



**GÜNEŞ VE RÜZGAR TABANLI BİR MİKRO ŞEBEKENİN ANALİZİ VE
KONTROLÜ**

Nazar NIHAD ABDULHUSSEIN ALLOLOE

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

NAZAR N.A. ALLOLOE

01 /06 /2023

GÜNEŞ VE RÜZGAR TABANLI BİR MİKROŞEBEKENİN ANALİZİ VE KONTROLÜ

(Yüksek Lisans Tezi)

Nazar NIHAD ABDULHUSSEIN ALLOLOE

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2023

ÖZET

Çevre, fosil yakıt kıtlığı ve ekonomik kaygılar, güneş fotovoltaik (PV), rüzgar türbini (WT), yakıt gibi çeşitli dağıtılmış yenilenebilir enerji tabanlı jeneratörlerden oluşan mikro şebeke (MG) inovasyonuna olan ilgiyi artırdı. hücreler ve enerji depolama sistemleri. MG'lerin çok sayıda avantajı arasında artan güvenilirlik, daha düşük teknik kayıplar, daha düşük karbon emisyonları ve geliştirilmiş birleşik ısı ve güç verimliliği yer alır. Bununla birlikte, bir MG'yi çalıştırmak ve yönetmek, güç kalitesi, voltaj ve frekans değişiklikleri, kararlılık, güç yönetimi ve maliyet etkinliği ile ilgili sınırlamalar dahil olmak üzere bir dizi zorluk içerir. Bu yazıda, MG'nin performansı, PV ve WT kaynakları için farklı verimli maksimum güç noktası takibi (MPPT) kullanılarak iyileştirildi ve MG'nin dinamik tepkisi, lityum piller için enerji yönetim sistemi (EMS) kullanılarak geliştirildi. PV ve WT kaynakları, bir DC/DC boost dönüştürücü aracılığıyla MG'ye bağlanmıştır. PV sisteminin çıkış gücü artımlı iletkenlik (IC MPPT) ile artırılırken, WT değiştir ve gözlemle (P&O) yöntemiyle kontrol edilip iyileştirildi. Akü modülü, DC bara voltajını stabilize eden ve referansı (800 V) ile izlenmesini sağlayan çift yönlü bir DC/DC dönüştürücü üzerinden orantılı-integral (PI) yöntemine dayalı EMS tarafından kontrol edildi. Simülasyon sonuçları, önerilen MG'nin çıkış akımı THD ve DC bara voltajı regülasyonu açısından iyi bir verimliliğe sahip olduğunu göstermektedir.

Bilim Kodu : 93008
Anahtar Kelimeler : Mikro şebeke, Lityum-iyon batarya, PV, rüzgar türbini, MPPT, enerji yönetimi
Sayfa Adedi : 66
Danışman : Prof. Dr. Necmi ALTIN

ANALYSIS AND CONTROL OF A SOLAR AND WIND BASED MICRO GRID

(M. Sc. Thesis)

Nazar NIHAD ABDULHUSSEIN ALLOLOE

GAZI UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2023

ABSTRACT

Concerns about the environment, the shortage of fossil fuels, and economic considerations have increased interest in microgrid (MG) innovation, which consists of a variety of distributed renewable energy-based generators like solar photovoltaic (PV), wind turbine (WT), fuel cells, and energy storage systems. Numerous benefits of MGs include increased dependability, lower technical losses, lower carbon emissions, and improved combined heat and power efficiency. However, operating and managing a MG involves a number of challenges, including limitations with power quality, voltage and frequency changes, stability, power management, and cost-effectiveness. In this paper, the MG's performance was improved using different efficient maximum power point tracking (MPPT) for the PV and WT sources and the dynamic response of the MG was enhanced using energy management system (EMS) for lithium batteries. The PV and WT sources have been connected to the MG via a DC/DC boost converter. The output power of the PV system was increased by incremental conductance (IC MPPT) while the WT was controlled and improved by perturb and observe (P&O) method. The battery module was controlled by EMS based on proportional-integral (PI) method across a bidirectional DC/DC converter which is stabilized the DC bus voltage and makes it tracked with its reference (800 V). The simulation results show that the suggested MG has good efficiency in terms of output current THD and DC bus voltage regulation.

Science Code : 93008

Key Words : Microgrid, Lithium-ion battery, PV, wind turbine, MPPT, energy management

Page Number : 66

Supervisor : Prof. Dr. Necmi ALTIN

TEŞEKKÜR

Her zaman yanımda olan aileme teşekkürü bir borç bilirim. Maddi ve manevi tüm desteklerini benden esirgemedi, tecrübelerini büyük bir zevkle benimle paylaşan, çalışmanın gerçekleştirilmesi süresince zamanını, bilgilerini ve çalışmaların yürütülmesi esnasında sabır, hoşgörü ve emeğini benden esirgemeyen saygıdeğer danışmanım sayın Prof. Dr. Necmi ALTIN'a sonsuz teşekkür eder saygılarımı sunarım. Yüksek Lisans eğitimi boyunca bilgi ve tecrübelerini bizlerle paylaşan Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölüm Başkanlığında görev yapan öğretim üyelerine teşekkür ederim. Çalışmalarına ve sorularına sıkılmadan yardım eden ve cevap veren sayın Prof. Dr. ŞABAN ÖZDEMİR'e sayın Arş. Gör. Çağdaş HİSAR'a ve sayın Öğr. Gör. Süleyman Emre EYİMAYA en içten dileklerle teşekkür ederim. Türkiye'ye, halkına, Gazi Üniversitesi'ne ve yönetimine tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	iv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. MİKRO ŞEBEKELER.....	7
2.1. Mikro Şebeke Çeşitleri.....	10
2.1.1. AA mikro şebekeler	10
2.1.2. DA mikro şebekeler	11
2.1.3. Hibrit mikro şebekeler	13
2.2. Mikro Şebekelerde Kontrol	13
3. MİKRO ŞEBEKE BİLEŞENLERİ	15
3.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	15
3.1.1. Rüzgar türbini.....	16
3.1.2. Güneş panelleri.....	20
3.2. Yükler.....	26
3.3. Enerji Depolama Sistemi.....	27
3.4. Senkron Generatör	30
3.5. Ortak Bağlantı Noktası (PCC).....	33
4. ÖNERİLEN MİKRO ŞEBEKE MODELİ.....	35
4.1. PV Sistem Modeli	35

	Sayfa
4.1.1. Fotovoltaik sisteminin MPPT'si	36
4.2. Rüzgar Türbini Modeli.....	38
4.3. Li-ion Batarya Modeli.....	41
4.4. Şebeke Bağlantılı Evirici.....	42
5. BENZETİM SONUÇLARI.....	47
5.1. Sabit Güneş Işınım Koşulları ve Rüzgar Hızı Koşulu İçin Tasarlanan Sistemin Performansı	47
5.2. Tasarlanan Sistemin Değişken Güneş Işınımı Koşulları ve Rüzgar Hızı Koşullarındaki Performansı	51
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR	59
EKLER	65
ÖZGEÇMİŞ	66

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. DA-DA boost dönüştürücü parametreleri.....	40



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Yenilenebilir enerji kaynakları.....	2
Şekil 2.1. Mikro şebeke sistemi	8
Şekil 2.2. Mikro şebeke çeşitleri.....	10
Şekil 2.3. AA mikro şebeke	11
Şekil 2.4. DA mikro şebeke.....	12
Şekil 2.5. Hibrit mikro şebeke	12
Şekil 3.1. Rüzgar Türbini	17
Şekil 3.2. Rüzgar türbini bileşenleri.....	18
Şekil 3.3. Rüzgar generatörü topolojileri (a) SCIG (b) DFIG (c) PMSG.	20
Şekil 3.4. Fotovoltaik paneller	21
Şekil 3.5. Güneş panellerinin çalışma prensibi.....	22
Şekil 3.6. Solar PV hücresinin eşdeğer devresi	23
Şekil 3.7. Farklı sıcaklık değerlerinde modülün I - V ve P - V karakteristikleri	24
Şekil 3.8. Bir şarj denetleyicisinin MPPT'li ve MPPT'siz çalışma durumu	25
Şekil 3.9. Popüler MPPT algoritmaları	26
Şekil 3.10. Yüklerin Sınıflandırılması.....	27
Şekil 3.11. Elektrik şebekelerinde enerji depolama sistemlerinin kullanımı	28
Şekil 3.12. Enerji depolama teknolojileri	29
Şekil 3.13. Batarya enerji depolama sistemi.....	29
Şekil 3.14. Senkron jeneratör.....	30
Şekil 3.15. Senkron generatörde silindirik kutuplu ve çıkık kutuplu rotor yapıları	31
Şekil 4.1. Önerilen mikro şebeke modeli	35
Şekil 4.2. IC MPPT denetleyicisi ile önerilen PV sistemi.....	37
Şekil 4.3. IC MPPT yönteminin akış şeması.	37
Şekil 4.4. Modellenen rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi.....	39

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. Rüzgar türbini sistemi için güç dönüştürücü arabirimi ve MPPT	39
Şekil 4.6. Tezde kullanılan P&O algoritmasının akış şeması.....	40
Şekil 4.7. Enerji depolama sisteminin modeli	41
Şekil 4.8. Evirici modeli.....	43
Şekil 4.9. L filtre	44
Şekil 4.10. LC filtre.....	45
Şekil 4.11. Bağlı üç fazlı şebeke için bir LCL filtresinin yapısı.....	45
Şekil 4.12. LLCL filtre	46
Şekil 5.1. Mikro şebeke simülasyon modeli.....	47
Şekil 5.2. KC200GT PV modülünün P-V ve I-V eğrileri	48
Şekil 5.3. STC koşullarında fotovoltaiik sisteminin benzetim sonuçları	48
Şekil 5.4. Sabit hava koşullarında evirici çıkış akımı ve şebeke gerilimi	49
Şekil 5.5. Akımın THD seviyesi	49
Şekil 5.6. DA bara gerilimi.....	50
Şekil 5.7. Enerji depolama birimi, fotovoltaiik sistem, rüzgar türbini ve şebekeye aktarılan güç eğrileri	51
Şekil 5.8. Güneş ışıınımı değişiminin fotovoltaiik sisteme etkileri	52
Şekil 5.9. Farklı ışıınım MPPT performansı incelenmek	53
Şekil 5.10. Rüzgar Hızı Değişimi ile Rüzgar Türbini Çıkış Gücü Değişimi	53
Şekil 5.11. Değişken hava koşulları için şebeke gerilimi ve şebekeye aktarılan akım grafiği.....	54
Şekil 5.12. Farklı çalışma koşulları için DA bara gerilimi	54
Şekil 5.13. Bataryanın şarj ve deşarj durumu.	55
Şekil 5.14. Değişken hava koşulları için üç fazlı şebeke gerilimi ve şebekeye aktarılan akımlar.....	55
Şekil 5.15. ESS, PV, WT ve şebeke'nin çıkış gücü değişimleri.....	56

SİMGELER VE KISALTMALAR

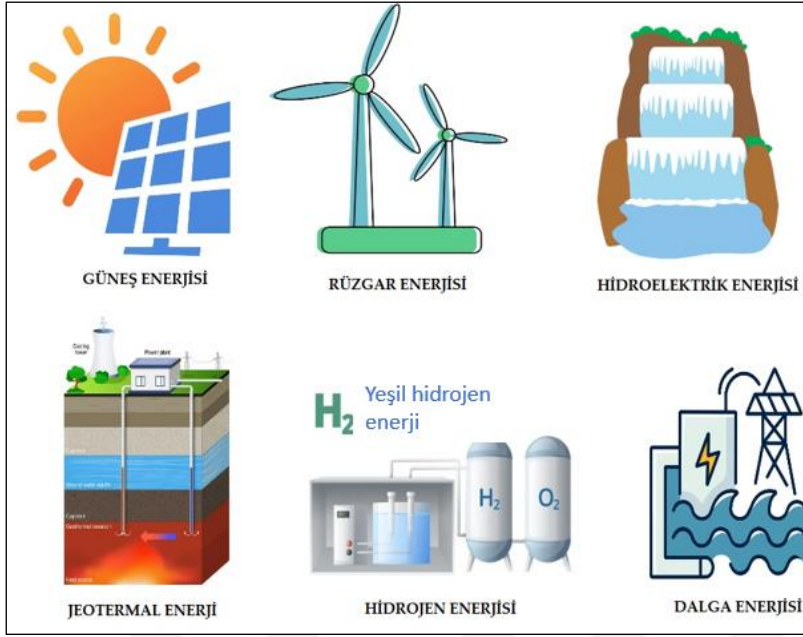
Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamalarıyla bilirlkte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklamalar
AI	Artımlı iletkenlik
AKE	Akım kaynaklı evirici
AOİA	Ağırlıklı ortalama indüktör akımı
BEDS	Batarya Enerji Depolama Sistemi
ÇBSG	Çift Beslemeli senkron generatörü
D&G	Değiştir ve gözle
DGM	Darbe genişlik modülasyonu
DÜ	Dağıtılmış üretim
EDS	Enerji depolama sistemi
FKD	Faz kilitleme döngüsü
GKE	Gerilim kaynaklı evirici
KMSG	Kalıcı Mıknatıslı Senkron generatör
MDGY	Modül Düzeyinde Güç Yönetimi
MGNİ	Maksimum Güç Noktası İzleme
MMŞD	Merkezi mikro şebeke denetleyicisi
MŞ	Mikro şebeke MG
OBN	Ortak bağlantı Noktası
OİT	Oransal, İntegral, Türevsel
SAA	Sıfır akımda anahtarlama
SAT	Sinir Ağı Tahmincisi
SK	Süper kapasitörler
SKSG	Sincap Kafesli senkron generatör
SKS-MÖK	Sonlu kontrol setli model öngörülü kontrol
ŞD	Şarj Durumu
YH	Yakıt hücresi

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi üretiminde yaygın biçimde kullanılan fosil yakıtlar sınırlı bir enerji kaynağı olmasına rağmen günümüzde elektrik enerjisi tüketimi gün geçtikçe artmaktadır. Bununla beraber fosil yakıtlar, çevre üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle solunum sistemi hastalıkları, kanser ve cilt hastalıkları gibi insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Aynı zamanda bu kaynakların, ithalat ve dış bağımlılığı artırması gibi ekonomik zararları, hava kirliliği, küresel ısınma ve iklim değişikliğine sebep olma, kuraklık, su kaynakların kirlenmesi gibi çevresel zararları da bulunmaktadır. Türkiye’de fosil kaynaklar yeterli miktarda bulunmamaktadır. Ekonomik ve endüstriyel büyüme ile birlikte artan enerji talebinin, yerel kaynaklar yerine ağırlıklı olarak doğalgaz gibi dış kaynaklardan karşılanması; enerji arz güvenliği sorununun sürekli olarak gündemde kalmasına neden olmaktadır. Türkiye’de enerji arzının sorunsuz bir şekilde sağlanabilmesi için, yerel ve doğal kaynakların enerji üretiminde daha verimli kullanılması gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları gibi yerel ve doğal kaynakların enerji üretiminde daha fazla kullanılmasının ülke ekonomisi için çok önemlidir. Son yıllarda güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından yapılan elektrik enerjisi üretimi artmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları, tükenmeyen, her zaman doğada bulunan sürekli bir enerji sağlamaktadır. Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidroelektrik enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji, hidrojen enerjisi, dalga enerjisi, gelgit enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları Şekil 1.1’de görülmektedir.



Şekil 1.1. Yenilenebilir enerji kaynakları

Güneş enerjisi ve ışımasını kullanarak elektrik enerjisi üretmek için kullanılan güneş panelleri, yenilenebilir enerji sistemlerindendir. Güneş panelleri kurulum maliyetlerinin giderek azalması ile birlikte kullanımı giderek artmaktadır. Ayrıca, güneş enerjisinin kullanım alanları çok çeşitlidir ve her geçen gün genişlemektedir. Rüzgar enerjisi, güneş ışınlarının geliş açılarındaki değişikliklerden ve gezegenin dönüşünden kaynaklanan rüzgarların dünyaya uyguladığı basınçtan ortaya çıkan bir enerji şeklidir. Yenilenebilir enerjinin sistemlerinden olan rüzgâr türbinleri tarafından bu rüzgâr enerjisi kullanılarak elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmektedir. Jeotermal enerji, jeotermal kaynakların bulunduğu alanlarda doğrudan veya dolaylı olarak elde edilebilen bir enerji türüdür. Turizm endüstrisi, ısıtma ve soğutma ve maden geliştirme dahil olmak üzere çeşitli hedeflere odaklanan bu enerji türünden yararlanılarak elektrik enerjisi de elde etmek mümkündür.

Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) tarafından Ocak 2022’de yayınlanan Kurulu Güç Raporu’na göre Türkiye’de toplamda 99734 MW kurulu elektrik gücü bulunmaktadır. TEİAŞ’ın verilerine göre kurulu gücün en büyük kısmını 25305,3 MW ile doğal gaz santralleri, 23280,3 MW ile hidroelektrik santraller, 10142,5 MW ile linyit santralleri, 8993,8 MW kurulu ithal kömür santralleri oluşturmaktadır. Ayrıca, kurulu gücün 7881,1 MW’ının güneş santralleri ve 10682,8 MW’ının rüzgâr türbinlerinden sağlandığı

belirtilmektedir [1]. Bu durum kurulu güçte yenilenebilir enerji kaynaklarının önemli bir payının olduğunu göstermektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtların aksine sonsuz bir enerji kaynağı olmaları ve çevre kirliliğine neden olmamaları nedeniyle ilgi görmektedir. Ancak, hava olayları ve iklim koşulları gibi sürekli değişen koşullar nedeniyle yenilenebilir enerji sistemlerinde üretilen enerji değişken olmaktadır. Bundan dolayı bu kaynakların yer aldıkları sistemlerde, birden fazla kaynağın bir arada kullanılması enerji sürekliliği açısından daha uygundur. Birden fazla yenilenebilir enerji kaynağının bir arada kullanıldığı sistemler, hibrit sistemler olarak adlandırılmaktadır. Birbirini tamamlayan yenilenebilir enerji kaynaklarının bir arada kullanılması ile enerji sürekliliği ve enerji üretiminde verimlilik artışı elde edilebilir.

Hibrit sistemler, güneş ve rüzgâr, güneş ve dizel jeneratör, rüzgâr ve dizel jeneratör veya güneş, rüzgâr ve dizel jeneratör sistemleri gibi birden fazla enerji kaynağı türü ile yapılmaktadır. Yaz aylarında güneş ışıınımı fazla olduğu için güneş panellerinden daha fazla enerji edebilecekken, rüzgar hızı düşük olduğundan rüzgar türbininden elde edilebilecek enerji azalmaktadır. Aksine, kış mevsiminde ise rüzgar hızları yüksek ve güneş ışıınımı azdır. Mevsimsel değişiklik gösteren bu doğal değişkenler gün içerisinde bile değişkenlik gösterebilmektedirler. Bu sebepten dolayı birden fazla kaynağı bir arada kullanarak hibrit sistemler oluşturulmakta, günün ve yılın çeşitli zamanlarında o günkü doğal şartların durumundan bağımsız biçimde enerji sistemi daha verimli ve kararlı hale getirilmektedir. Böylece, sistemin sürekli enerji üretme kabiliyeti garanti edilmektedir. Hibrit uygulamalarda sistemin kesintiye uğramaması için, güneş panelleri, rüzgar türbnini dışında dizel enerji kaynakları ve enerji depolama sistemleri de sisteme dahil edilmektedir.

Enerji depolama kavramı tarihte her zaman üzerinde çalışılan bir konu olmuştur, enerji depolama teknolojisi konusunda önemli araştırmalar halen yürütülmektedir. Bu araştırmalarda öne çıkan konulardan biri de batarya teknolojileridir. Günümüzde bataryaların güç sistemi uygulamaları için bir tür enerji depolama sistemi olarak kullanımı, bir çalışma ve uygulama alanı olarak popülerlik kazanmıştır. Bu sistemler, Batarya Enerji Depolama Sistemi (BEDS) olarak isimlendirilmektedir. BEDS, yenilenebilir kaynakların üretimini kontrol etmesi ve depolaması, mikro şebekeler için ekstra rezerv sağlanması, şebeke hizmetleri için frekansın kontrol edilmesi ve arz/talep dengesinin sağlanması gibi bir dizi avantajları bulunmaktadır. BEDS teknolojisi yenilenebilir enerji sistemlerinin yanı sıra,

elektrikli araçlar, elektrikli ulaşım sistemleri, elektronik cihazlar, test ve analiz cihazları, sağlık alanında hayati öneme sahip operasyonel cihazlar, ulusal enerji ağı, enerji güvenliği ve güvenilirliği, hava ve deniz araçları ve savunma sanayii olmak üzere yaşamın her alanında kullanılmaktadır.

Yenilenebilir enerji sistemlerinde BEDS'ler yüke sağlanan enerjinin hem güvenilirliğinin artırılması ve hem de kalitesinin artırılması için sıkça kullanılmaktadır. Rüzgar hızı ve güneş ışımasını doğal değişkenler olduğundan dolayı arz ve talep dengesi sürekli sağlanamamakta, ayrıca gerilim ve frekans dalgalanmaları meydana gelerek sistemin güç kalitesini azaltmaktadır. Buna bir çözüm olarak BEDS sisteme dahil edilmektedir. Fotovoltaik (PV) modüller ve rüzgar türbini sistemlerine BEDS entegre etmenin de çeşitli zorlukları vardır. Enerji yoğunluğu, şarj verimliliği, deşarj derinliği, çevrim ömrü ve şarj durumu gibi birkaç teknik faktör dikkate alınmalıdır. Sistemlerde kullanılacak bataryaların teknik özelliklerinin yanı sıra uyumluluğunun da dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Enerji depolama uygulamalarında farklı batarya türleri kullanılmaktadır. Bu batarya türleri arasında kurşun asit bataryalar, nikel kadmiyum bataryalar, nikel metal hidrit bataryalar, lityum iyon bataryalar ve akış bataryaları bulunmaktadır.

Mikro şebekeler, şebekeden bağımsız ya da şebekeye bağlı olarak işletilebilen, kendi enerji kaynakları, üretim bileşenleri ve yükleri olan belirli sınırlara sahip küçük ölçekli enerji şebekeleridir. Mikro şebekeler yerinde üretim ile şebekeden bağımsız bölgelerde enerji arzı sağlamak, bölgeler arası iletim kayıplarını azaltmak, arızaları anında tespit ederek hizmet kalitesini artırmak, talep yönetimini destekleyerek kaynakları verimli kullanmak, daha fazla yerli kaynağı devreye almak ve daha dayanıklı ve dinamik bir şebekeye sahip olmak gibi avantajlar sunmaktadır. Mikro şebekelere ilişkin sistem bileşenleri arasında, yenilenebilir enerji sistemleri, enerji depolama sistemleri, ölçüm ve kontrol sistemleri, şebeke bağlantı sistemleri, güç dönüştürücüleri, batarya yönetim sistemleri, akıllı aydınlatma sistemleri, elektrikli araç şarj sistemleri, akıllı ev/bina sistemleri, enerji yönetim sistemleri, haberleşme ve bilgi güvenliği sistemleri ve gaz veya sıvı yakıtlı motor/generatör setleri yer almaktadır.

Mikro şebekelerin oluşturulması ve geliştirilmesi için birçok tasarım içeren farklı çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, mikro şebekelerde şebeke bağlantılı eviricilere dayalı farklı çalışmalar önerilmiştir [2, 3, 4]. Her bir güç kaynağının bir mikro şebeke sisteminde şebekeden bağımsız veya şebekeyle birlikte çalışması için uygun zamanın belirlenmesine

yardımcı olan gerçek zamanlı bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, her bir güç kaynağının çalışma sürelerini düzenlemek ve kontrol etmek amaçlanmıştır [5]. Bir mikro şebeke tasarımında, PV, rüzgâr türbini gücü, yakıt hücresi (FC) ve süper kapasitörler (SC) dahil olmak üzere birçok yenilenebilir kaynak ve enerji depolama birimi kullanılmaktadır. Bir enerji depolama sistemi, FC ve PV'den oluşan mikro şebeke sistemi önerilen çalışmada optimal gerçek gücü şebekeyle paylaşmak için bir model öngörülü kontrol kullanılmıştır [6]. Bir diğer çalışmada ise şebeke bağlantılı bir PV sistem için flyback evirici önerilmiştir. Flyback eviricinin ana anahtarı için sıfır akım anahtarlama (ZCS) özelliği sunulmuş ve bu anahtar, kapanma zamanında ani gerilim dalgalanmalarından korunmuştur [7]. PV uygulamaları için yüksek güç yoğunluğu kullanan şebeke bağlantılı bir evirici sunulan çalışmada önerilen evirici iki aşamalı olarak tasarlanmıştır; ilk aşama, bir izoleli rezonans DA-DA dönüştürücü ile temsil edilirken, diğer aşama bir akım kaynaklı evirici (CSI) ile temsil edilmiştir. Giriş gerilim dalgalanması azaltılarak, kararlı bir rezonans akımı sağlanmıştır [8]. Başka bir çalışmada, bir rüzgar türbini ve bir batarya sisteminden oluşan şebekeye bağlı bir hibrit sisteminin benzetimi yapılmış ve çeşitli değişken koşullar altında gerilim ve frekans kararlılığı ile şebeke ve sistem senkronizasyonu gibi önemli konular araştırılmıştır [9].

Enerji sürekliliği ile ilgili sorunları önlemek için hibrit sistemin önemini vurgulayan bir araştırmada, kurulum maliyeti, sistemlerin güçlü ve zayıf yönleri gibi birçok kriter üzerine çalışma sunulmuştur [10]. Güç dalgalanmasını azaltarak bir PV sisteminin verimliliğini artırmak için geliştirilmiş bir PI koordineli Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) algoritması oluşturulmuştur. Burada, hızlı bir MPPT performansı sağlamak için bir DA-DA yükseltici dönüştürücünün anahtarlama oranını yönetmek için artan iletkenlik (INC) yöntemi kullanılmıştır. Bir PV sistem için yeni bir MPPT yönteminin MATLAB/Simulink'te tasarımı öneren bir diğer çalışmada, Sinir Ağı Tahmincisi (NNE), bir dönüşüm katsayısı ve ideal anahtarlama oranı uygulanan yaklaşım geliştirilmiştir. Çalışmada bir dizi sıcaklık değeri üzerinden standart açık devre geriliminin her bir güneş ışıyım seviyesine karşılık gelen açık devre gerilimine oranı belirlenmektedir. Her bir güneş ışıyım seviyesi için açık devre geriliminden maksimum güce karşılık gelen gerilimi tahmin etmek için bir dönüşüm katsayısı hesaplanmıştır. İdeal anahtarlama oranı daha sonra boost dönüştürücünün giriş/çıkış gerilim kazanç denklemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu denetleyicinin, PV'nin maksimum gücünün yaklaşık %99'unu elde etme kapasitesine sahip olduğu gösterilmiştir [11].

Son yıllarda, hızlı dinamik tepki, modülatörsüz ve çoklu kısıtlanmalı kontrol nedeniyle, sonlu kontrol setli model öngörülü kontrol (FCS-MPC) güç dönüştürücülerde yaygın olarak kullanılmaktadır. LCL filtre kullanılan şebeke bağlantılı eviriciler için yeni bir FCS-MPC algoritması önerilen bir çalışmada, LCL filtre modelini geliştirmek için ağırlıklı ortalama bobin akımı (WAIC) algoritmasından yararlanılmıştır [12].

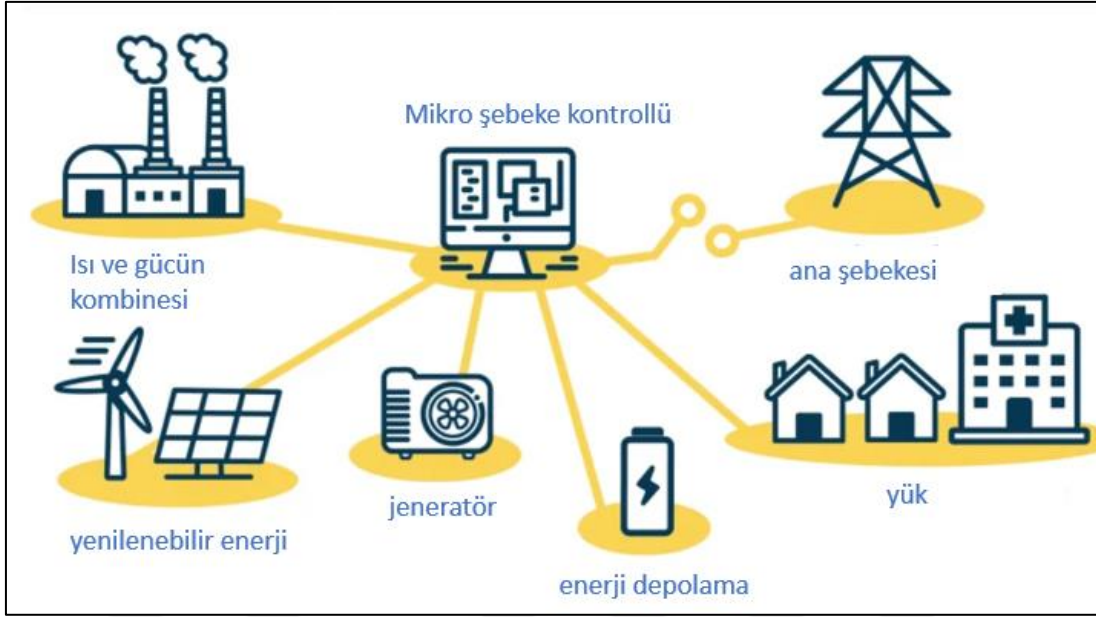
Bu tez çalışmasında, bir mikro şebeke sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan mikro şebeke sistemi PV, rüzgar türbini ve lityum iyon bataryadan oluşmaktadır. Rüzgar türbininde kalıcı mıknatıslı senkron generatör (PMSG) kullanılmıştır. Sistemde bulunan, PV ve rüzgar türbini DA/DA boost dönüştürücü devresi aracılığıyla ortak DA baraya bağlanmaktadır. Tasarlanan sistemdeki güneş panelleri ve rüzgar türbininde INC yöntemi kullanılarak, maksimum güç noktasının takip edilmesi amaçlanmıştır. Enerji yönetim sistemi de mikro şebekeye dahil edilerek mikro şebekenin performansı artırılmıştır. Ayrıca, batarya sistemi, çift yönlü DA/DA dönüştürücü ile ve PI denetleyici kullanılarak kontrol edilmiştir. Kontrol sistemi tasarlanarak sistemin güç kalitesi iyileştirilmektedir. Ortak DA bara şebeke bağlantılı bir gerilim kaynaklı evirici (VSI) ile şebekeye bağlanmıştır. Şebeke bağlantılı VSI kontrolünde durağan referans düzleminde PI denetleyici kullanılmıştır. Sistemden şebekeye aktarılan akımın şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekansta olması için evirici referans akımı hesabında faz kilitleme döngüden yararlanılmıştır. Sonuç olarak şebekeye birim güç faktöründe ve sinüs dalga şeklinde akımları aktarılmıştır. Ayrıca batarya ve enerji yönetim sistemi sayesinde tasarlanan sistemde enerjinin sürekliliği sağlanmıştır.

Tezde, ilk olarak mikro şebeke kavramı ve bileşenleri tanıtılacaktır. Daha sonra dağıtılmış üretim kaynakları; fotovoltaik sistemler, rüzgar türbinleri, senkron generatörler açıklanacaktır. Ayrıca, enerji depolama sistemleri ve mikro şebekedeki ortak bağlantı noktası ile yükler anlatılacaktır. Son olarak önerilen mikro şebeke modeli ve modelin benzetim sonuçları sunulacak ve elde edilen sonuçlar açıklanacaktır.

2. MİKRO ŞEBEKELER

Artan enerji talebi ve sera gazı emisyonları ışığında, tüm ülkeler sera gazı emisyonlarının azaltılması, iyileştirilmiş enerji verimliliği ve artırılmış temiz enerji üretimi için çalışmalar gerçekleştirmekte ve hedefler belirlemektedir. Bu, verimli yenilenebilir güç sağlayan ve güç sistemi boyunca dağılmış olan dağıtılmış üretim (DÜ) teknolojilerinin daha fazla uygulanmasına yol açmaktadır. Yakın zamana kadar, DÜ üniteleri birbirine bağlı olmamakla beraber, birincil enerji kaynağından ziyade yalnızca bir yedek olarak görülmekteydi [14]. Ayrıca, yenilenebilir enerji üretiminin kesintili olması, ana elektrik şebekesindeki gücün dengelenmesini zorlaştırmaktadır. Bu dağıtılmış enerji kaynaklarının mikro şebekelere entegrasyonu, bu hedeflere ulaşmada ve elektrik şebekesindeki gücün dengelenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bir mikro şebeke, birbirine bağlı yenilenebilir ve geleneksel enerji kaynaklarından, enerji yönetim sistemleri ile depolamadan oluşan küçük ölçekli, ayrı bir elektrik sistemidir. Bir mikro şebeke örneği Şekil 2.1’de sunulmuştur. Şebeke bağlantısız (ada modu) ve şebeke bağlantılı mikro şebekeler bulunmaktadır. Yerel tüketicilerin elektrik ihtiyaçlarının bir kısmını veya tamamını kendi güç kaynaklarının üretimi ve kullanımı yoluyla karşılama potansiyeline sahip olduğu, ancak yine de ana elektrik şebekesine bağlı olduğu yapılar şebeke bağlantılı mikro şebeke yapılarıdır. Ada modunda çalışmakta olan mikro şebeke, ana dağıtım şebekesine bağlanmadan bağımsız olarak çalışabilmektedir. Bu tür, yerinde enerji üretimi ve yönetimi, hem talebi azaltarak hem de enerji kaynaklarını ve depolamayı son kullanıcının yakınında yerel olarak uygulayarak ve daha fazla entegre ederek artan enerji taleplerinin nasıl karşılanacağına ilişkin endişelerin giderilmesine yardımcı olmaktadır.

Konut, ofis, endüstriyel parklar, ticari ve kurumsal yapılar dahil olmak üzere çeşitli yüklere hizmet vermek için hem son kullanıcılar hem de elektrik hizmet vericileri ve dağıtıcıları için dağıtık üretim kaynaklarını bir mikro şebekeye entegre edilmesinin sağladığı çeşitli fırsatlar ve faydalar mevcuttur. Mikro şebeke uygulaması, son kullanıcılar için, gelişmiş elektrik hizmeti güvenilirliği, daha iyi güç kalitesi ve %20-25 oranında daha düşük elektrik maliyetleri sağlayabilmektedir [15].



