağlanırken üç fazlı, iki seviyeli bir evirici kullanılmıştır. Ancak burada eviricinin iç yapısı, şekil 5.3'te gösterilen şekilde sunulmaktadır. Şekil 5.2'de gösterilen sistemin Matlab Simulink genel yapısı tek blok olarak temsil edilmiştir. Eviricinin, her biri serbest diyot ve kapasitöre paralel bağlanan 6 IGBTs güç anahtarından oluşmaktadır. Anahtarlar, PWM tekniğiyle üretilen darbelerle (PWM1, PWM2, PWM3, PWM4, PWM5 ve PWM6) geçiş yapar. Böylece üç fazlı çıkış gerilimi elde edilir (VR, VY ve VB) ve harmonik bileşenlerini ortadan kaldırmak için doğrudan LCL filtresiyle beslenir. PV çıkış gerilimi eviriciye DC barası (VDC+ ve VDC-) üzerinden bağlanır.



Şekil 5.3. Üç fazlı iki seviye eviricisinin Simulink modeli

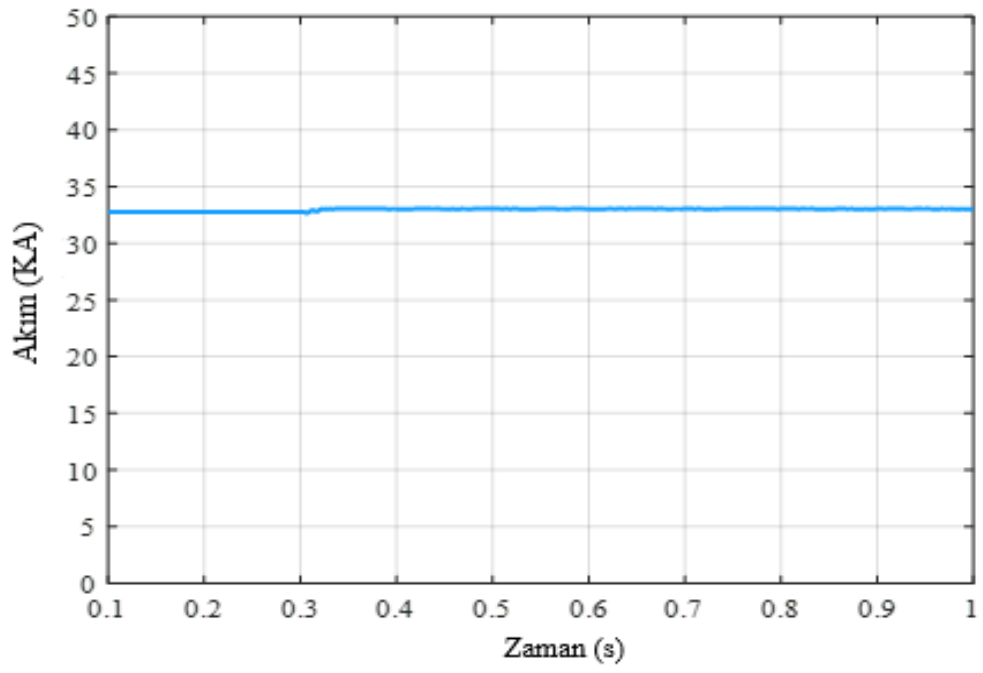
Akım kontrolü, evirici anahtarlarının ilettime girmesi için PWM ile referans gerilimine göre kontrol sinyali üretir. Kontrol referansları, Şekil 5.4'te gösterildiği gibi, önerilen PV de-loaded kontrolöründen alınan iki çevrimden alır. Bunlar iç çevrim akım kontrolörü ve dış çevrim gerilim kontrolörüdür. Ayrıntı ve irdelemeler Bölüm 4.4'te verilmiştir. Şekil 5.4'te gösterildiği gibi, ikisi iç döngülü ve biri dış döngülü olmak üzere üç PI kontrolör kullanılmaktadır. PI kontrolör parametrelerinin ayarlanması için Ziegler-Nichols kuralları kullanılmıştır. Ayarlama, öncelikle (K_i) parametresinin sıfıra eşitlenmesi ve (K_p) parametresinin sıfırdan kritik değer olan K_u sınırına ulaşana kadar kademeli olarak

arttırılmasıyla gerçekleştirilir. Çıkış kararlı bir salınım durumuna ulaştığında, iki tepe noktası arasındaki süre olan T_u hesaplanabilir. Böylece oransal sabit K_p ve integral sabiti K_i değerleri kolaylıkla ayarlanabilmektedir. $K_p=0,45.K_u$ ve $K_i=1,2K_p/T_u$. Bu simülasyonda PI kontrolör parametreleri iç kontrolör için $K_p=30$ ve $K_i=50000$, dış çevrim kontrolör için $K_p=0,5$ ve $K_i=6100$ olarak hesaplanır.