Şekil 2.1. Mikro şebeke sistemi

Yerinde temiz enerji üretiminin genişletilmesi ve entegre edilmesi, son kullanıcıların elektrik gereksinimlerini yerel olarak kontrol edilen bir şebeke aracılığıyla doğrudan karşılamalarına olanak tanıdığından, genel sürdürülebilirliği de geliştirmektedir. Dolayısıyla ana şebekeye bağlı kalmaları gerekmeyi için güç kaybı riskini azaltmaktadır [16]. Mikro şebeke uygulaması, müşteri yüklerini etkilemeden sistem onarımlarına izin vererek, en yüksek güç koşullarında kullanım için dağıtılabilir yük sağlayarak ve iletim ve dağıtım sistemi üzerindeki stresi azaltarak yerel kamu hizmetlerine de fayda sağlayabilmektedir. Bu, yerinde üretim miktarının artırılmasını sağladığı ve dolayısıyla iletim ve dağıtım hattı kayıplarını en aza indirdiğinden, dağıtım sistemi kaybını azaltarak verimliliğin artmasıyla görülebilmektedir. Bu nedenle, mikro şebeke uygulaması mevcut altyapıya fayda sağlamakla beraber, talep tarafında enerji yönetimi, maliyetleri önemli ölçüde azaltma, elektrik üretimi ve yönetiminin yeni bir yolu aracılığıyla tüketici için güvenilirliği artırma gibi fırsatlar sunmaktadır. Mikro şebeke sistemlerinin değişik avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Mikro şebeke sisteminin avantajları;

- Yüksek verimli, düşük maliyetli temiz enerji kaynakları kullanımına dayanması,
- Bölgesel şebekeden güvenli bir şekilde ayrılarak kesintisiz enerji sağlaması,
- Merkezi şebekenin anlık değişen talep ihtiyaçlarını karşılaması,
- Enerji hatlarında oluşan kayıpları engellemesi,
- Riskin dağıtılması ile merkezi şebekenin daha güçlü hale gelmesi,

- Çeşitli afet durumları sonrası hat kesilmesi problemlerinin ortadan kalkması olarak sıralanabilmektedir.

Mikro sisteminin dezavantajları ise;

- Mikro şebeke içi AA dağıtım hatlarında ani dalgalanma ve kontrol / sönümlleme güçlüğü,
- İki yönlü akım nedeniyle karmaşık ve yüksek maliyetli koruma devresi tasarımı gerektirmesi,
- Mikro şebeke modelleme ve kontrol mekanizması kurulması gerekliliği,
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının rüzgar hızı, güneş ışınım miktarı, hava sıcaklığı gibi doğal koşullardan etkilenmesi,
- Enerji depolama ünitelerinin yatırım ve bakım maliyetini artırması

olarak sıralanabilmektedir.

Dağıtılmış üretim, depolama cihazları ve kontrol edilebilir yükler genellikle şebekeye gerilim kaynaklı eviricilerle (VSI) bağlanmaktadır [17, 18]. Şebeke bağlantı eviricisinin esnek kontrolü nedeniyle, mikro şebeke kontrolünün ve mikro şebeke çalışma modunun esnekliği artmaktadır. Bununla birlikte, mikro şebekenin şebeke yapısı ve çalışma özellikleri, geleneksel şebekeden çok farklıdır. Bu nedenle, geleneksel şebekenin kararlılık sınıflandırması ve analiz yöntemi, mikro şebekenin özelliklerini tam olarak tanımlayamaz. Mikro şebeke kararlılığı araştırmaları temel olarak mikro şebeke kararlılık analizinin matematiksel modeline, mikro şebeke kararlılığının analiz yöntemlerine ve mikro şebeke için kararlılık geliştirme yöntemlerine vb. odaklanmaktadır [19]. Küçük sinyal kararlılık analizine ve geçici kararlılık simülasyon analizine çok rastlanmaktadır [20] ve [21]'da, şebekeye bağlı bir fazlı bir eviricinin küçük sinyal kararlılığı analizi sunulmuştur. Daha sonra, ada modu çalışan mikro şebekelerin küçük sinyal kararlılığı analizi de tartışılmıştır [22-25].

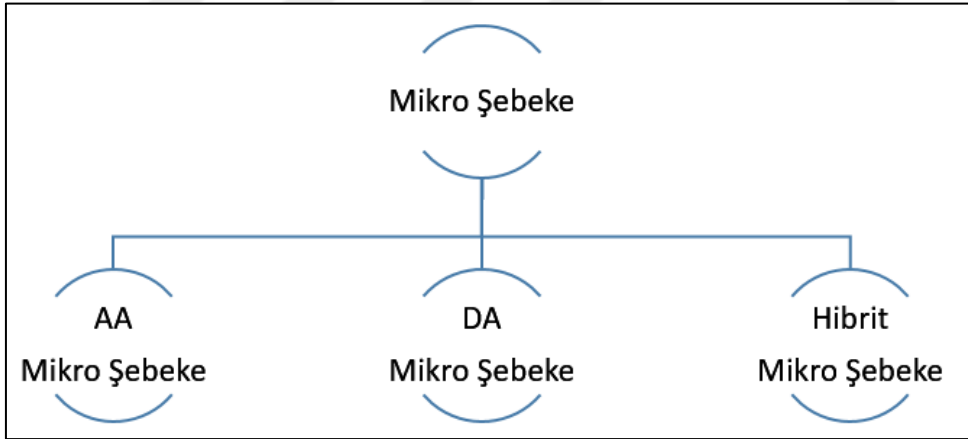
[26-29] çalışmalarında esas olarak hat empedansının ve yük dalgalanmalarının mikro şebeke gerilimi ve frekans özellikleri üzerindeki etkileri tartışılmaktadır. [28-31], şebekeye bağlı mikro şebekenin geçici kararlılık sorunları incelenmiştir. Büyük bozulmalar sırasında farklı

dağıtık üretim birimlerinin dinamik yanıtı üzerine çalışmalar da bulunmaktadır [34,35]. Mikro şebekelerde farklı kontrol stratejileri birçok çalışmada tartışılmaktadır [36-38]. Ada modu çalışan bir mikro şebekenin geçici kararlılık analizi üzerine de birçok çalışma bulunmaktadır [39-41].

Görüldüğü gibi mikro şebekeler son yıllarda araştırmacıların oldukça yoğun ilgisini çekmiştir. Ancak bu sistemin geleneksel merkezi şebekeden farklılıkları aşılması gereken sorunlar olarak ortaya çıkmıştır. Bunlardan birisi de mikro şebeke bünyesindeki kaynakların koordineli biçimde kontrolü ve enerjinin yönetilmesidir.

2.1. Mikro Şebeke Çeşitleri

Mikro şebekelerin elektrik mimarisi ağırlıklı olarak uygulama, mevcut altyapı ve müşteri odaklı gereksinimler tarafından belirlenmektedir. Genel olarak, mikro şebeke mimarileri Şekil 2.2'deki gibi AA mikro şebekeler, DA mikro şebekeler ve hibrit mikro şebekeler olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır.

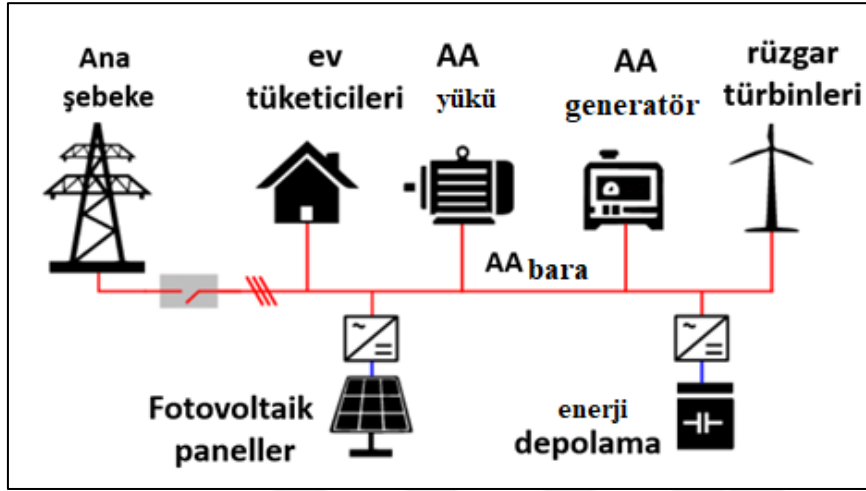


Şekil 2.2. Mikro şebeke çeşitleri

2.1.1. AA mikro şebekeler

AA mikro şebeke en popüler ve yaygın olarak kullanılan mikro şebeke yapısıdır. Bu mimaride üretim, dağıtım ve yükler AA formundadır. Mevcut AA ağ altyapısını (dağıtım, transformatörler, koruma sistemi, izleme sistemi vb.) kullanarak, AA mikro şebekelerin tasarlanması ve uygulanması diğer mikro şebeke yapılarına göre daha kolaydır. Bu konseptte

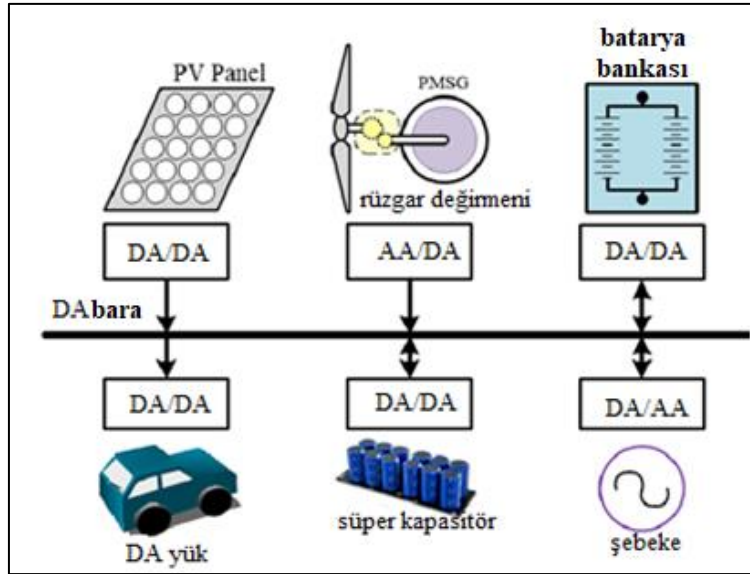
dayalı olarak dünya çapında çeşitli mikro şebeke projeleri geliştirilmiştir [42]. AA mikro şebeke uygulamaları üzerine birçok çalışma bulunmaktadır [43-45]. AA mikro şebekeler, dönüştürücüler ve kontrol yaklaşımları gibi özel gereksinimler olmadan mevcut bir şebekeye kolayca bağlanabilirler. Ayrıca mevcut şebeke yapısı AA olduğundan dolayı uygulamaları daha kolaydır. AA mikro şebeke yapısı Şekil 2.3'te sunulmaktadır.



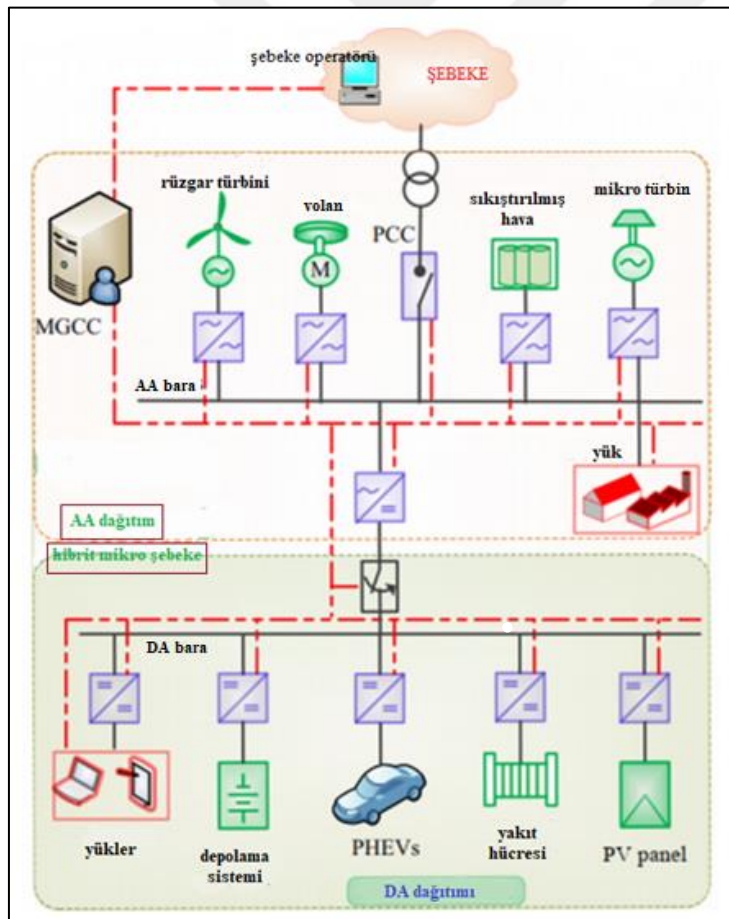
Şekil 2.3. AA mikro şebeke

2.1.2. DA mikro şebekeler

DA mikro şebeke, enerji depolama elemanları için enerji dönüşüm aşamalarını azaltarak verimlilik artışı sağlamaktadır. Ayrıca, bir DA dağıtım sisteminde daha az kararlılık sorunu vardır ve gerilim kontrolü AA mikro şebekelere göre daha az karmaşıktır. Ek olarak, yükler için dönüştürücüler kullanıldığından, mimari daha geniş gerilim değişimlerine izin vermektedir. Senkronizasyona ve reaktif güç kontrolüne gerek yoktur. Bu sistemin dezavantajı, AA kaynaklar için ve şebekeye bağlantı noktasında DA/AA dönüşümüne ihtiyaç duymasıdır. Ayrıca, aşırı akım ve kısa devre koruması ve yeni DA dağıtım hatlarına duyulan ihtiyaç dezavantajları arasında yer almaktadır. DA mikro şebeke uygulamaları üzerine birçok çalışma bulunmaktadır [46-48]. DA mikro şebeke yapılarının DA gerilim ile beslenen yüklere ve çıkışında DA gerilim üreten enerji kaynaklarına bağlantı işleminde önemli bir kolaylık sağlamaktadır. Bu basitleştirmenin bir sonucu olarak, sistemin verimliliği ve güvenilirliği artarken, güç dönüştürme ihtiyacı da azalmaktadır. Bu durum şebekenin işletme maliyetine ve arızalanma olasılığına olumlu etki etmektedir. DA mikro şebeke yapısı Şekil 2.4'te sunulmaktadır.



Şekil 2.4. DA mikro şebeke



Şekil 2.5. Hibrit mikro şebeke

2.1.3. Hibrit mikro şebekeler

Hibrit mikro şebekeler, verimliliği artırmak için hem AA hem de DA mikro şebekelerin avantajlarından yararlanmaktadır. Hibrit mikro şebeke uygulamaları üzerine birçok çalışma bulunmaktadır [49-52]. Hibrit mikro şebekeler, yenilenebilir ve geleneksel enerji üretiminin avantajlarını bir araya getirirken aynı zamanda zayıflıklarını da telafi etmektedir. Geleneksel enerji üretimine göre daha yüksek sermaye maliyeti ve daha düşük toplam sahip olma maliyeti için daha düşük uzun vadeli işletme maliyeti sunmaktadır. Hibrit mikro şebeke yapısı Şekil 2.5'te sunulmaktadır.

2.2. Mikro Şebekelerde Kontrol

Mikro şebekelerde kontrol, sistem yönetimi ve kontrolü, güç akışı düzenlemesi, güç elektroniği cihazları üzerinde kontrol, enerji kaynak yönetimi ve güç kalitesinin kontrolünü içerir. Mikro şebeke ve geleneksel şebekeler arasındaki birincil ayrım, şebekeye bağlı cihazları kontrol etmek için en yeni kontrol yaklaşımıdır. Mikrogridler dağıldığından, başarılı bir güç üretimi ve yönetimi için hayati bir tekniktir. Tutarlı ve sabit bir güç kaynağı korumak için, dağıtılmış üretim DG birimleri ESS birimleri kullanılarak uygun şekilde düzenlenmesi gereken aralıklı davranışlar gösterir. Ayrıca, kararlı frekans ve voltaj sağlayan operasyonel modlar arasında düzgün bir geçiş sağlamak için MG'lerin izole edilmiş bir modda çalışırken uygun şekilde kontrol edilmelidir; Bu nedenle, MG kontrol stratejileri zordur, çünkü gereksinimlere göre en uygulanabilir çözümü tanımlamak için kapsamlı araştırmalar gerekmektedir.



3. MİKRO ŞEBEKE BİLEŞENLERİ

Mikro şebeke bileşenleri arasında yenilenebilir enerji kaynakları, yükler, enerji depolama sistemi ve mekanik tahrik gücünü farklı kaynaklardan alan senkron generatörler bulunmaktadır.

3.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Günümüzün vazgeçilmez tüketim araçlarından biri de enerjidir. Enerjinin temiz, verimli ve ekonomik kullanımı, ülkelerin gelişmişlik düzeylerinin en önde gelen ölçütü olarak değerlendirilmektedir. Bugün dünyanın ticari enerji talebi, fosil yakıtlardan, nükleer ve hidrolik enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Fosil yakıtların yakın bir gelecekte tükenme olasılığı ve kullanımından kaynaklanan çevre kirliliğinin artması önemli sorunlardır. Bu olumsuzlukların yanı sıra enerji tüketimi durmadan artmakta ve gelecekte de daha büyük bir ivmeyle artacağı görülmektedir. Enerjinin böylesine bir trend izlemesi, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelişi kaçınılmaz kılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, sürdürülebilirliği ve sisteme gerekli gücü sağlamak için bir mikro şebekenin ana bileşenleridir. Mikro şebekelerde, enerji üretimi genellikle güneş paneli ve rüzgar türbinlerinden oluşan yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra küçük ölçekli hidroelektrik, jeotermal ve biokütle / biyogaz enerji santrallerinden oluşmaktadır. Rüzgar türbinleri ve güneş panelleri, bir mikro şebekede kullanılan en yaygın yenilenebilir kaynak türleri olarak öne çıkmaktadır. Bu kaynaklar daha etkin kullanımı için özel kontrol algoritmaları ile donatılmış güç elektroniği dönüştürücüleri üzerinden mikro şebekeye bağlanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle arazi ve çatı üstü güneş enerji santralleri kullanımı yoğunlaştıkça, mikro şebeke uygulamasının fizibilite çalışmaları anlamlı hale gelmektedir. Dağıtılmış enerji kaynakları tanımına uygun hidroelektrik ve jeotermal yenilenebilir kaynakların coğrafi konumları seçilememekte, kaynak neredeyse o alana santral kurulması gerekmektedir. Ancak güneş enerjisi kullanımında durum farklılaşabilmektedir. Üretim ve tüketimin aynı noktada birleştirildiği çatı üstü güneş enerji sistemlerinin kurulması ve benzeri santral kurulumlarının mikro şebeke yöntemi ile ana şebekeye bağlantısı minimum maliyetle en yüksek faydanın elde edilmesini sağlamaktadır.

3.1.1. Rüzgar türbini

Rüzgar, insanların yararlandığı ilk enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Tarihin başladığı dönemden beri itici gücünden yararlanılan rüzgar enerjisi ilk olarak Mısır ve Çin’de milattan önceki dönemlerde sulamada, suyun pompalanmasında, yelkenli gemilerin hareket ettirilmesinde, İran’da ise değirmenlerin çarkının döndürülmesinde kullanılmıştır. Yel değirmenleri, ilk olarak İskenderiye yakınlarında kurulmuştur. Türklerin ve İranlıların ilk yel değirmenlerini M.S. 7. yüzyılda kullanmaya başlamalarına karşın, Fransa ve İngiltere’de yel değirmenlerinin kullanılmaya başlanması 12. yüzyılda olmuştur. Ancak fosil yakıtların kullanımının hızlı bir şekilde yaygınlaşması ve artması, diğer alternatif enerji kaynaklarında olduğu gibi rüzgar enerjisi ile ilgili yapılan çalışmaları da durma noktasına getirmiştir. Fakat dünyanın 1970’li yılların başında yaşadığı enerji krizi, durma noktasına gelen bu alternatif enerji ile ilgili yapılan çalışmalara büyük bir ivme kazandırmıştır. Bu çalışmaların hızlanmasının diğer bir nedeni de dünya fosil enerji kaynaklarının tükenmekte olması ve bu kaynakların çevre üzerindeki olumsuz etkileridir.

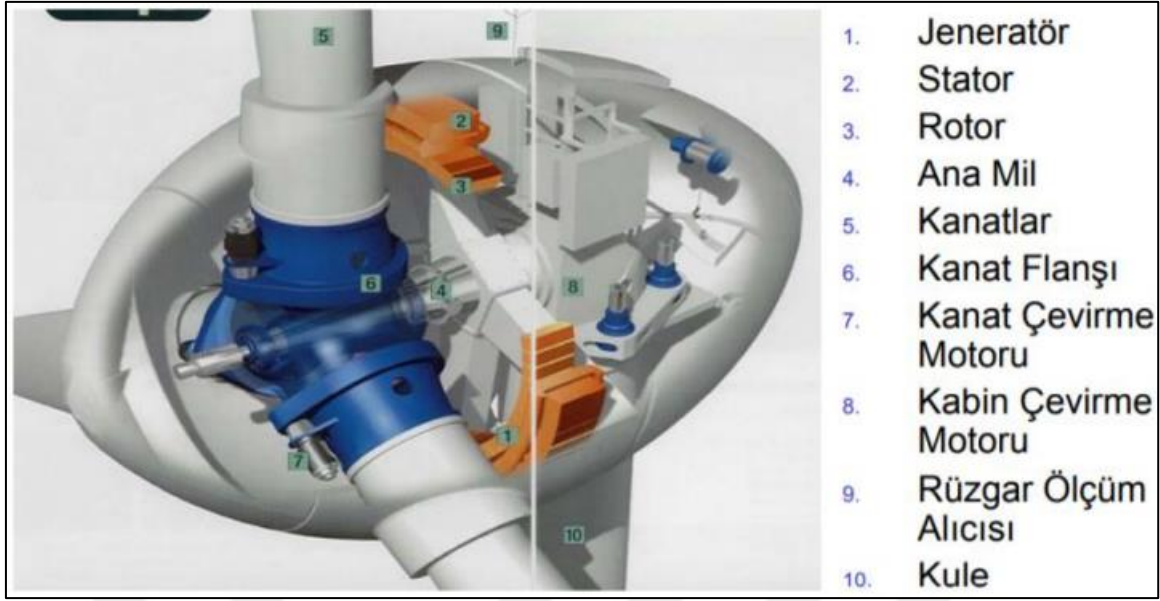
Eski bir enerji kaynağı olarak rüzgardan ilk enerji üretimi 1890’ların başında Danimarka’da gerçekleştirilmiştir. Daha sonra 1931’de Rusya, 1940’larda ABD bu ülkeleri izlemiştir. İkinci Dünya savaşı sonrası bu alandaki çalışmalara İngiltere, Fransa, Almanya, İsviçre, Avusturya ve İtalya katılmıştır. Çevresel avantajları açısından da pek çok ülke, resmi teşviklerle rüzgar enerjisini desteklemektedirler. Tüm bunların amacı, pazarı harekete geçirmek, maliyetleri düşürmek ve resmi teşviklerle şu an fosil yakıtların sahip olduğu üstünlüğü ortadan kaldırmaktır. Çeşitli ülkelerde pazarı harekete geçirmeye yönelik farklı politikalar izlenilmektedir. Rüzgar teknolojisinin araştırma ve geliştirme girişimlerine verilen ve verilmekte olan destekler ile bu teknoloji elektrik enerjisi pazarında rekabet edebilir bir konuma gelmiştir. Bunun sonucu olarak son yıllarda dünya genelinde rüzgar türbini santrallerinin kurulu gücü hızlı bir artış göstermektedir. Rüzgar türbininin görünümü Şekil 3.1’de sunulmaktadır.



Şekil 3.1. Rüzgar Türbini

Rüzgâr türbini, rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemdir. Rüzgârın kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye çevrilir. Rotor milinin devir hareketi hızlandırılarak gövdedeki generatöre aktarılır. Generatörden elde edilen elektrik enerjisi aküler vasıtasıyla depolanabildiği gibi doğrudan alıcılara da ulaştırılabilir. Rüzgâr türbinleri dönme eksenlerine, devirlerine, güçlerine, kanat sayılarına, rüzgâr etkisine, dişli özelliklerine ve kurulum konumlarına göre sınıflandırılırlar. Rüzgar türbini, pervane, kule, generatör ve elektronik aksamlar olmak üzere 4 ana parçada oluşur. Rüzgar türbinini oluşturan tüm kısımlar Şekil 3.2’de sunulmaktadır.

Rotor, rüzgar pervaneleriyle dişli kutusunun yer aldığı bölümdür. Pervane kanatları, rotor miline bağlı olarak rüzgarın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren bölümdür. Genellikle polyester ya da fiber-glass gibi hafif ama dayanıklı malzemelerden yapılır. Dişli kutusu, rüzgar enerjisi vasıtasıyla elde edilen dönme hareketinin hızını arttıran bölümdür. Dişli kutusu, rüzgarın döndürme hızını arttırarak jeneratörün ihtiyacı olan hıza ulaştırır. Kullanılan generatör türünü bağlı olarak bazı türbinlerde dişli kutusu bulunmaz. Bu türbinlerde kanat dönme hızı ile generatör dönme hızı aynıdır. Rüzgar vanası, rüzgarın yönünü belirler. Bu sayede, sapma motoru aracılığıyla türbinin yönü, rüzgarın yönüne göre şekillendirilir.



Şekil 3.2. Rüzgar türbini bileşenleri

Generatör, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bölümdür. Rüzgar türbinlerinde üç çeşit generatör kullanılır. Bunlar; doğru akım şönt generatörü, senkron generatör ve indüksiyon (asenkron) generatördür. Fren, acil durumlarda rotoru durduran cihazdır. Rüzgar türbinlerinde üç çeşit fren bulunur. Bunlar; mekanik, hidrolik ve elektrikseldir.

Yönetici, rüzgar türbinlerini, rüzgarın yönüne doğru çeviren bölümdür. Transformatör, generatörde üretilen elektrik enerjisini şebekeye aktarmak için uygun gerilim seviyesini çıkaran bölümdür. Kule, rüzgar türbinini taşıyan bölümdür. Genellikle silindirik formda üretilir. Bunun sebebi ise teknik personelin, türbine güvenli bir biçimde ulaşmasını sağlamaktır. Kafes şeklinde kuleler de vardır fakat, güvenlik sebebiyle çok fazla tercih edilmez.

E_w rüzgar enerjisi, A hava akış alanı, ρ hava yoğunluğu, v rüzgar (hava) hızı ve t zaman olmak üzere rüzgardan elde edilebilecek enerji miktarı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$E_w = (1/2) \rho A v^3 t \quad (3.1)$$

Süpürme alanı olarak da adlandırılan hava akış alanı, havanın (rüzgarın) aktığı alandır. Türbinin süpürülen alanı, bir dairenin alanı için denklem kullanılarak türbin kanatlarının uzunluğundan hesaplanabilir. r rüzgar türbini kanat uzunluğu olmak üzere süpürme alanı.

$$A = \pi r^2 \quad (3.2)$$

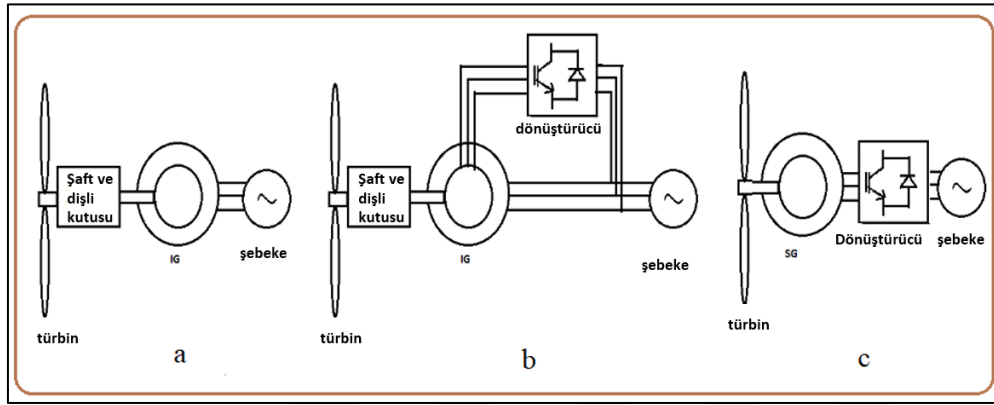
Denklemler (3.1) ve (3.2) birleştirilerek rüzgar enerjisi formülü yeniden yazılabilir:

$$E_w = (1/2) \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot v^3 \quad (3.3)$$

Rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörler

Bir rüzgar enerjisi sisteminde hangi generatör tipinin kullanılacağına toplam maliyet, bileşen sayısı, karmaşıklık, kontrol, koruma ve entegrasyon maliyetleri gibi parametreler göz önüne alınarak karar verilmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi genel olarak rüzgar türbinlerinde doğru akım şönt generatörleri, senkron generatörler ve indüksiyon (asenkron) generatörler kullanılabilir. Bunlardan doğru akım şönt generatörleri maliyetleri, kollektör ve fırçaları nedeniyle sık bakım gereksinimleri ve boyutları nedeniyle sadece basit uygulamalarda kullanılmaktadır. İkinci grubu oluşturan senkron generatörler de ise hem geleneksel sargılı senkron generatörler hem de kalıcı mıknatıslı senkron generatörler (PMSG) rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadır. Son yıllarda yüksek kapasiteli sabit mıknatısların üretilmesi ile dişli kutusu gereksinimini ortadan kaldıran çok kutuplu PMSG'ler özellikle orta ve yüksek güçlü uygulamalarda yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Asenkron generatör ailesinin de yine her iki mensubu yani sincap kafesli asenkron generatör (SCIG) ve çift uyartımlı (rotoru sargılı) asenkron generatör (DFIG)'de rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadır. Şekil 3.3. (a)'da gösterildiği gibi, rüzgar türbini SCIG'nin rotoruna bir shaft ve dişli kutusu aracılığıyla bağlanmıştır. SCIG genellikle sabit hızda çalıştığından, bu topoloji sabit hızlı bir rüzgar türbini sistemini temsil eder. Bu topolojide herhangi bir güç elektroniği dönüştürücüsü kullanılmadığından maliyet daha düşüktür. Ancak çalışabildiği rüzgar hızı aralığı daha dar olduğundan çalışma verimliliği daha düşük olacaktır. Ayrıca, çalışma sırasında şebekeye aktif güç enjekte ederken ihtiyaç duyduğu reaktif gücü şebekeden talep edecektir. Değişken hızlı rüzgar generatörleri, sabit hızlı makinelere kıyasla daha yüksek enerji yakalama ve daha düşük mekanik gerilimler nedeniyle daha yaygın olarak kullanılır. Değişken hızlı bir ünite ile generatör, güç-elektronik dönüştürücü teknolojisi kullanılarak şebekeye bağlanır. Bu, performansı en üst düzeye çıkarmak için türbin hızının kontrol edilmesini sağlar. Ancak generatör gücüne eşit güçte bir güç elektroniği dönüştürücüsü (AA-DA-AA dönüşüm için) kullanılması gerekmektedir. Şekil 3.3.(c), değişken hızda çalışabilen doğrudan tahrikli PMSG göstermektedir. DFIG'in

kullanımı Şekil 3.3. (b)'de gösterilmiştir. DFIG'nin statoru şebekeye doğrudan bağlansa da rotor bir AA-DA-AA dönüştürücü ile şebekeye bağlanmaktadır. Bu topolojide değişken hızda çalışmaya imkan tanıdığı için daha geniş bir rüzgar hızı aralığında türbinin aktif olmasını sağlar. Ayrıca kullanılan güç elektroniği dönüştürücüsünün gücü generatör gücünün yaklaşık 1/3'ü kadardır. Bu da toplam sistem maliyetini olumlu etkilemektedir. Bu nedenle büyük ve çok büyük güçlü rüzgar türbinlerinde tercih edilen bir topolojidir.



Şekil 3.3. Rüzgar generatörü topolojileri (a) SCIG (b) DFIG (c) PMSG.