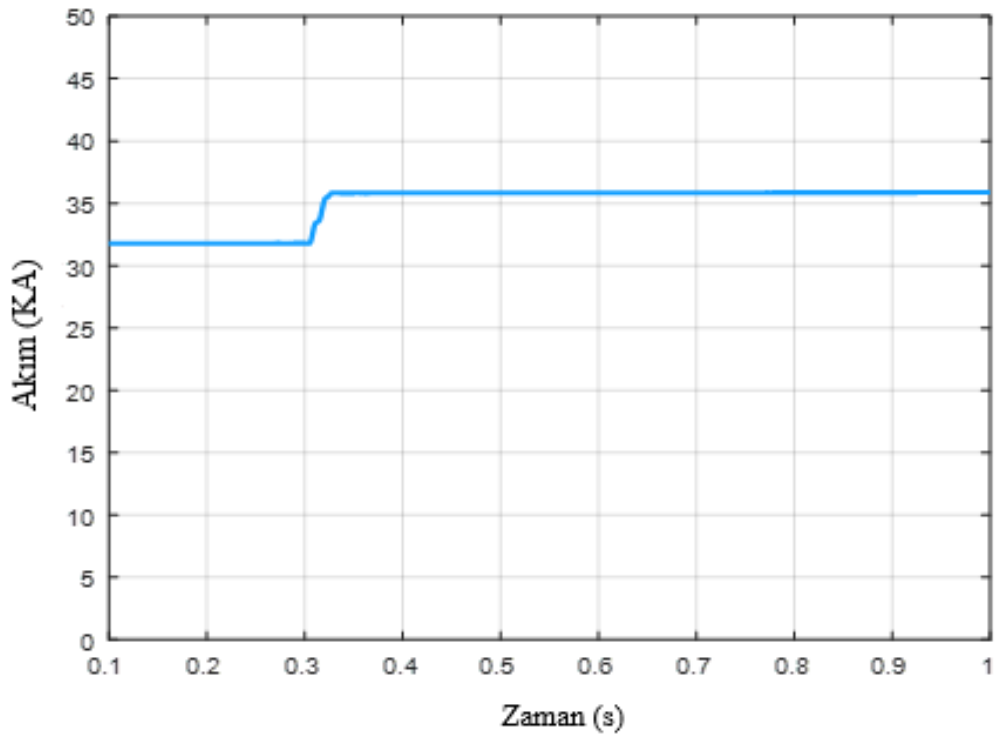


Şekil 5.4. PV de-loaded kontrolörü ile akım kontrolü

Akım kontrolörü, dış döngü gerilim kontrolörü tarafından sağlanan referans akım i_{dref} 'i izler. Ayrıca dış döngü kontrolörüne referans, PV de-loading stratejisi tarafından sağlanır. Bölüm 4.4'te bahsedildiği gibi, asıl hedef, Denklem (3.9)'da gösterildiği gibi, id akımını değiştirerek aktif gücü kontrol etmektir ($P = v_d \cdot i_d$). Sırasıyla Şekil 5.5 ve 5.6, yeni yük 0.3 saniyede bağlandığında önerilen kontrol stratejisinin kullanılmasından önce ve sonra ortak bağlantı noktasındaki (PCC) akımı göstermektedir. de-loaded PV sistemi ile akım artmaktadır. Bundan dolayı, yeni bir yük bağlandığında desteğin sağlandığı, dolayısıyla aktif gücün arttığı anlamına geliyor.



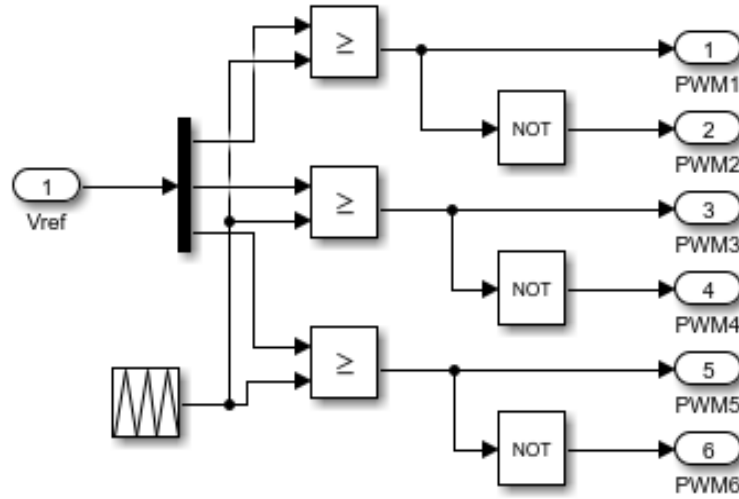
Şekil 5.5. De-loading stratejisi kullanılmadan ortak bağlantı noktasındaki akım



Şekil 5.6. De-loading stratejisinin kullanımıyla ortak bağlantı noktasındaki akım

5.1.2. Darbe Genişliği Modülasyonu

Şekil 5.4'te gösterildiği gibi, istenen evirici çıkış gerilimi, akım kontrolörü aracılığıyla PWM modülü girişi olarak verilir. Ters park dönüşümünün çıkışında, dönen referans formundan (V_d ve V_q) dönüştürüldükten sonra V_{ref} 'i (V_a , V_b ve V_c) temsil eder. Referans sinyalleri taşıyıcı dalga formuyla karşılaştırılır. Dolayısıyla kapı kontrol sinyalleri (PWM1, PWM2, PWM3, PWM4, PWM5 ve PWM6) Şekil 5.7'de gösterildiği gibi üretilir. Eviricinin bir ayağı için üst ve alt anahtarlar aynı anda çalışmaz çünkü bu durum DC barada kısa devreye neden olur. Sonuç olarak, üst anahtar için kapı kontrol sinyalleri, Şekil 5.7'de gösterildiği gibi, alt anahtarlar için olanların tersidir. Şekil 5.8'de gösterildiği gibi darbelerle (PWM1 ve PWM2) gösterilen anahtarların (S1 ve S4) bir ayağı için kapı kontrol darbesi örneği verilmiştir.