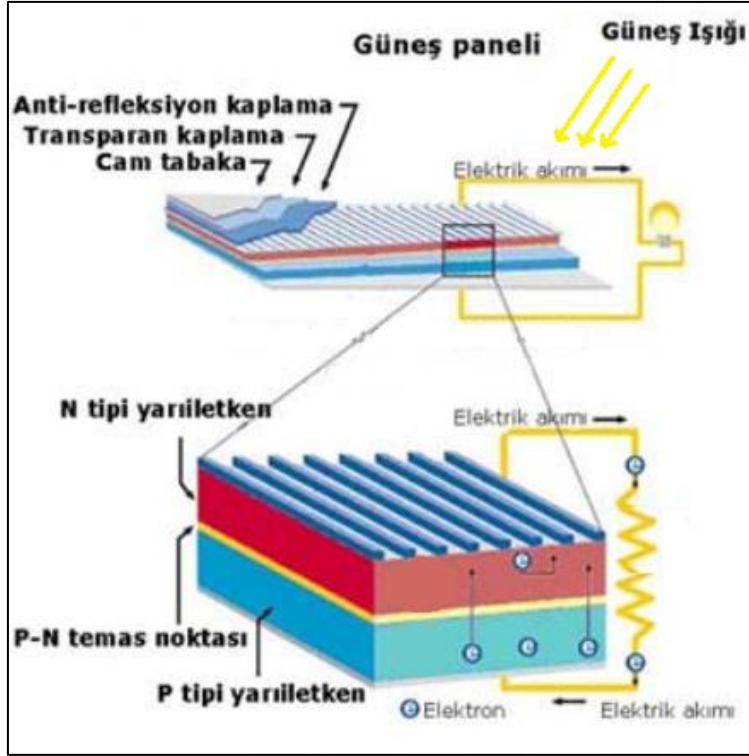
3.1.2. Güneş panelleri

Fotovoltaik sistemler, güvenli, sessiz ve güvenilir bir şekilde güç üretme yeteneğine sahiptir. Işık enerjisini doğrudan elektriğe çeviren fotovoltaik hücreler, fotovoltaik sistemleri oluşturmaktadır. Fotovoltaik sistemler, önemli miktarda elektriğe ihtiyaç duyulduğunda ve mevcut elektrik hatlarından uzakta bir sistem kurulmaya çalışıldığında sıklıkla en ucuz ve en pratik seçim olarak öne çıkmaktadır [30]. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimini keşfetmek ve geliştirmek ve maliyetini düşürmek için uzun süredir laboratuvar araştırmaları yürütülmektedir [11]. Çevre bilincinin artması, endüstriyel alanda benzer araştırmaların yapılmasına yönelik kamuoyu talebini doğurmuştur. Bu talepten dolayı, birçok firma fotovoltaik paneller geliştirmeye başlamıştır. Bu durum, güneş panellerinin fiyatını düşürürken teknik ilerlemeyi hızlandırmaktadır. Güneş enerjisi sistemlerinin, fosil bazlı enerji üretim teknolojileriyle karşılaştırıldığında, üretim kapasitesindeki artış ve artan güç talepleri nedeniyle, son zamanlarda daha fazla kullanılmaya başlandığını söylemek mümkündür. İlk kurulum maliyetleri yüksek olsa da son yıllarda maliyetlerinde önemli bir düşüş olmuştur. Uzun vadede fosil yakıt kullanan sistemlerden daha uygun maliyetlidir. Şekil 3.4'ge fotovoltaik paneller gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Fotovoltaik paneller

Güneş panelleri uygulamaya bağlı olarak, bataryalar, eviriciler, solar kontrol cihazı ve çeşitli elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bir fotovoltaik sistemini oluştururlar. Güneş panelleri, fotovoltaik sistemin ana bileşenidir. Güneşten gelen enerjiyi elektrik enerjisine çevirmekle görevlidirler. Şekil 3.4’de gösterildiği gibi, güneş ışınlarının panele düşmesiyle beraber yarı iletken levhalarda elektron geçişi olur. Yarı iletken malzeme yaygın olarak silikon kullanılmaktadır. Monokristal, polikristal, amorf ve ince-film güneş paneli çeşitleri bulunmaktadır.

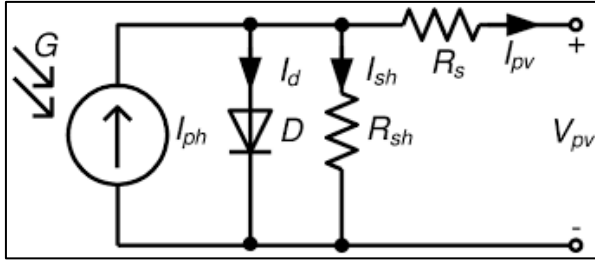


Şekil 3.5. Güneş panellerinin çalışma prensibi

Solar kontrol cihazı, akımı kontrol ederek aküyü şarj eder, akü tam dolunca gelen akımı keser ve akünün kapasitesi belirli bir limitin altına düşünce tüketimi kesmektedir. Fotovoltaik sistemde batarya grupları, güneş enerjisinin olmadığı veya yetersiz kaldığı durumlar için kullanılmaktadır. Fotovoltaik panelleri doğru akım (DA) üretirler. Bataryalarda doğru akım elektrik enerjisi depolanırlar. Dolayısıyla batarya şarjında DA-AA dönüşüme ihtiyaç yoktur. Ancak, fotovoltaik sistemlerde alternatif akım (AA) ile çalışan cihazlar kullanılmak istenirse, eviriciler ile üretilen DA elektrik enerjisi AA elektrik enerjisine dönüştürülmelidir.

Şekil 3.5’de solar fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresini gösterilmektedir. Tek diyot modeli olarak adlandırılan bu ortak devre, fotovoltaik hücrenin veya modülünün elektrik devresini ve davranışını temsil eder. Bu devre, fotoakım kaynağı, I_{ph} , diyot akımı I_d , şönt direnç akımı I_{sh} , toplam fotovoltaik akımı I_{pv} , fotovoltaik hücrenin veya modülünün terminal gerilimi V_{ph} , seri direnç, R_s ve şönt direnci, R_{sh} içerir. PV hücrenin veya modülünün toplam çıkış akımı Denklem 1'deki gibi yazılabilir [21]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q V_{pv}}{\gamma V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (3.4)$$



Şekil 3.6. Solar PV hücresinin eşdeğer devresi

Burada V_{th} termal gerilimi, γ diyot sabiti, I_s diyotun doyma akımı ve q elektron yüküdür ($1.60217646 \times 10^{-19}$ C). Daha sonra, foto-üretilmiş akım Denklem (3.2)'de aşağıdaki gibi yazılabilir:

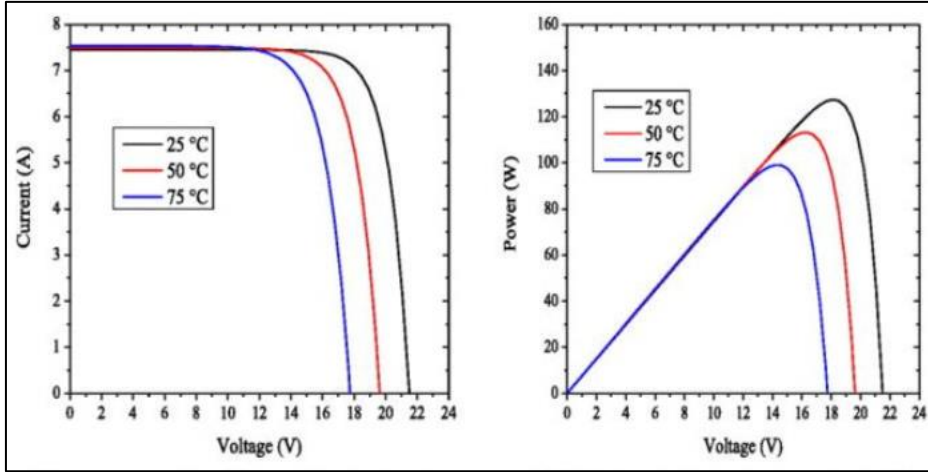
$$I_{ph} = (I_{sc} + K_I(T - T_n)) \frac{G}{G_n} \quad (3.5)$$

burada I_{sc} , fotovoltaiik modülünün kısa devre akımıdır, T sıcaklıktır, T_n standart test koşullarında (STC) sıcaklıktır (25°C), G ışıınımdır, G_n STC koşullarında ışıınımdır (1000W/m^2) ve K_I , kısa devre akımı (I_{sc}) için sıcaklık katsayısıdır. Daha sonra, diyotun doyma akımı Denklem (3)'deki gibi ifade edilebilir [22].

$$I_s = I_{on} \left(\frac{T_n}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{\gamma K} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3.6)$$

Burada I_{on} ters doyma akımıdır, E_g bant aralığı enerjisidir (1.12 eV) ve K Boltzmann sabitidir ($1.3806503 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$).

Denklemlerden anlaşılacağı üzere fotovoltaiik modül gerilimi ve akımı, değişken hava faktörlerinden (solar ışıınıım, sıcaklık vb.) etkilenir [23,24]. Şekil 3.7. Farklı sıcaklık değerlerinde bir fotovoltaiik modülün I - V ve P - V karakteristikleri gösterilmiştir.

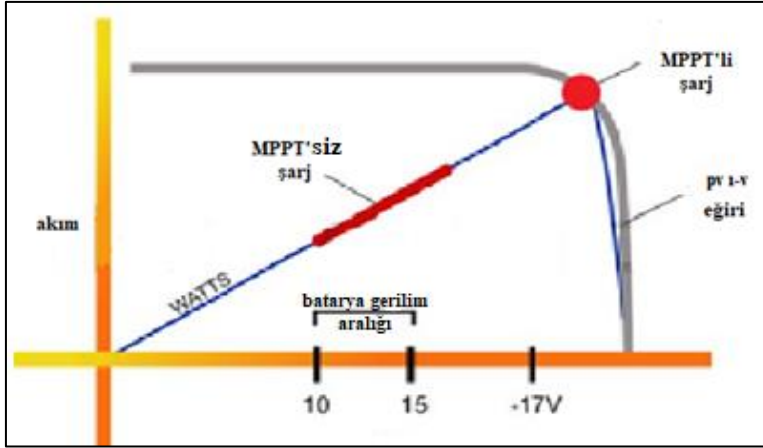


Şekil 3.7. Farklı sıcaklık değerlerinde modülün I - V ve P - V karakteristikleri

Bu şekillerden görüldüğü gibi, bir fotovoltaik modülden elde edilecek maksimum güç her çalışma koşulunda sadece tek bir çalışma noktasında elde edilebilmektedir. Bu durum, yatırımdan maksimum faydanın sağlanabilmesi için çalışma süresi boyunca değişen şartlar için sistemin hep maksimum güç üretecek noktada çalışmasını sağlayacak şekilde çalışmasını gerektirir. Bu işleme maksimum güç noktası takibi (MPPT) denir.

Maksimum Güç Noktası (MPP), fotovoltaik modüllerin karakteristik bir değeridir. Bir fotovoltaik modülünün maksimum gücünü sağladığı çalışma noktasıdır. Teorik güç, fotovoltaik modülün kısa devre akımı ve açık devre geriliminden kaynaklanır ve MPP değerinden büyüktür. MPP değerinin teorik güce oranı, doldurma faktörüdür (FF).

Bir fotovoltaik modülün gücü, güneş ışınımına ve hücre sıcaklığına bağlı olan çıkış gerilimine bağlı olduğundan, maksimum güç noktasının konumu ışınlım ve sıcaklıkla sürekli olarak değişir. Bu nedenle güneş ışınımına, hücre sıcaklığına ve yük değerine bağlı olarak sürekli olarak değişen MPP değerini belirleyen ve sistemi hep MPP’de çalışacak şekilde kontrol etmeyi amaçlayan pek çok algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmalar genellikle bir DA-DA dönüştürücü veya DA-AA evirici devresi ile uygulanırlar. Aşağıdaki Şekil 3.6’da verilen eğri, MPPT’li ve MPPT’siz durumda bir şarj denetleyicisinin çalışma durumunu göstermektedir.



Şekil 3.8. Bir şarj denetleyicisinin MPPT'li ve MPPT'siz çalışma durumu

Geliştirilen MPPT algoritmalarının bir kısmı sürekli olarak ölçümler yaparak sistemin MPP'de olup olmadığını anlamaya ve sistemi MPP'de çalışacak şekilde yönlendirmeye çalışırken bazı MPPT yöntemleri daha önceden yapılmış ölçüm ve/veya test sonuçlarını kullanarak bu görevi yerine getirmeye çalışır. Sürekli ölçüm yapan yöntemlere doğrudan yöntemler (veya online yöntemler) denirken önceden yapılmış ölçüm ve test sonuçlarını kullanan yöntemlere dolaylı yöntemler (offline yöntemler) denilmektedir. Her iki grupta da karmaşıklık, hesaplama hızı, doğruluk, donanım gereksinimi vb. gibi kriterlere göre farklı özellikler gösteren çeşitli MPPT algoritmaları vardır. Bazı popüler algoritmaların listesi aşağıda gösterilmektedir.

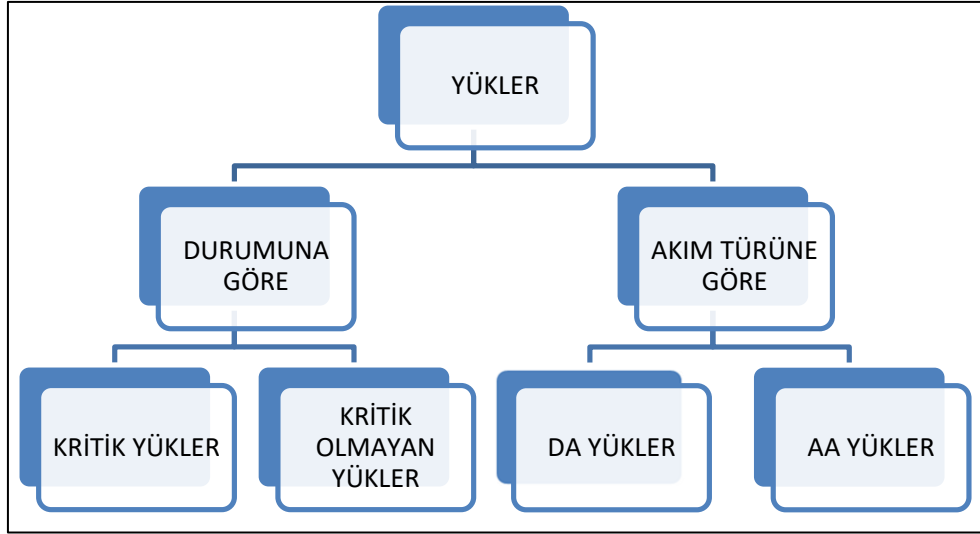
MPPT Algoritmaları

- 1- Doğrudan Yöntemler
 - 1.1. Modülasyonlu yöntemler
 - 1.2. Yapay zeka tabanlı yöntemler
 - 1.3. Örnekleme temelli yöntemler
 - 1.3.1. Diferansiyel metot
 - 1.3.2. Gerilim (akım) geri besleme metodu
 - 1.3.3. Değiştir&Gözle metodu
 - 1.3.4. Artan iletkenlik metodu
 - 1.3.5. Parazitik kapasitans metodu
- 2- Dolaylı Yöntemler
 - 2.1. Eğri uydurma metodu
 - 2.2. Tablo yöntemi
 - 2.3. Açık devre gerilimi yöntemi
 - 2.4. Kısa devre akımı yöntemi
 - 2.5. Örnek PV modül yöntemi

Şekil 3.9. Popüler MPPT algoritmaları

3.2. Yükler

Bir mikro şebeke sisteminde, AA ve DA yükler bulunmaktadır. Soğutucular ve motor yükleri gibi sabit aktif/reaktif güç yükleri, aydınlatma ve ısıtma yükleri gibi sabit dağıtılmış empedans yükleri dahil olmak üzere çeşitli yük türleri vardır. Yükler ayrıca önem durumuna göre iki kategoriye ayrılır: kritik ve kritik olmayan yükler. Kritik yüklere örnek olarak komuta ve kontrol tesisleri, iletişim ve acil durum sistemleri verilebilmektedir. Aydınlatma kritik olmayan temel yüklere örnek olarak kabul edilebilir. Yüklerin sınıflandırılması Şekil 3.10'da gösterilmektedir.



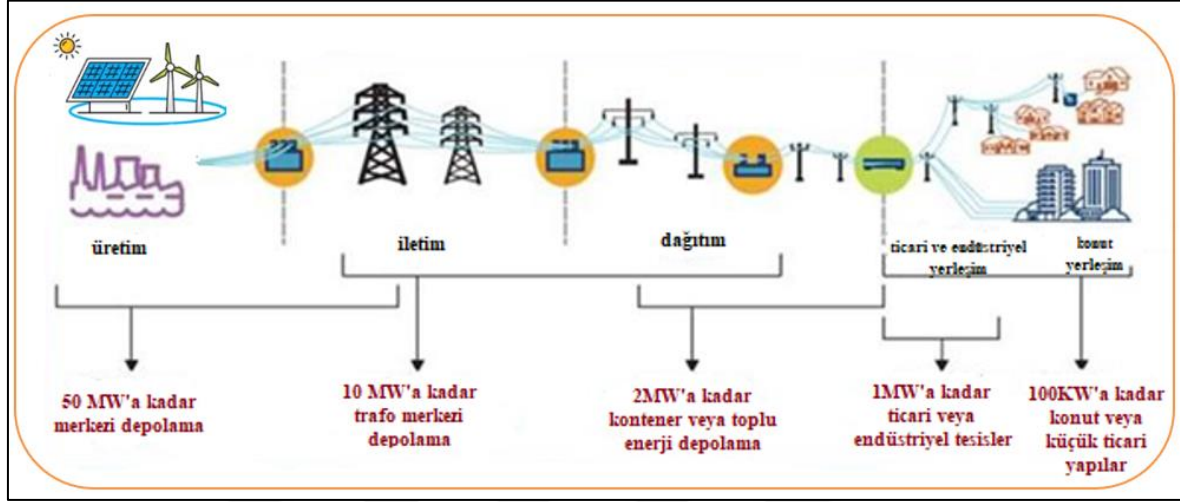
Şekil 3.10. Yüklerin Sınıflandırılması

3.3. Enerji Depolama Sistemi

Bir mikro şebekede, çeşitli dağıtılmış üretim kaynaklarının ve müşterilerin, sistemin kararlılığına etki edebilecek çeşitli aktif ve reaktif güç profilleri oluşturduğu ve talep ettiği iyi bilinmektedir. Bu nedenle enerji depolama sistemleri, hem kısa vadeli hem de uzun vadeli uygulamalar için mikro şebekenin gerilimini ve frekansını dengelemek için kritik bir rol oynamaktadır [53]. Enerji depolama sistemi, yalnızca yerel yüklere güç desteği sağlamak için depolama cihazlarının işlevlerini aktif olarak yönetmekle ve kontrol etmekle kalmaz, aynı zamanda ömrünü, verimliliğini ve güvenliğini de en üst düzeye çıkarmaya çalışır. Ayrıca, diğer gelişmiş işlemleri gerçekleştirmek için denetleyici kontrol birimi gibi üst katman kontrol birimiyle iletişim kurmaktadır. Rüzgar hızı ve güneş ışıınımı gibi doğal değişkenlerden dolayı mikro şebeke sisteminde istenilen enerji sürekli olarak sağlanamamaktadır. Enerji depolama sistemleri, dağıtılmış kaynaklardan üretimin talepten çok olduğu zamanlarda enerjiyi depolarken, depoladığı fazla enerjiyi üretimin az olduğu zamanlarda sisteme aktararak, sistemde talep/arz dengesini ve sistem kararlılığını sağlamaktadır. Ayrıca mikro şebeke sistemindeki gerilim ve frekans dalgalanmalarını azaltarak güç kalitesinin artmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak, enerji depolama sistemlerinin, elektrik şebekelerinde kullanım amaçları aşağıdaki gibi özetlenebilir [54]:

- Enerji zaman kayması (arbitraj) ve tedarik kapasitesi,
- Yük takibi ve besleme rezerv kapasitesi,

- İletim desteği ve tıkanıklık giderme,
- Elektrik servis güvenilirliği ve güç kalitesi,
- Yenilenebilir entegrasyonu,

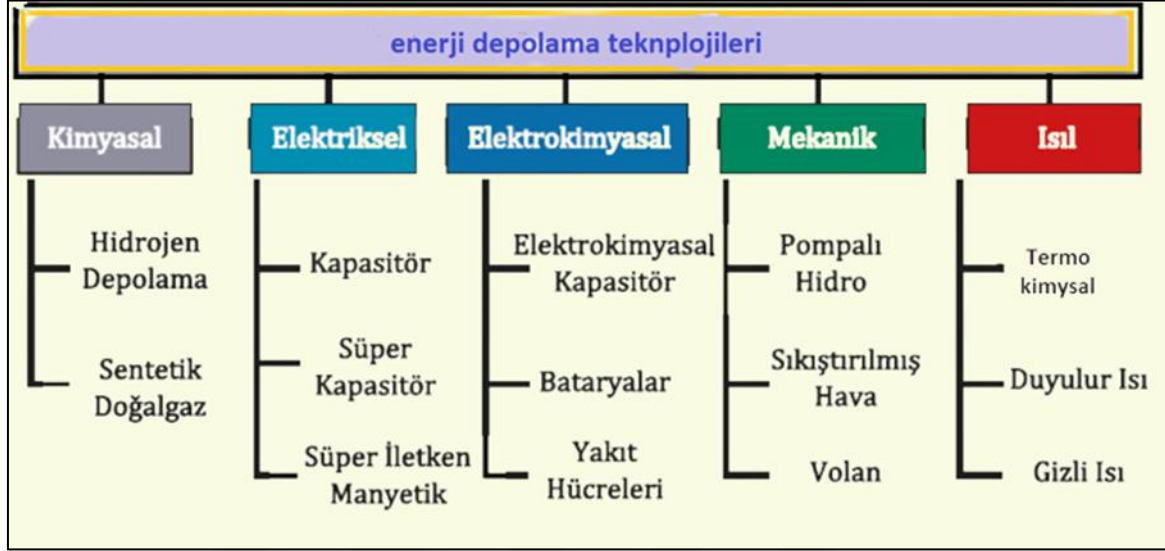


Şekil 3.11. Elektrik şebekelerinde enerji depolama sistemlerinin kullanımı

Elektrik şebekelerinde enerji depolama sistemlerinin kullanımı Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Görüldüğü gibi enerji depolama sistemleri üretim tesislerinde, iletim hatlarında, dağıtım hatlarında ve yük tarafında farklı amaçla kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki dengesizlik ve güneş enerji santrallerinin gündüz ve gece üretim farklarını gidermek amacıyla enerji depolaması yapılması gerekir. Enerji depolama aynı zamanda ani yük taleplerinin karşılanması ve gerilimdeki değişikliklerin düzenlenmesine de yardımcı olur. Günümüzde elektrokimyasal bataryalar en çok ilgi gören enerji depolama teknolojilerinden olsa da Şekil 3.7’de gösterildiği gibi pompalanmış hidroelektrik santraller, sıkıştırılmış hava tesisleri, döner tekerlekler (flywheel), süper ve ultra kapasitörler yoğun olarak incelenen teknolojilerdir [55]. Lityum-İyon ve Lityum-Demir-Fosfat benzeri yüksek çevrim ömürlü Lityum-İyon batarya teknolojilerinin yanı sıra, jel akü benzeri kurşun asit batarya teknolojileri de sıklıkla kullanılmaktadır. Son teknolojiler, aynı zamanda, oldukça yüksek çevrim ve dalgalı kullanım ömrü (>5000 çevrim ömrü) ile yüksek güç ve enerji yoğunluğunun bir kombinasyonunu sağlamaktadır.

Aktif pozitif ve negatif malzemelerin kimyasına bağlı olarak çeşitli tiplerde Li-ion bataryalar geliştirilmektedir. Elektrotlar için farklı malzemeler, güç ve enerji yoğunluğu, gerilim

özellikleri, ömür ve güvenlik açısından çeşitli batarya özelliklerine yol açmaktadır. Sistemdeki talepleri karşılamak için uygun batarya kimyasının seçilmesi önem taşımaktadır.



Şekil 3.12. Enerji depolama teknolojileri



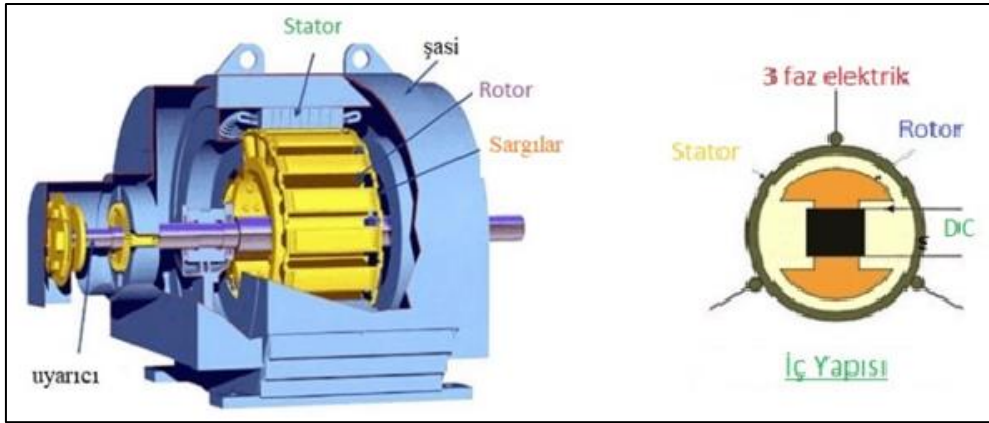
Şekil 3.13. Batarya enerji depolama sistemi

Bir batarya tabanlı enerji depolama sistemi Şekil 3.13’de gösterilmektedir. Bu enerji depolama sistemi, bir mikro şebekeyi bir dağıtım sisteminden farklı kılan en önemli elemandır. Batarya sayesinde bir mikro şebeke, işletme masraflarını düşürebilir, güvenilirliği artırabilir, enerji kayıplarını minimize edebilir, kararlı çalışmayı

güçlendirebilir, yük güç profilini zamanda kaydırabilir (load shedding) ve iletim hatlarının yatırım gereksinimlerini azaltabilir. Ancak batarya sistemlerinin ilk yatırım maliyetlerinin çok yüksek oluşu bu avantajların gerçekleştirilmesinin önündeki en büyük engeldir. Dolayısıyla bataryaların bağlantı yeri ile güç ve enerji kapasitelerinin en uygun belirlenmesi konusunda çalışmalarının yapılması çok önemlidir.

3.4. Senkron Generatör

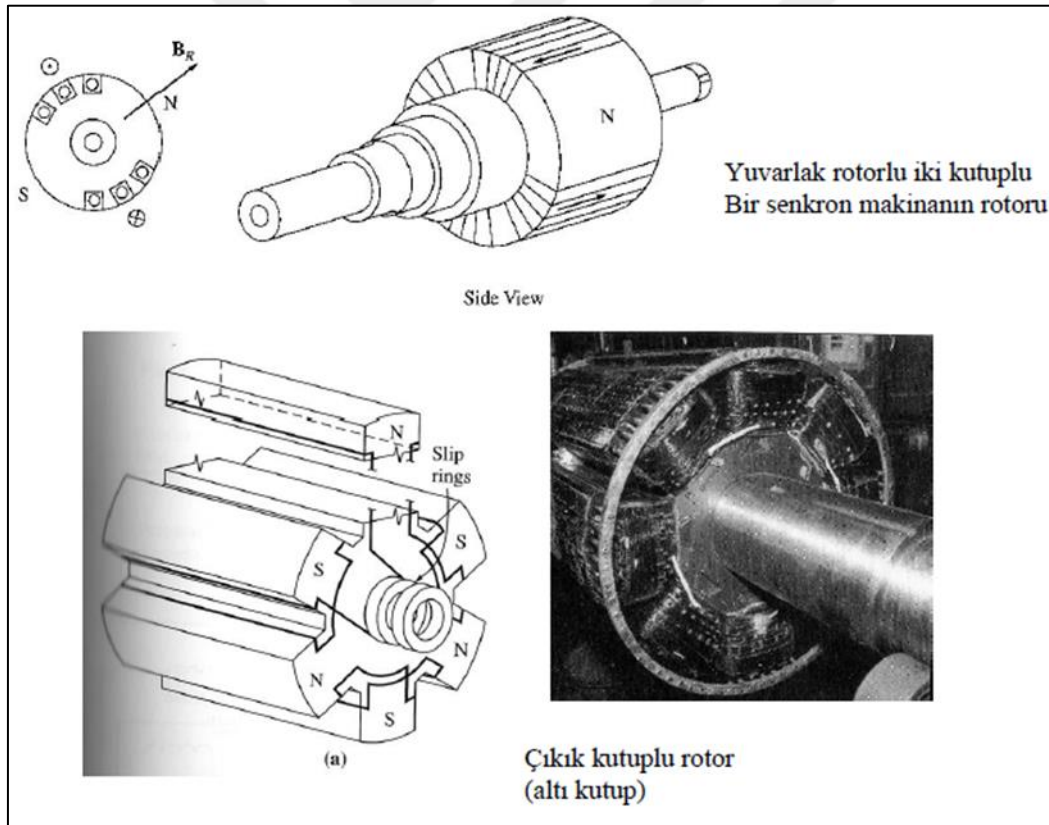
Mikro şebekelerde yenilenebilir kaynakların yeterli olmaması durumunda enerjinin sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesi için geleneksel fosil yakıtlarda kullanılabilir. Genellikle doğal gaz veya petrol türevleri ile çalışan türbinler veya motorlar mekanik enerjiyi üretmek için kullanılır. Bu sistemlerde mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmek için büyük ölçekli enerji üretim tesislerde olduğu gibi senkron generatörler kullanılır. Bu generatörlerin çoğu, yedekleme veya bağımsız uygulamalar için tasarlanmıştır. Senkron generatörler veya alternatörler, mekanik gücü AA elektrik gücüne dönüştürmek için kullanılan senkron makinelerdir ve Şekil 3.14’de gösterilmektedir. Kontrolleri ve senkronizasyon algoritmaları, onları diğer kaynaklarla birlikte bir mikro şebeke yapısında kullanmak için değiştirilmektedir [56]



Şekil 3.14. Senkron jeneratör

Bir senkron generatörde, rotor sargısına DA akım uygulanır. Bu akım bir rotor manyetik alanı oluşturur. Sonra generatörün rotoru, bir hareket kaynağı ile döndürülür. Böylece makinada içinde dönen bir manyetik alan üretilmiş olur. Bu dönen manyetik alan generatörün stator sargılarında üç fazlı gerilimler endükler. Genelde makinada sargıları

tanımlamak için iki terim kullanılır. Bunlar; alan sargıları ve endüvi sargılarıdır. Genel olarak “alan sargıları” terimi makinada ana manyetik alanı üreten sargılar için ve “endüvi sargıları” terimi de ana gerilimin endüklendiği sargılar için kullanılır. Senkron makinalarda alan sargıları rotor üzerinde bulunduğundan, bu sargılara rotor sargısı da denir. Benzer şekilde endüvi sargıları stator sargıları olarak da isimlendirilir. Senkron generatörün rotoru, aslında büyük bir elektromıknatıstır. Rotor üzerindeki manyetik kutuplar ya çıkık ya da düzgün bir silindirik yüzeyi oluşturacak şekilde yerleştirilebilir. Bu duruma göre generatörler silindirik kutuplu ve çıkıntılı kutuplu olarak adlandırılırlar. Çıkıklık terimi bir şeyden dışarı çıkmış, dışarıda anlamındadır ve çıkık bir kutup rotorun yüzeyinden dışarı doğru olan manyetik bir kutuptur. Diğer taraftan silindirik kutup rotorun yüzeyi ile aynı hizada imal edilmiş olan manyetik bir kutuptur. Silindirik kutup yapısı ve çıkık kutuplu bir rotorun yapısı Şekil 3.15’de gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Senkron generatörde silindirik kutuplu ve çıkık kutuplu rotor yapıları

Genel olarak çıkık kutuplu rotorlar 4 veya daha fazla kutuplu olarak imal edilirken yuvarlak kutuplu rotorlar 2 ve 4 kutuplu olarak imal edilirler. Bu çalışmaları rotor devir sayısını da etkilemektedir. Rotor değişken manyetik alana maruz kaldığından girdap akımı kayıplarını

düşürmek için ince laminasyonlardan imal edilir. Rotordaki alan devresinden bir DA akım geçirildiğinden ve rotor döndüğünden, alan sargılarına DA gücün aktarılabilmesi için özel bir yapıya gereksinim vardır. DA gücünü alan sargısına aktarmak için 2 yöntem kullanılır;

1. Bilezik ve fırçalarla rotora harici bir DA kaynaktan güç sağlamak,
2. Senkron generatörünün rotoru üzerine doğrudan monte edilen özel bir DA kaynaktan DA gücü sağlamak.

Bilezikler, makinanın milini (rotoru) tam olarak saran fakat milden izole edilmiş metal halkalardır. DA rotor, yani uyarma sargısının uçları, senkron makinanın rotoru üzerindeki iki bileziğe bağlanır ve her bir bilezik bir fırça ile irtibatlandırılır. Fırçalar çok küçük sürtünme ile elektriği serbestçe ileten grafit benzer karbon bileşenli çubuklardır. Bu çubuklar görece yumuşak malzemeden yapıldığından düşük sürtünme bileziği aşındırmaz. DA gerilim kaynağının pozitif ucu bir fırçaya negatif ucu da diğer fırçaya bağlanırsa, aynı DA gerilim rotoru hızı veya açısal pozisyonundan bağımsız olarak tüm bölgelerde alan sargısına uygulanmış olur. Bir senkron makinanın alan sargısına DA gücü iletmek için bilezikler ve fırçalar kullanıldığı zaman bazı problemler ortaya çıkar. Bilezik ve fırça sistemi makinanın bakım gereksinimini arttırır. Çünkü fırçalar aşınmaya karşı düzenli olarak kontrol edilmelidir. Ayrıca fırçalardaki gerilim düşümleri, büyük alan akımlarında makine üzerinde önemli güç kayıplarına sebep olabilirler. Bu problemlere rağmen bilezikler ve fırçalar küçük güçlü senkron makinelerin tümünde kullanılırlar. Çünkü DA uyarma akımını sağlayan diğer yöntemler yüksek maliyetlidir.

Daha büyük generatör ve motorlarda, makinaya DA uyarma akımını sağlamak için fırçasız uyarıcılar kullanılır. Fırçasız bir uyarıcı, alan sargısı stator üzerine ve endüvi devresi rotor mili üzerine monte edilmiş olan küçük bir AA generatörüdür. Uyarıcı generatörün üç faz çıkışı generatörünün mili üzerine monte edilmiş üç fazlı bir doğrultucu devre ile doğru akıma dönüştürülür ve sonra ana DA alan sargısını besler. Uyarıcı generatörün (stator üzerine yerleştirilen) küçük DA uyarma akımının kontrolü ile, bilezik veya fırça olmadan ana makine üzerindeki uyarma akımını ayarlamak mümkün olur. Rotor ve stator arasında hiçbir mekanik bağlantı bulunmadığından fırçasız bir uyarıcı, bilezik ve fırçalardan çok daha az bakıma gereksinim duymaktadır.

Bunun haricinde özellikle rüzgar türbini gibi sistemlerde kullanılan kalıcı mıknatıslı senkron generatörler bulunsada bu tip uygulamalarda özellikle maliyetleri nedeniyle genellikle tercih edilmemektedirler.