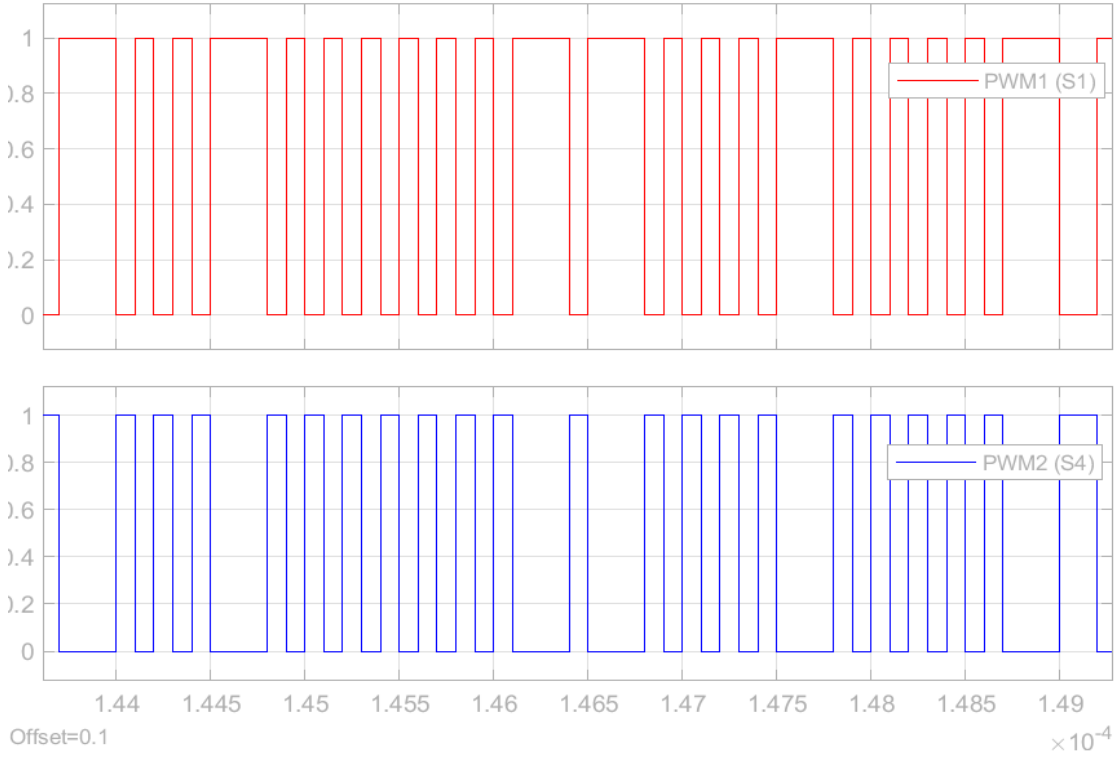


Şekil 5.7. Matlab Simulink'te PWM yöntemi uygulanması

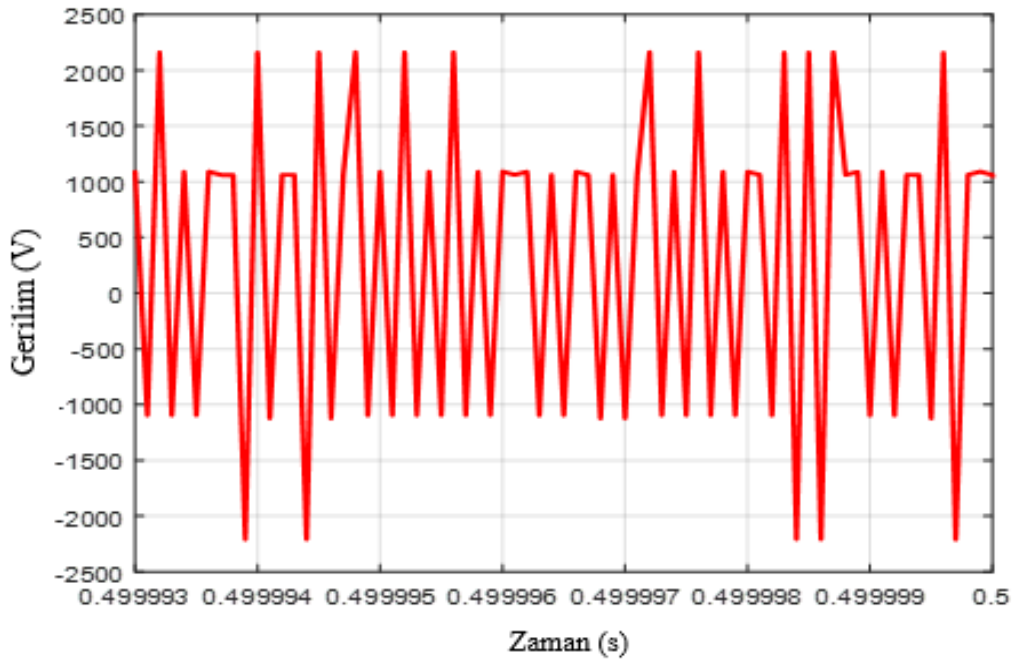
5.1.3. LCL Filtresi

LCL filtresi, izin verilen maksimum akım dalgalanmalarına göre tasarlanmıştır. Bununla indüktans hesabı yapılmaktadır. Kondansatördeki reaktif güce göre kapasite belirlenmiştir. Simülasyonda kapasite değeri aktif güce %5 oranında etki edecek şekilde tasarlandı. IEEE standartlarına göre minimum indüktans değeri için akım dalgalanması şebeke akımının %0.3'ü olarak alınmaktadır. İndüktanstaki gerilim düşümüne göre indüktansın maksimum değeri hesaplanabilir. LCL filtrenin tasarımı aktif güce, gerilime

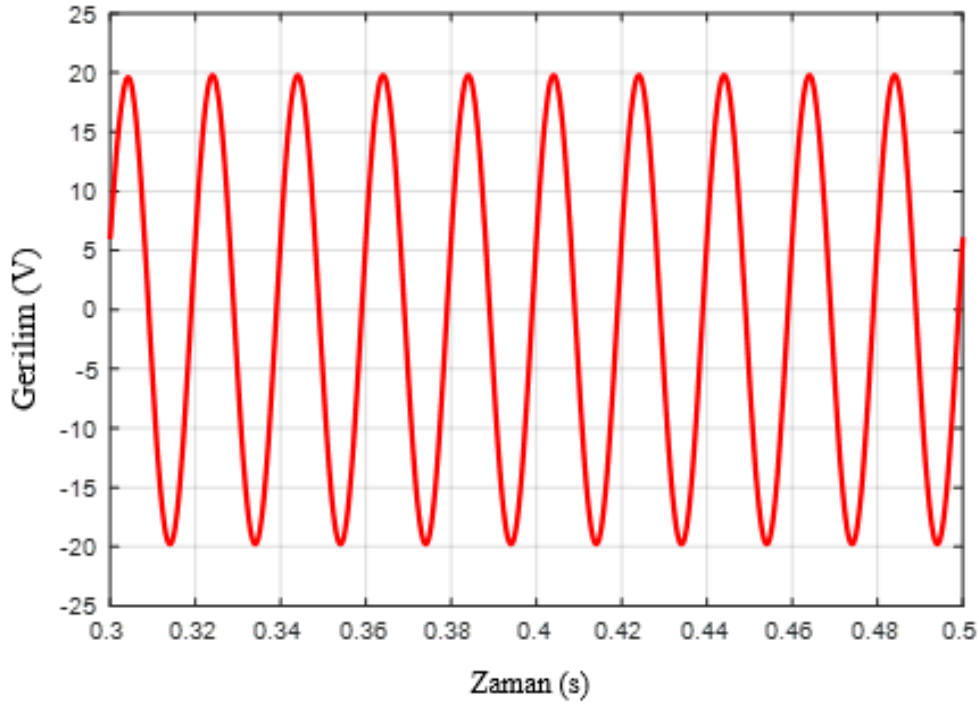
ve şebeke akımına bağlı olduğundan, burada yedek gücü olmayan PV sistemi ve yedek gücü olan PV sistemi için iki farklı LCL filtre değeri hesaplanacaktır. Her iki sistemdeki güçler sırasıyla Ekler tablo 2 ve tablo 3'te gösterildiği gibi farklıdır.



Şekil 5.8. PWM örneği olarak S1 ve S4 için kapı kontrol darbeleri



Şekil 5.9. LCL filtresi öncesi tek fazlı gerilim (evirici tarafı)