3.5. Ortak Bağlantı Noktası (PCC)

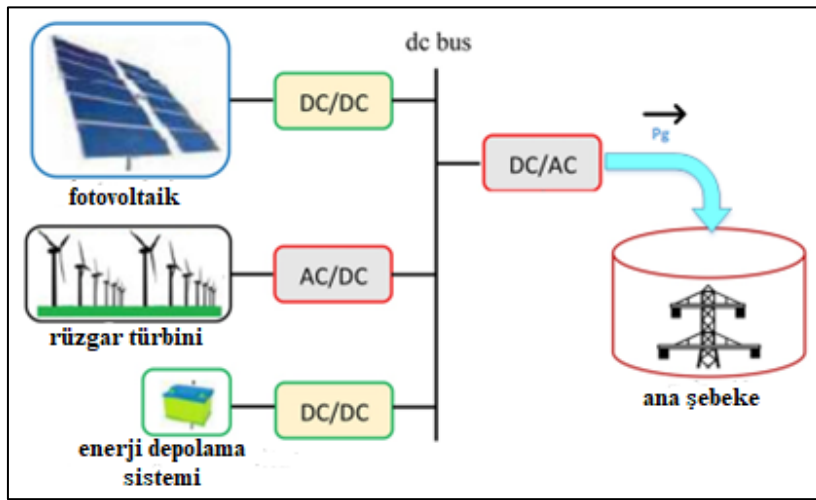
Ortak bağlantı noktası, mikro şebekenin genel şebekeye bağlandığı noktadır. Bu noktada gerektiğinde mikro şebekeyi ana şebeke sistemine bağlayıp ayıracak bir anahtar bulunmaktadır. Genellikle yüksek ömürleri ve açma-kapama hızları nedeniyle statik anahtar tercih edilmektedir. Ancak statik anahtar üzerindeki gerilim düşümlerini azaltarak verimi arttırmak için hibrit anahtarlar da kullanılabilir. Mikro şebekedeki kaynakların çeşitlerine göre bazı kaynakların doğrudan (örneğin senkron generatörler) bazı kaynakların (fotovoltaik sistemleri, bazı rüzgar türbinleri vb.) ise güç elektroniği dönüştürücüleri üzerinden şebekeye bağlanacağı açıktır.

IEEE'ye göre PCC, güç sisteminde elektrik hizmetinin ve müşteri arayüzünün olduğu nokta olarak tanımlanabilir. Tipik olarak bu nokta, kamu hizmeti gelir ölçerin müşteri tarafıdır. Güç sisteminde, sistem sahibinin, operatörün veya hizmet sağlayıcının başka bir kullanıcıya hizmet sunabileceği, kullanıcıya en yakın noktadır. Özel bir servis trafosu aracılığıyla endüstriyel kullanıcılara (yani üretim tesislerine) hizmet için sıklıkla PCC, transformatörün yüksek gerilim tarafındadır. Ortak bir servis transformatörünün aracılığıyla beslenen ticari kullanıcılar (ofis parkları, alışveriş merkezleri vb.) için, PCC genellikle hizmet transformatörünün AG tarafındadır.



4. ÖNERİLEN MİKRO ŞEBEKE MODELİ

Bu çalışma kapsamında tasarlanan ve fotovoltaik sistem, rüzgar türbini sistemi, Li-ion tabanlı enerji depolama ünitesi ve şebekeden oluşan mikro şebeke sistemi Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Önerilen mikro şebeke sistemi ayrıca bu bileşenlerin çalışması için gerekli olan AA/DA ve DA/DA dönüştürücüleri de içermektedir. Modelde 4 kW gücünde fotovoltaik sistem, 4 kW anma gücünde rüzgar türbini ve 500 Ah kapasite ve 400 V değerlerinde Li-ion tabanlı enerji depolama sistemi kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Önerilen mikro şebeke modeli

4.1. PV Sistem Modeli

Tasarlanan mikro şebeke sisteminde 4 kW kurulu güçte fotovoltaik paneller kullanılmıştır. Bu sistem mikro şebekenin kalanı gibi MATLAB/Simulink'te tasarlanmıştır. Fotovoltaik panellerin gerilimi ve akımı, sonuç olarak gücü değişken hava koşullarından (ışınım, sıcaklık vb.) etkilendiğinden [23, 24] fotovoltaik sistemin en etkin biçimde kullanılmasına imkan sağlanması amacıyla bir MPPT algoritması eklenmiştir. Bu MPPT algoritmasının çalıştırmak ve aynı zamanda hava koşullarından etkilenen fotovoltaik sistem gerilimini ortak bara gerilim seviyesine eşitlemek için bir DA-DA boost dönüştürücü kullanılmıştır

4.1.1. Fotovoltaik sisteminin MPPT'si

Tasarlanan fotovoltaik sistem, MPPT denetleyicisi ile birlikte Şekil 4.2.'da gösterilmektedir. Bununla birlikte, bir fotovoltaik sisteminin çıkış gerilimi ve akımı, sıcaklık ve ışıyım gibi çevresel değişkenlere bağlı oldukları için doğrusal olmayan davranış sergiler. Çıkış gücü de sürekli değişikliklerden etkilenir. Sistemin gerçek zamanlı olarak maksimum güç üretmesini sağlayarak MPPT'yi gerçekleştirmek için, fotovoltaik sistemlerinde yük karakteristiklerinin nasıl ayarlanacağını anlamak önemlidir. Artan iletkenlik (INC) MPPT yöntemi, basitliği ve düşük maliyeti nedeniyle son yıllarda en sık kullanılan MPPT yaklaşımlarından biri olarak ortaya çıkmıştır. Artan iletkenlik yaklaşımı, P - V eğrisinin eğimini belirlemek için kullanılır ve P - V eğrisinin zirvesi, MPP'yi izlemek için kullanılır. Bu yöntem, MPPT için ani iletkenlik I/V ve artan iletkenlik dI/dV 'yi kullanır. Denklemler (4.1) ve (4.2)'de gösterildiği gibi iki sayı arasındaki ilişki, bir güneş paneli modülünün çalışma noktasının P - V eğrisi (Denklem 4.3) üzerinde nerede bulunduğunu belirlemek için kullanılabilir. Örneğin Denklem 6 fotovoltaik sistemin P - V eğrisinde MPP'de çalıştığını gösterirken, Denklemler 4.2 ve 4.3 sistemin sırasıyla MPP'nin sol ve sağ taraflarında çalıştığını gösterir.

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad (4.1)$$

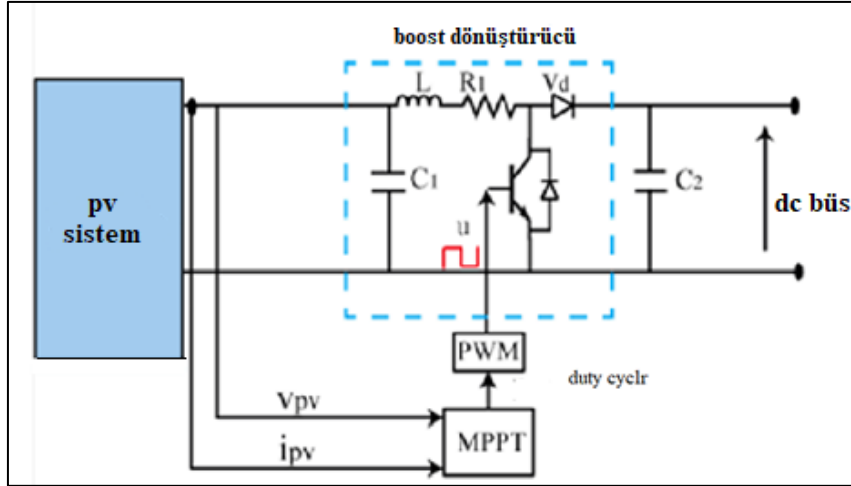
$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \quad (4.2)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \quad (4.3)$$

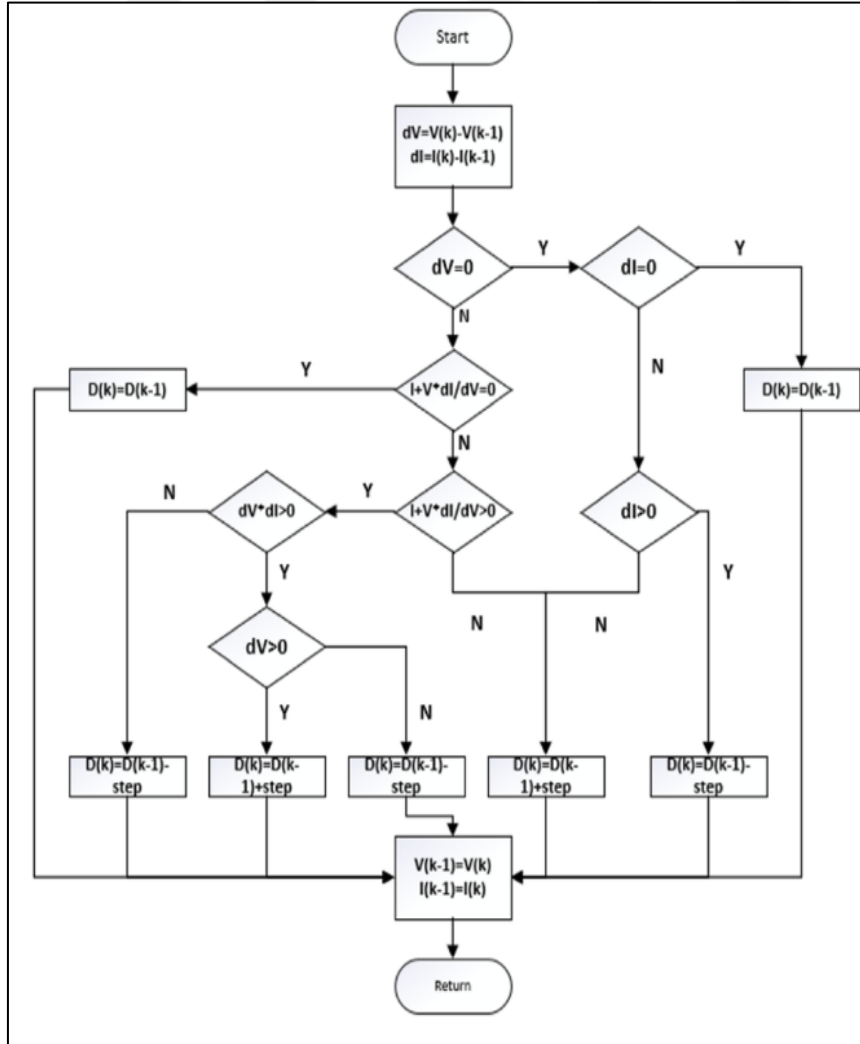
Önceki denklemler, P - V eğrisinin MPP'deki eğiminin tam olarak sıfır olduğu fikrinden türetilmiştir.

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = 0 \quad (4.4)$$

INC yaklaşımının algoritması Şekil 4.3.'de rapor edilmiştir. Bu akış şemasında, Denklem (4.4) MPP'yi tanımlamak için kullanılır ve MPPT denetleyicisi, algoritma işlemlerini yapmak için fotovoltaik modülünün gerilimini ve akımını ölçer.



Şekil 4.2. IC MPPT denetleyicisi ile önerilen PV sistemi.



Şekil 4.3. IC MPPT yönteminin akış şeması.

4.2. Rüzgar Türbini Modeli

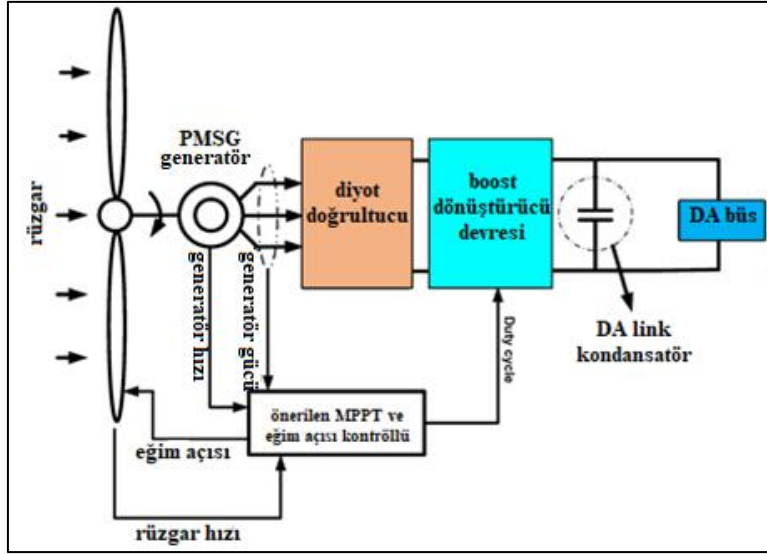
Tasarlanan mikro şebeke sisteminde 4 kW gücünde bir rüzgar türbini kullanılmıştır ve MATLAB/Simulink'te tasarlanmıştır. Rüzgar enerjisi, en erişilebilir ve çekici yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Rüzgarın kinetik enerjisi, mekanik enerji sağlayan türbinleri döndürmek için kullanılır. Daha sonra mekanik enerji generatörler vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür [25]. Rüzgar türbinindeki MPPT kontrol ünitesi, herhangi bir çalışma koşulunda üretilen gücü en üst düzeye çıkarmak için kullanılır [25, 26].

Şekil 4.3, bu çalışmada modellenen rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminin bileşenlerini göstermektedir. Kullanılan sistem, bir rüzgar türbini, bir kalıcı mıknatıslı senkron generatör (PMSG) ve güç dönüştürücüleri içermektedir. Rüzgar türbini tarafından üretilen güç Denklem (4.4)'deki gibi ifade edilebilir:

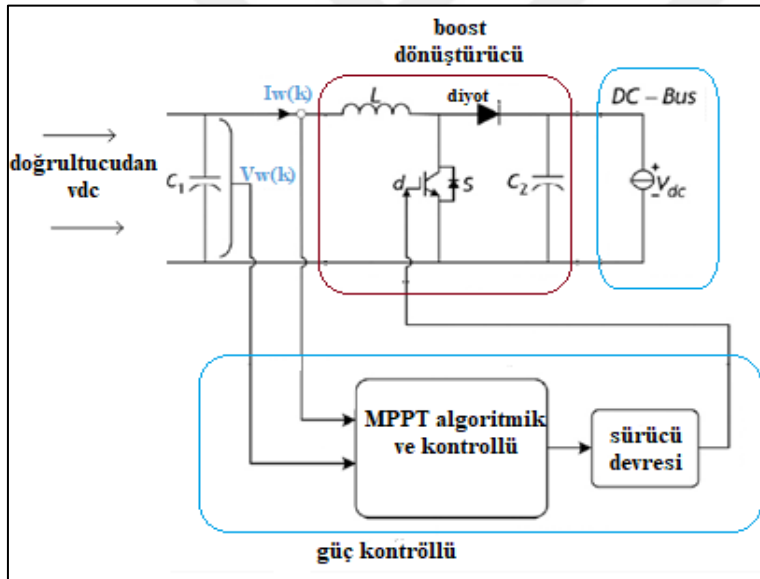
$$P_{wind} = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (4.4)$$

burada ρ hava yoğunluğu, A türbin kanatlarının alanı, V rüzgarın hızı, C_p rotor güç katsayısıdır. Rüzgar türbini sistemi için güç dönüştürücü arabirimi ve MPPT Şekil 4.4'de sunulmaktadır.

PMSG tarafından üretilen ve rüzgar hızı ile değişen genlik ve frekanstaki alternatif gerilim bir AA/DA dönüştürücü yardımıyla doğrultulmaktadır. Ardından elde edilen bu doğru gerilim bir DA-DA boost dönüştürücü yardımıyla ortak DA bara gerilim seviyesine eşitlenmektedir. Bu DA-DA boost dönüştürücü ayrıca rüzgar türbininden maksimum faydanın sağlanabilmesi için kullanılan MPPT algoritmasını da çalıştırmaktadır. Önerilen sistemde MPPT algoritması olarak değiştir gözle (P&O) tekniği uygulanmıştır.