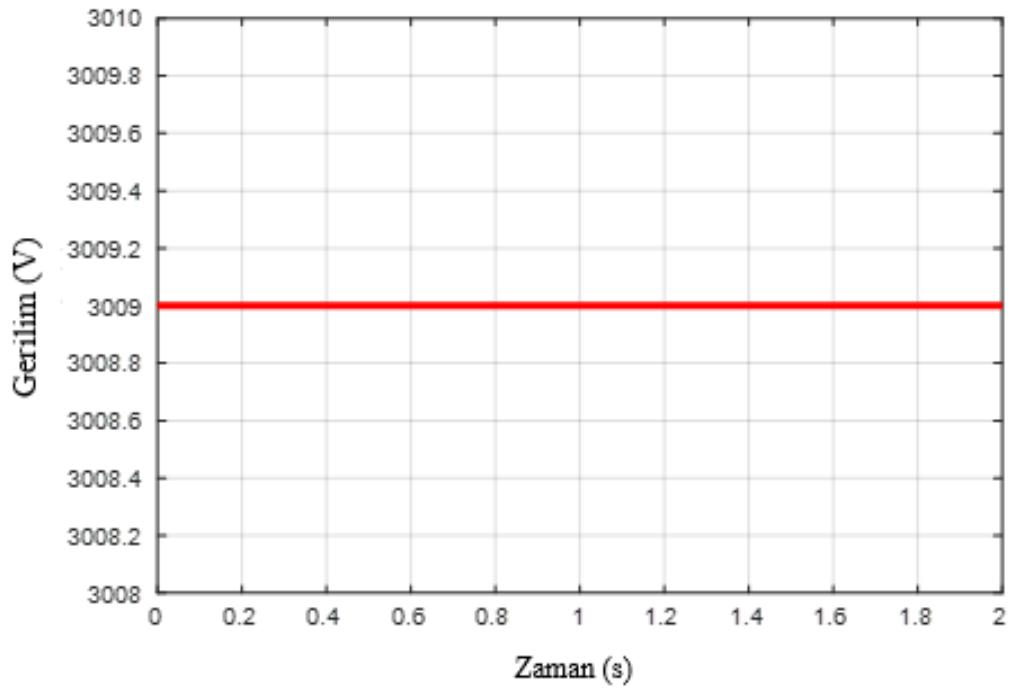
Şekil 5.10. LCL filtresinden sonra tek fazlı gerilim (şebeke tarafı)

LCL filtresinin değerleri Bölüm (4.6.1.)'deki denklemler esas alınarak hesaplanmıştır. LCL filtresinin etkinliğini göstermek için, gerilim harmonik zayıflama değerleri, Şekil (5.9) ve (5.10) sırasıyla filtreden önceki ve sonraki gerilimi göstermektedir.

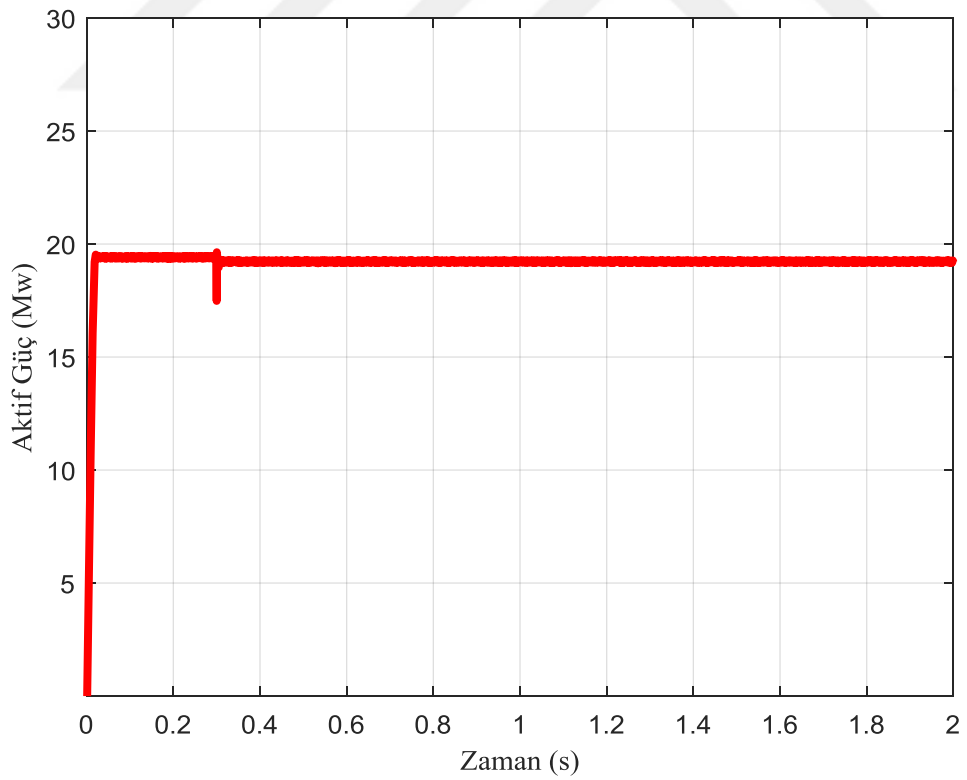
5.2. Bulgular ve Tartışma

5.2.1. Yedek Gücü Olmayan PV Sistemi

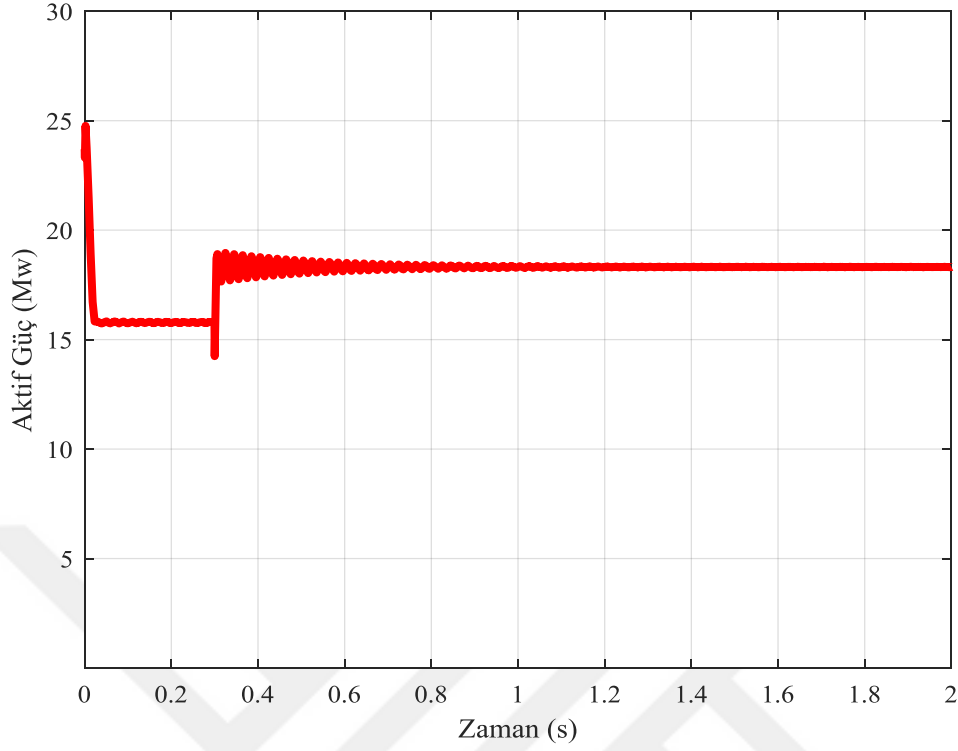
PV sistemi maksimum güç noktasında çalıştığında yedek güç elde edilmeyecektir. Dolayısıyla böyle bir PV sisteminde sistem frekans desteğine de katkı bulunmamaktır. Bunu doğrulamak için her biri 15 MW güce sahip paralel bağlanan iki PV dizisi Matlab'da simüle edilmiştir. Sistem parametrelerinin detayları Eklerdeki Tablo.A2'de görülmektedir. Şekil 5.11'de gösterildiği gibi, PV sistemi MPP'de V_{mpp} çalıştığında, onu MPP'den uzakta çalıştırmak için herhangi bir ek voltaj (ΔV) sağlanmadan (de-loaded olmayan) dış döngü için V_{dc_ref} referans voltajını gösterir. daha önce Şekil 4.3'te verilmiştir. Dolayısıyla, sonuç olarak, Şekil 5.12'de gösterildiği gibi, yeni yük 0.3 saniyede bağlandığında, yedek güce ulaşamadı ve PV sistemi şebekeye destek sağlayamadı. Yeni bağlanan yük için tüm destek, Şekil 5.13'te görülebileceği gibi şebeke (sonsuz bara) tarafından sağlanmaktadır.



Şekil 5.11. De-loaded olmayan PV sistemi için referans voltajı (V_{mpp})



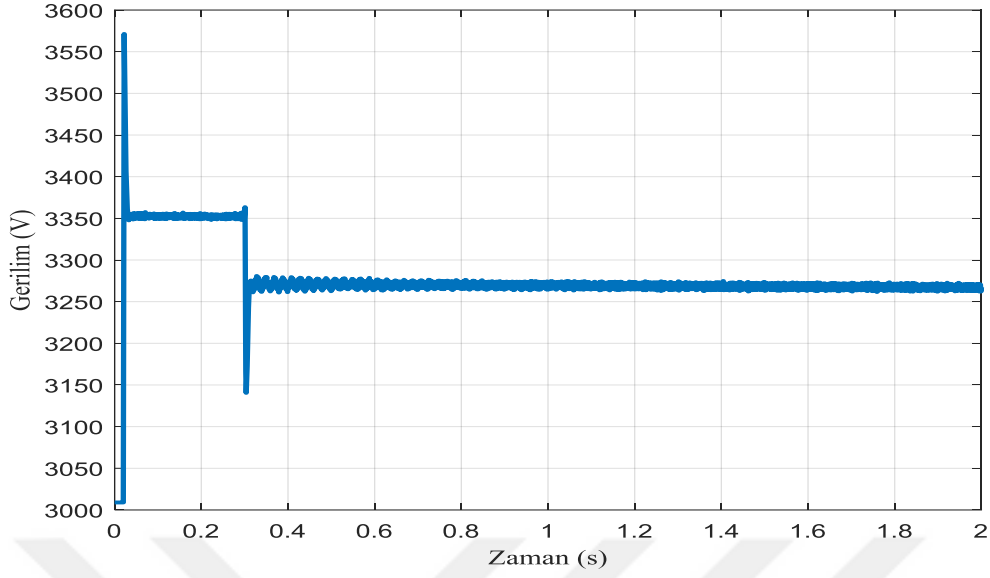
Şekil 5.12. Yedek gücü olmayan PV sisteminden PCC'ye gelen aktif güç (P_{max})



Şekil 5 .13. PV sistemi yedek güç olmadan şebekeden alınan aktif güç

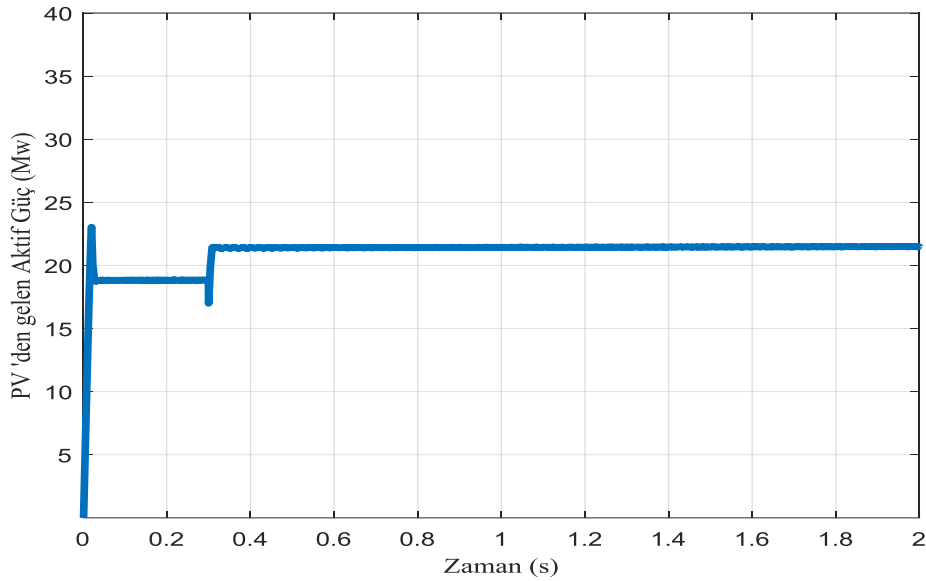
5.2.2. Yedek Güce Sahip PV Sistemi

PV jeneratörlerinin, güçlerinin bir kısmını ayırarak frekans düzenlemesine katılmalarını sağlamak için bir PV de-loaded sistemi uygulandı. Bu amaçla, bu stratejiyi uygulamadan aktif kurulu gücün, sistem gücünden daha büyük olacak şekilde, bir miktar gücü yedek olarak tutacak ve sapma meydana geldiğinde şebekeye verecek şekilde bir PV sistemi tasarlanmıştır. PV jeneratörleri, V_{mpp} değerlerinin %11'i olan de-loading gerilimi ΔV eklenerek MPP çalışma noktasından uzakta çalıştırılmıştır. Böylece PV sistemi, Şekil 5.14'te gösterildiği gibi, bir gerilim değeri olan $V_{mpp} + \Delta V$ değerinde çalışmakta ve dolayısıyla yedek güç elde edilmektedir. Yedek gücün serbest bırakılması, daha önce de belirtildiği gibi, frekans sapmasına bağlıdır. 0.3. saniyede yeni bir yük 4 MW, 1 MVAR değerindeki yük bağlanmasından sonra 0.3. saniyede frekans sapması meydana geldiğinde, PV sistemi, Şekil 5.15'te gösterildiği gibi, şebeke frekansını desteklemek için yedek gücün bir kısmını serbest bırakır.

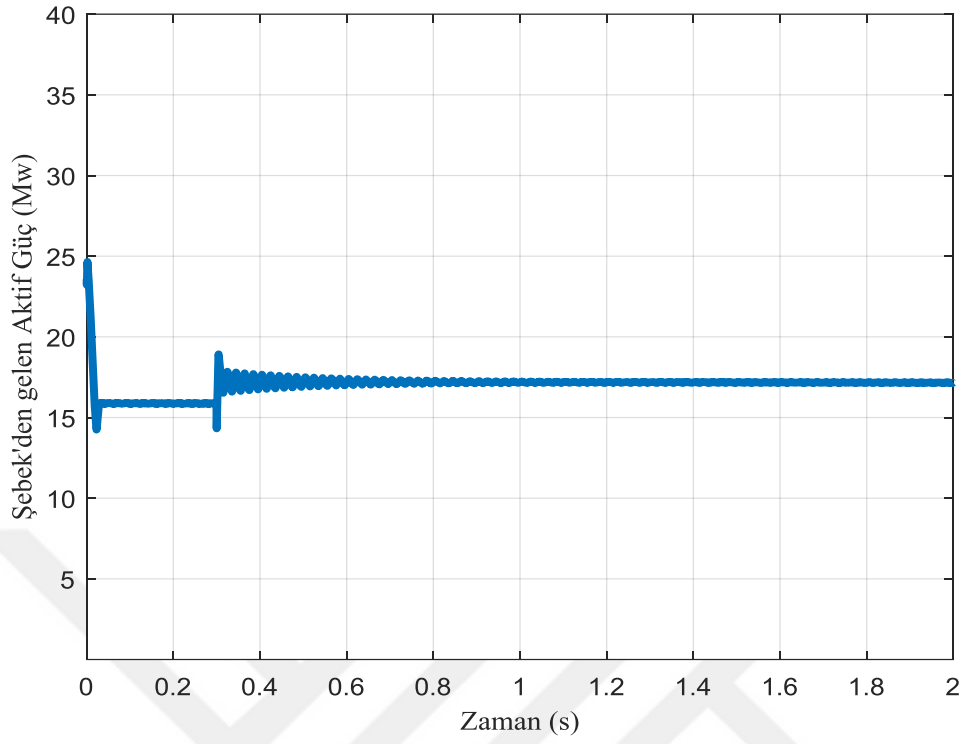


Şekil 5.14. De-loaded PV sistemi için referans gerilimi ($V_{mpp} + \Delta V$)

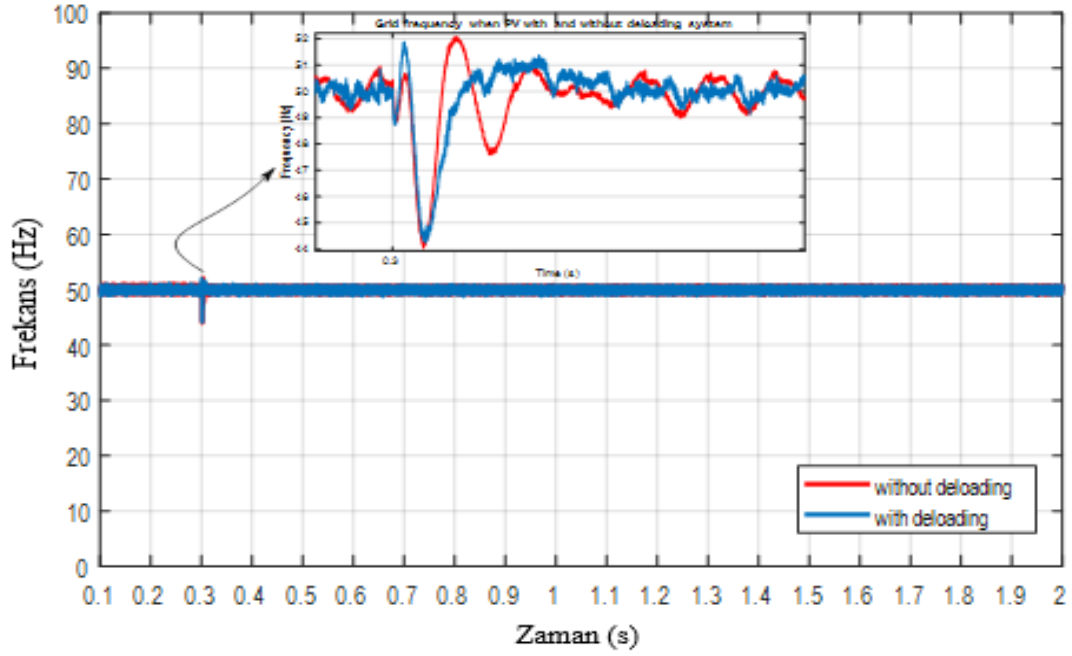
Desteklerin çoğunluğu PV dizileri tarafından sağlanmaktadır. Şekil 5.16'da gösterildiği gibi, sonsuz bara olarak tanımlanabilecek şebeke, daha az güç sağlamaktadır. Şekil 5.17'de gösterildiği gibi, PV de-loading stratejisinin kullanıldığı ve kullanılmadığı sistem için frekans tepkisi karşılaştırması yapılmıştır. PV de-loading kullanıldığında sistem için frekans nominal değerinde bir iyileşme görülmektedir. 0.3 Hz'lik bir fark değeri ile, kullanılan kontrol stratejisinin frekans regülasyonunda etkinliğini doğrular.



Şekil 5.15. Yedek güce sahip PV sisteminden PCC'ye gelen aktif güç



Şekil 5.16. Yedek güce sahip PV sistemi olduğunda şebekeden gelen aktif güç



Şekil 5.17. PV sistemi de-loaded ve de-loaded olmadığında frekans yanıtı

5.3. Sonuçlar ve nerileri

Herhangi bir enerji depolaması kullanılmadan, PV sisteminin aktif gücünün bir kısmını ayırıp gerektiğinde geri kullanarak frekans regülasyonuna katılmasını sağlayacak bir kontrol stratejisi önerilmiştir. Kontrol stratejisi 3 baralı bir g sistemi aracılığıyla doğrulandı. Matlab simülasyon sonuçları, PV sistemini MPP'den uzakta çalıştırdıktan sonra, de-loading gerilimi (ΔV) eklenerek yedek güç elde etmeye yönelik kontrol stratejisinin etkinliği gösterildi. Simülasyon, PV sistemi standart test koşulları altında çalışırken gerçekleştirildi. Sonuçlar nerilen kontrol stratejisinin iyi çalıştığını doğrular özelliklerde olup, sistemin karmaşıklığı nedeniyle sistemde güç kalitesi sorunları yaşandığı ve bunun sonucunda da kurulu gücün tamamı kullanılmadığı söylenebilir. Frekanstaki sapma çok yüksek değerlerdedir. Gelecekteki yapılabilecek araştırma çalışmalarında sistemin daha gerçekçi hale getirilmesi ve daha fazla vakayı incelemek için mevcut maksimum güç tekniği kullanımı önerilmektedir. Önerilen kontrol yöntemi daha iyi frekans düzenleme performansı göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Aghamohammadi, M. R., Abdolahinia, H. (2014). A New Approach For Optimal Sizing Of Battery Energy Storage System For Primary Frequency Control Of Islanded Microgrid. *International Journal Of Electrical Power And Energy Systems*, 54, 325–333. DOI:10.1016/J.Ijpes.2013.07.005
- Ahmed, A. A. A. (2015). Digital Control Techniques For Grid-Connected Inverters. Master Thesis, AIN Shams University, Thebes High Institute Of Engineering, Cairo.
- Andrenacci, N., Chiodo, E., Lauria, D., Mottola, F. (2018). Life Cycle Estimation Of Battery Energy Storage Systems For Primary Frequency Regulation. *Energies*, 11(12). DOI:10.3390/En11123320
- Bao, X., Zhuo, F., Tian, Y., Tan, P. (2013). Simplified Feedback Linearization Control Of Three-Phase Photovoltaic Inverter With An LCL Filter. *IEEE Transactions On Power Electronics*, 28(6), 2739–2752. DOI:10.1109/TPEL.2012.2225076
- Batzelis, E. I., Kampitsis, G. E., Papathanassiou, S. A. (2017). Power Reserves Control For PV Systems With Real-Time MPP Estimation Via Curve Fitting. *IEEE Transactions On Sustainable Energy*, 8(3), 1269–1280. DOI:10.1109/TSTE.2017.2674693
- Beddar, A., Abadlia, I., Abdoune, F., Hassaine, L., Bengourina, M. R. (2023). Investigation And Implementation Of A Nonlinear Decoupled Power Control For A Single-Phase Grid-Connected Power Inverter Via An LCL Filter. *Journal Of Engineering Research*, 11(1), 100010. DOI:10.1016/J.Jer.2023.100010
- Claessens, B., Engels, J., Deconinck, G. (2019). Combined Stochastic Optimization Of Frequency Control And Self-Consumption With A Battery. *IEEE Transactions On Smart Grid*, 10(2), 1971–1981. DOI:10.1109/TSG.2017.2785040
- Datta, M., Ishikawa, H., Naitoh, H., Senjyu, T. (2012). LFC By Coordinated Virtual Inertia Mimicking And Pevs In Power Utility With MW-Class Distributed PV Generation. *2012 IEEE 13th Workshop On Control And Modeling For Power Electronics*, COMPEL 2012. DOI:10.1109/COMPEL.2012.6251779
- Datta, M., Senjyu, T., Yona, A., Funabashi, T., Kim, C. H. (2011). A Frequency-Control Approach By Photovoltaic Generator In A PV-Diesel Hybrid Power System. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 26(2), 559–571. DOI:10.1109/TEC.2010.2089688
- Dehghani-Sanij, A. R., Tharumalingam, E., Dusseault, M. B., Fraser, R. (2019). Study Of Energy Storage Systems And Environmental Challenges Of Batteries. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 104, 192–208. DOI: 10.1016/J.Rser.2019.01.023
- Divya, K. C., Østergaard, J. (2009). Battery Energy Storage Technology For Power Systems-An Overview. *Electric Power Systems Research*, 79(4), 511–520. DOI:10.1016/J.Epsr.2008.09.017

- Elgendy, M. A., Zahawi, B., Atkinson, D. J. (2012). Evaluation Of Perturb And Observe MPPT Algorithm Implementation Techniques. *IET Conference Publications*. DOI:10.1049/Cp.2012.0156
- Fang, J., Li, H., Tang, Y., Blaabjerg, F. (2018). Distributed Power System Virtual Inertia Implemented By Grid-Connected Power Converters. *IEEE Transactions On Power Electronics*, 33(10), 8488–8499. DOI:10.1109/TPEL.2017.2785218
- Ferdous, S. M., Moin Oninda, M. A., Maruf, H., Islam, A., Rahman, F. (2018). Energy Efficiency Constraints In Photovoltaic Power Generation Systems. *Journal Of Research In Engineering And Applied Sciences*, 03(02), 41–47. DOI:10.46565/Jreas.2018.V03i02.001
- Frede Blaabjerg, D. M. Lone. (2017). *Renewable Energy Devices And Systems With Simulations In MATLAB® And ANSYS*. CRC Press.
- Guo, K., Tang, Y., Fang, J. (2019). Exploration Of The Relationship Between Inertia Enhancement And DC-Link Capacitance For Grid-Connected Converters. *2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference, SPEC 2018*, 1–7. DOI:10.1109/SPEC.2018.8635904
- Hairat, M. K., Ghosh, S. (2017). 100 GW Solar Power In India By 2022 – A Critical Review. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 73, 1041–1050. DOI:10.1016/J.Rser.2017.02.012
- Hoffmann, A. G. V. U. (2007). *Photovoltaic Solar Energy Generation* (2nd Ed). China: Springer International Publishing.
- Hoke, A. F., Shirazi, M., Chakraborty, S., Muljadi, E., Maksimovic, D. (2017). Rapid Active Power Control Of Photovoltaic Systems For Grid Frequency Support. *IEEE Journal Of Emerging And Selected Topics In Power Electronics*, 5(3), 1154–1163. DOI:10.1109/JESTPE.2017.2669299
- Hoke, A., Maksimović, D. (2013). Active Power Control Of Photovoltaic Power Systems. *2013 1st IEEE Conference On Technologies For Sustainability, Sustech 2013*, 70–77. DOI:10.1109/Sustech.2013.6617300
- Hu, W. C. Y. (2016). *Renewable Energy - Utilisation And System Integration* (1st Ed.). Croatia: Intech.
- Jami, M., Shafiee, Q., Gholami, M., Bevrani, H. (2020). Control Of A Super-Capacitor Energy Storage System To Mimic Inertia And Transient Response Improvement Of A Direct Current Micro-Grid. *Journal Of Energy Storage*, 32(2). DOI:10.1016/J.Est.2020.101788
- Krauter, S. C. W. (2006). *Solar Electric Power Generation - Photovoltaic Energy Systems* (1st Ed). Heidelberg: Springer.
- L. Ashok Kumar, S. Albert Alexander, M. R. (2021). *Power Electronic Converters For Solar Photovoltaic Systems* (2nd Ed). Elsevier Science.

- Lyu, X., Xu, Z., Zhao, J. (2018). A Coordinated Frequency Control Strategy For Photovoltaic System In Microgrid. *Journal Of International Council On Electrical Engineering*, 8(1), 37–43. DOI:10.1080/22348972.2018.1470295
- Namor, E., Sossan, F., Cherkaoui, R., Paolone, M. (2019). Control Of Battery Storage Systems For The Simultaneous Provision Of Multiple Services. *IEEE Transactions On Smart Grid*, 10(3), 2799–2808. DOI:10.1109/TSG.2018.2810781
- Pearsall, N. (2016). Stand-Alone Photovoltaic Systems. Salas, V. (Ed.), *The Performance Of Photovoltaic (PV) Systems* (1st Ed.) (251-295). Duxford: Woodhead Publishing.
- Rajan, R., Fernandez, F. M. (2019). Power Control Strategy Of Photovoltaic Plants For Frequency Regulation In A Hybrid Power System. *International Journal Of Electrical power and Energy System*, 110, 171–183. DOI:10.1016/J.Ijeps.2019.03.009
- Rajan, R., Fernandez, F. M., Yang, Y. (2021). Primary Frequency Control Techniques For Large-Scale PV-Integrated Power Systems: A Review. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 144. DOI:10.1016/J.Rser.2021.110998
- Ramírez, M., Castellanos, R., Calderón, G., Malik, O. (2018). Placement And Sizing Of Battery Energy Storage For Primary Frequency Control In An Isolated Section Of The Mexican Power System. *Electric Power Systems Research*, 160, 142–150. DOI:10.1016/J.Epsr.2018.02.013
- Ruan, X., Wang Donghua Pan, X., Yang Weiwei Li, D., Bao, C. (2018). *Control Techniques For LCL-Type Grid-Connected Inverters* (1st Ed). Singapre: Springer Nature.
- Sangwongwanich, A., Yang, Y., Blaabjerg, F., Sera, D. (2017). Delta Power Control Strategy For Multistring Grid-Connected PV Inverters. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 53(4), 3862–3870. DOI:10.1109/TIA.2017.2681044
- Sekhar, P. C., Mishra, S. (2016). Storage Free Smart Energy Management For Frequency Control In A Diesel-PV-Fuel Cell-Based Hybrid AC Microgrid. *IEEE Transactions On Neural Networks And Learning Systems*, 27(8), 1657–1671. DOI:10.1109/TNNLS.2015.2428611
- Shazon, M. N. H., Nahid-Al-Masood, Jawad, A. (2022). Frequency Control Challenges And Potential Countermeasures In Future Low-Inertia Power Systems: A Review. *Energy Reports*, 8, 6191–6219. DOI:10.1016/J.Egyr.2022.04.063
- Sumathi, S., Ashok Kumar, L., Surekha, P. (2015). *Solar PV And Wind Energy Conversion Systems: Introduction To Theory, Modeling With MATLAB/SIMULINK, And The Role Of Soft Computing Techniques* (1st Ed.). China: Springer International Publishing.
- Verma, P., Kaur, T., Kaur, R. (2021). Power Control Strategy Of An Integrated PV System For Active Power Reserve Under Dynamic Operating Conditions. *Sustainable Energy Technologies And Assessments*, 45(3).

DOI:10.1016/J.Seta.2021.101066

- Xin, H., Liu, Y., Wang, Z., Gan, D., Yang, T. (2013). A New Frequency Regulation Strategy For Photovoltaic Systems Without Energy Storage. *IEEE Transactions On Sustainable Energy*, 4(4), 985–993. DOI:10.1109/TSTE.2013.2261567
- Zarina, P. P., Mishra, S., Sekhar, P. C. (2014). Exploring Frequency Control Capability Of A PV System In A Hybrid PV-Rotating Machine-Without Storage System. *International Journal Of Electrical Power And Energy Systems*, 60, 258–267. DOI:10.1016/J.Ijepes.2014.02.033
- Zeman, M., Swaaij, R., Isabella, O., Jager, K., Smets, A. (2016). *Solar Energy : The Physics And Engineering Of Photovoltaic Conversion, Technologies And Systems*. UIT Cambridge.
- Zhang, Y., Guo, Q., Zhou, Y., Sun, H. (2023). Frequency-Constrained Unit Commitment For Power Systems With High Renewable Energy Penetration. *International Journal Of Electrical Power And Energy Systems*, 153. DOI:10.1016/J.Ijepes.2023.109274
- Zhao, C., Andersen, P. B., Træholt, C., Hashemi, S. (2023). Grid-Connected Battery Energy Storage System: A Review On Application And Integration. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 182. DOI:10.1016/J.Rser.2023.113400
- Zhong, C., Zhou, Y., Yan, G. (2021). Power Reserve Control With Real-Time Iterative Estimation For PV System Participation In Frequency Regulation. *International Journal Of Electrical Power And Energy Systems*, 124. DOI:10.1016/J.Ijepes.2020.106367



EKLER

EK-A

PV Sisteminin Parametreleri

Tablo A1

PV modülünün parametreleri

Parameter	değer
Maksimum güç (w)	214.858
Açık devre voltajı Voc (V)	36.12
Kısa devre akımı Isc (A)	7.74
Maksimum güç noktasında voltaj Vmp (V)	29.8
Maksimum güç noktasında akım Imp (A)	7.21

Tablo A2

Genel sistemin parametreleri (de-loading stratejisi olmadan)

Parameter	değer
Maksimum güç (Mw)	30
Paralel dizeler	705
Dizi başına seri bağlı modüller	101
PV sistemi maksimum voltajı Vmp (v)	3009
İnvertör Tarafı Endüktansı L1	0.15 μ H
Şebeke Tarafı Endüktansı L2	0.15 μ H
Filtre kapasitansı	39.79mF

Tablo A3

Genel sistemin parametreleri (de-loading stratejisiyle)

Parameter	değer
Maksimum güç (Mw)	40
Paralel dizeler	940
Dizi başına seri bağlı modüller	101
PV sistemi maksimum voltajı Vmp (v)	3009
İnvertör Tarafı Endüktansı L1	0.11 μ H
Şebeke Tarafı Endüktansı L2	0.11 μ H
Filtre kapasitansı	33.95mF

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Abut, N., **Alfaki, O.** (2023). Control Strategy For Reserve Power In Grid Connected Photovoltaic System, *9th International Congress on Innovative Scientific Approaches*, Samsun, Turkey, 17-19 May 2023.



ÖZGEÇMİŞ

Omer Alfaki, Elektrik ve Elektronik alanında lisans derecesini 2014 yılında Sudan'ın Hartum kentindeki Omdurman İslam Üniversitesi'nden aldı. 2015 yılında Sudan'daki Merowe Barajı Elektrik Hidroelektrik Santrali Şirketinde bir yıl çalıştı. Omdurman I.S. 2017 yılından bu yana öğretim asistanı olarak görev yapmaktadır. Yüksek Lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye'de Elektrik Mühendisliği alanında tamamladı. Araştırma alanları arasında güç sistemleri, büyük ölçekli yenilenebilir enerjilerin entegrasyonu, akıllı şebekeler ve sanal senkron makineler yer almaktadır.