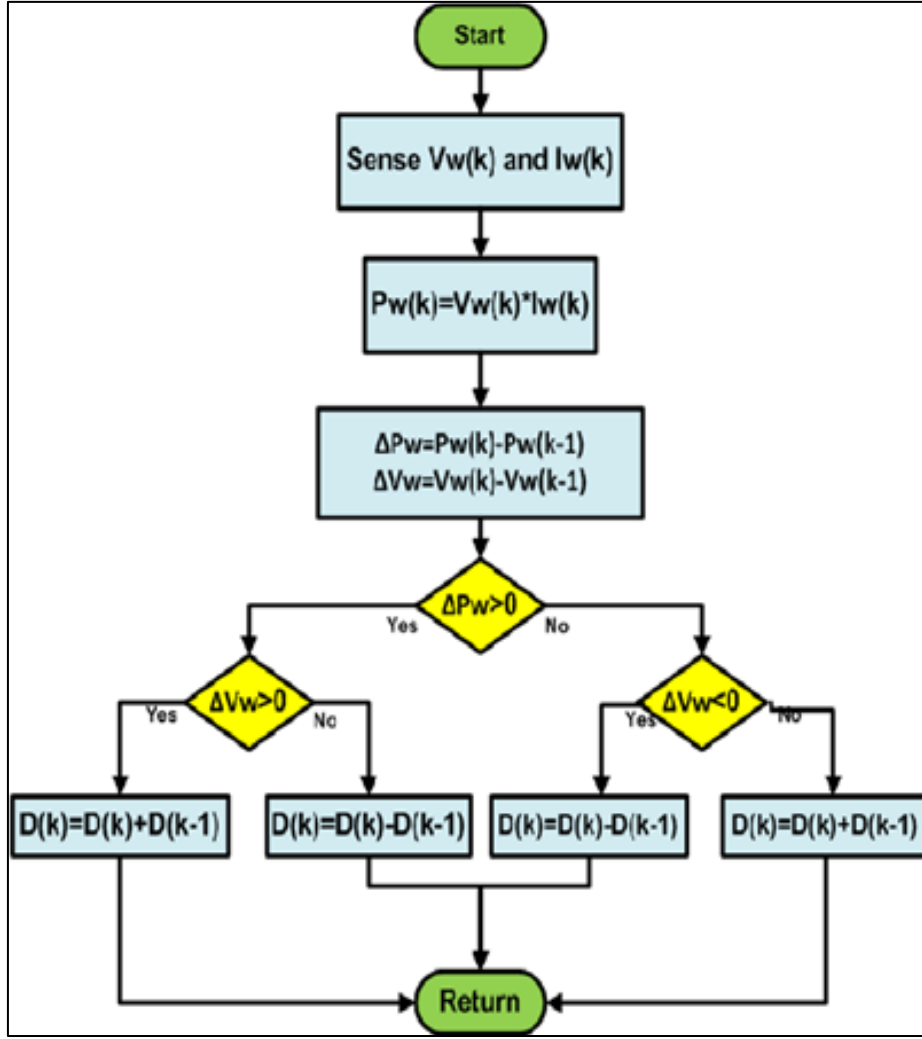


Şekil 4.4. Modellenen rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi



Şekil 4.5. Rüzgar türbini sistemi için güç dönüştürücü arabirimi ve MPPT

Kullanılan P&O tekniğinin akış şeması Şekil 4.6'da görülmektedir. Akış şemasından da görülebileceği gibi, rüzgar türbininin çıkış gerilimi ve akımı algılanır. Bu değerler kullanılarak o andaki türbin gücü hesaplanır. Ardından önceki adımda hesaplanan türbin gücü ve ölçülen türbin gerilimi değerleri kullanılarak türbin gücü ve türbin gerilimindeki değişimin yönü tespit edilir. Bu değişimin yönüne göre sonraki adım yani rüzgar türbininden talep edilen gücün artırılması veya azaltılması yönünde belirlenir. Buna göre DA-DA boost dönüştürücünün anahtarlama oranı artırılır veya azaltılır. Bu işlem çalışma süresince devam ettirilir.



Şekil 4.6. Tezde kullanılan P&O algoritmasının akış şeması

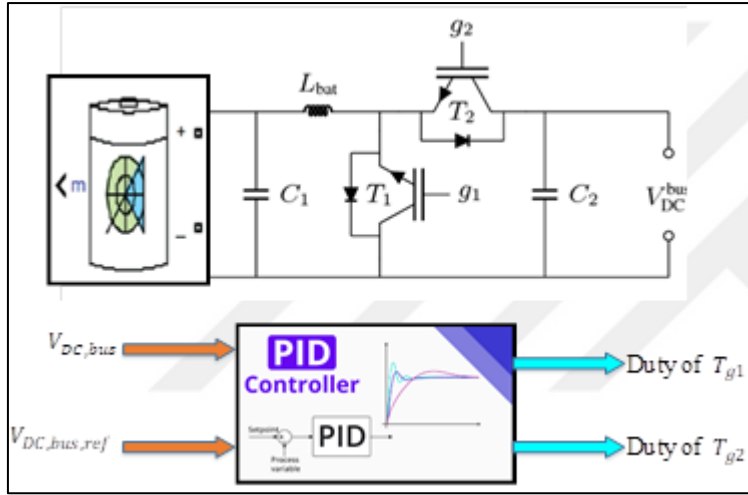
Önerilen mikro şebeke modelindeki rüzgar türbininde kullanılan DA-DA boost dönüştürücünün parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. DA-DA boost dönüştürücü parametreleri

Parametre	Değer
L	1 mH
C_1	1000 μF
f_s	5000 Hz
C_2	2200 μF
D_{max}	0,65

4.3. Li-ion Batarya Modeli

Enerji üretimi, yük talebini veya çıkış gücü referansını karşılamak için yeterli olmadığında, enerji depolama birimleri, üretim ve talebi dengede tutmak için sistemi yedek güç kaynağı olarak destekler [27]. Üretilen güç talepten yüksekse, kalan güç depolama birimini şarj etmek için kullanılır. Bu çalışmada 500 Ah kapasite ve 400 V Li-ion batarya bazlı enerji depolama sistemi kullanılmıştır. Li-ion batarya ünitesi, çift yönlü DA/DA dönüştürücü ve sistemin şarj ve deşarj durumlarını kontrol eden bir denetleyici içeren enerji depolama sistemi Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Enerji depolama sisteminin modeli

Çift yönlü DA/DA dönüştürücü, bataryanın şarj ve deşarj süreçlerini kontrol eder. Önerilen sistemde, batarya üretim ile tüketim arasındaki dengeyi her koşulda sağlamak için tasarlanmıştır. Bu nedenle, ortak DA bara gerilimini istenen seviyede tutmak için kontrol edilmektedir. Üretilen güç talepten fazla olduğunda yani üretim gücü daha yüksek olduğunda çift yönlü dönüştürücü buck dönüştürücü modunda çalışır ve bu artı kalan güç ile bataryaları şarj eder. Bu çalışma modunda, T_1 anahtarı 'İLETİMDE (ON)' durumunda tutulur ve denetleyici tarafından üretilen PWM sinyali T_2 anahtarına uygulanır. Yükler tarafından talep edilen toplam güç miktarı toplam üretim birimlerinin üretebildikleri güç değerinden daha yüksek olduğunda, dönüştürücü boost dönüştürücü modunda çalışır ve bataryalardan ortak DA baraya enerji verir. Bu modda, T_2 anahtarı 'İLETİMDE (ON)' konumunda tutulur ve denetleyici tarafından üretilen PWM sinyali T_1 anahtarına uygulanır. Bataryaya şarj edilmesi veya bataryadan boşaltılması gereken enerji, denetleyici tarafından

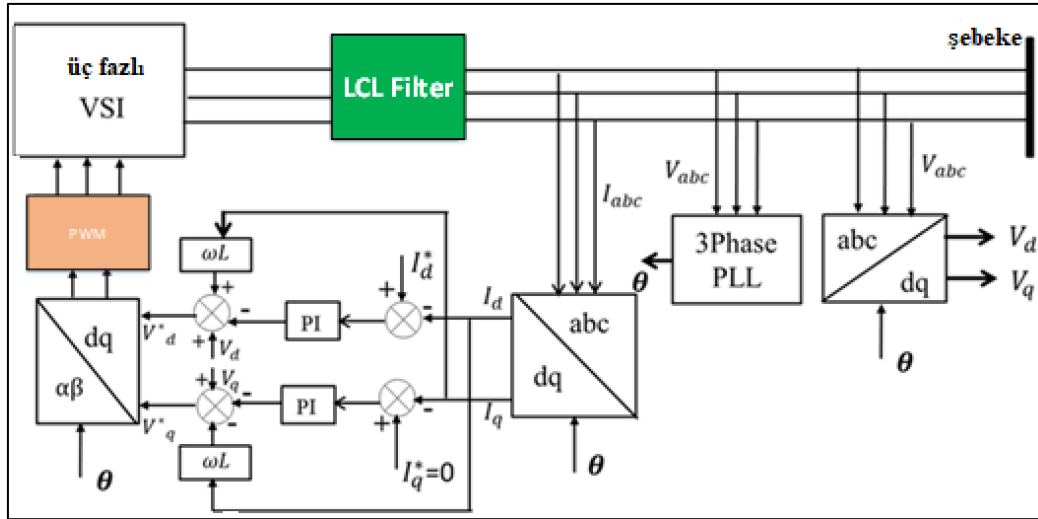
belirlenir. Anlık DA bara gerilim seviyesi ile istenen DA bara gerilimi seviyesi arasındaki fark, denetleyicinin giriş değişkenidir. Tasarlanan PI denetleyici, bu gerilim hata değerini kullanarak batarya için şarj-deşarj akımı referansını belirler. Tasarlanan ikinci bir PI denetleyicisi her an batarya akımı ile bu akım referansı değerini kontrol ederek referans akım sinyalinin izlenmesi için gerekli olan anahtarlama sinyallerini üretir. İki PI denetleyicisi, daha düşük ve daha yüksek şarj durumu (SoC) sınırları olan bir enerji yönetim sistemi gibi çalışır. Enerji yönetim sisteminin ana hedefleri aşağıda listelenmiştir:

- Enerji talebini karşılamak,
- Yenilenebilir enerji üretimini iyileştirmek,
- Li-ion batarya sisteminin performansını artırmak,
- DA bara gerilimini sabit tutmak.

4.4. Şebeke Bağlantılı Evirici

Önerilen mikro şebeke modelinde, PV modüller, rüzgar türbini ve Li-ion tabanlı enerji depolama ünitesi ortak DA barasına bağlıdır. Şebekeye bağlı bir evirici, DA barası ile şebeke arasında bir arayüz görevi görecek ve güç akışını kontrol edecek şekilde tasarlanmıştır. Bu sistemdeki güç akışı çift yönlü yapılabilecektir.

Şebeke bağlantılı eviricilerin şebekeye bağlanabilmek için karşılaması gereken bazı koşullar vardır. Bunların en temel olanı, şebeke geriliminin faz ve frekansı ile senkronizasyondur. Bu gerekli gerçek gücü şebekeye iletmek için gereklidir. Ayrıca eğer reaktif güç desteği yapılacaksa yine şebeke faz ve frekansı ile senkronizasyon kararlı bir kontrol için gereklidir.



Şekil 4.8. Evirici modeli

Bu çalışmada senkron referans düzleminde bir PI denetleyici tasarlanmış ve şebeke bağlantılı eviricinin kontrolünde kullanılmıştır. Önerilen yöntemin blok diyagramı Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi güç dönüştürücü topolojisi olarak VSI kullanılmıştır. Şebekenin çıkış gerilimini ve akımı algılanır ve Park ve Clark dönüşümü kullanılarak abc düzleminin dq düzlemine dönüştürülür. Faz kilitleme döngüsü (PLL), şebeke gerilimini faz ve frekans verilerini elde etmek ve bunlar ile senkron bir referans sinyali oluşturmak için kullanılır. PI denetleyicileri, I_d ve I_q akımlarını kontrol etmek için kullanılır. DA/AA eviricinin modellenmesinde ve denetlenmesinde kullanılan denklemler Denklemler (4.5)-(4.8)'te verilmektedir [26].

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos(\theta - \theta^*) \\ V_m \sin(\theta - \theta^*) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \omega L \begin{bmatrix} -I_q \\ I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{id} \\ V_{iq} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$V_{id} = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(I_d^* - I_d) + \omega L I_q + V_d \quad (4.7)$$

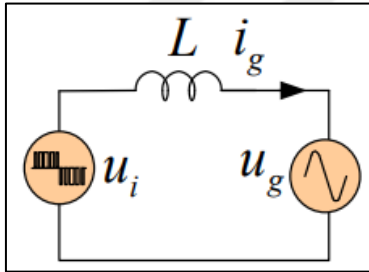
$$V_{iq} = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(I_q^* - I_q) - \omega L I_d + V_q \quad (4.8)$$

Burada R ve L filtre direnci ve endüktans değeri; V_d ve V_q şebeke gerilimlerinin d - ve q -

eksen bileşenleri; V_m şebeke geriliminin tepe değeri, θ şebeke gerilimi faz açısı; θ^* PLL ile izleme açısı; ω açısal frekans; V_{id} ve V_{iq} VSI eviricinin d - ve q -eksen bileşenleri; K_p ve K_i PI denetleyicinin sırasıyla oransal ve integral kazançlarıdır. Ayrıca, I_d^* , I_d akım bileşeni referans değeri iken I_q^* , I_q akım bileşenin referans değeridir.

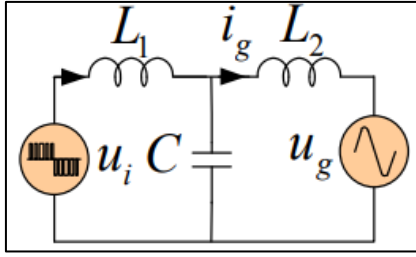
Daha önce de belirtildiği gibi VSI topolojisi, şebeke bağlantılı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu topoloji, sürücü tarafından üretilen harmonik bozulmayı azaltmak ve çıkış gerilimi dalga biçimindeki Toplam Harmonik Bozulma (THD) seviyesini azaltmak için çeşitli filtre türleri kullanır. VSI topolojisinde kullanılan yaygın filtre türleri şunlardır:

- 1- L Filtre: Evirici çıkışına bağlı bir indüktörden oluşmaktadır. Basit yapılı olmaları ve kararlılığı tehdit edecek kompleks kutuplarının bulunması gibi özellikleri nedeniyle şebeke etkileşimli eviriciler için uygun bir yapıdır ve yaygın biçimde kullanılır. Ancak, etkin bir filtreleme etkisi üretmek için kullanılması gereken filtre indüktörünün değerinin büyük olması gerekmektedir. Bu sistemin toplam boyutunu ve maliyetini arttırırken verimini düşürür.



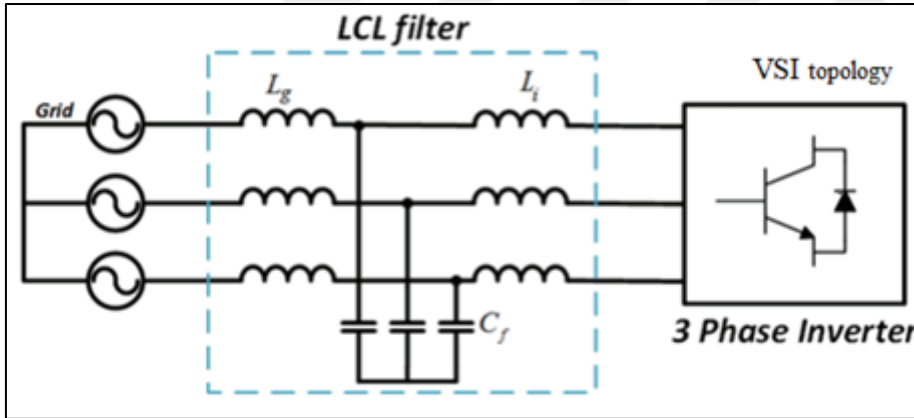
Şekil 4.9. L filtre

- 2- L-C Filtre: L-C filtre, seri bağlı bir indüktör ve kondansatörden oluşan pasif bir filtredir. Bu filtre THD seviyesini düşürmede etkilidir, ancak nispeten büyük bir boyuta ve yüksek maliyete sahiptir. Bu filtre yapısı kesintisiz güç kaynağı ve ada modunda çalışan yenilenebilir enerji kaynağı uygulamaları için etkin bir çözümdür. Ancak, şebeke etkileşimli evirici uygulamalarında filtrenin rezonans frekansı filtre elemanlarının (L ve C) yanı sıra hat indüktansı değerine bağlı olmaktadır. Bu durum, hat endüktansı ile filtre rezonans frekansının değişmesi durumunu dolayısıyla da öngörülmeeyen rezonans riskini ortaya çıkarır. Bu nedenle şebeke etkileşimli VSI uygulamalarında kullanılmazlar.



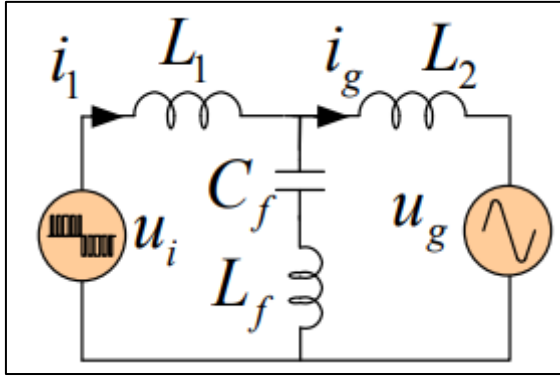
Şekil 4.10. LC filtre

- 3- LCL Filtre: LCL filtresi, seri bağlı iki indüktör ve bir kondansatörden oluşan pasif bir filtredir. Bu filtre L filtreye göre daha küçük boyut ve maliyete sahiptir. LCL filtresi, düşük THD seviyelerinin gerekli olduğu yüksek güçlü uygulamalarda kullanılır. Ancak, sahip olduğu kompleks kutuplar sönümsüz bir osilasyon oluşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle bu osilasyonun sönümlenebilmesi için ek tedbirler alınması gereklidir. Bu amaçla aktif ve pasif sönümlenme yöntemleri geliştirilmiştir.



Şekil 4.11. Bağlı üç fazlı şebeke için bir LCL filtresinin yapısı.

- 4- LLCL Filtre: Son yıllarda endüstriyel uygulamalarda kullanılmaya başlayan bir tür tuzak filtredir. Yapı olarak LCL filtre ile benzer olsa da ondan farklı olarak küçük bir indüktör filtre kondansatörüne seri bağlanır. Böylece anahtarlama frekansında ortaya çıkan baskın harmonik bileşeni filtre edecek bir L_f - C_f seri rezonans devresi oluşturulmaktadır. Böylece filtrede kullanılan toplam indüktör ve toplam kapasitör değeri azaltılabilmektedir. Ancak LCL filtredesine benzer şekilde LLCL filtre de şebekeye etkileşimli VSI'nın kararlılığını tehdit etmektedir. Bu yüksek dereceli rezonans, pasif veya aktif yöntemler kullanılarak uygun şekilde sönümlenmelidir.

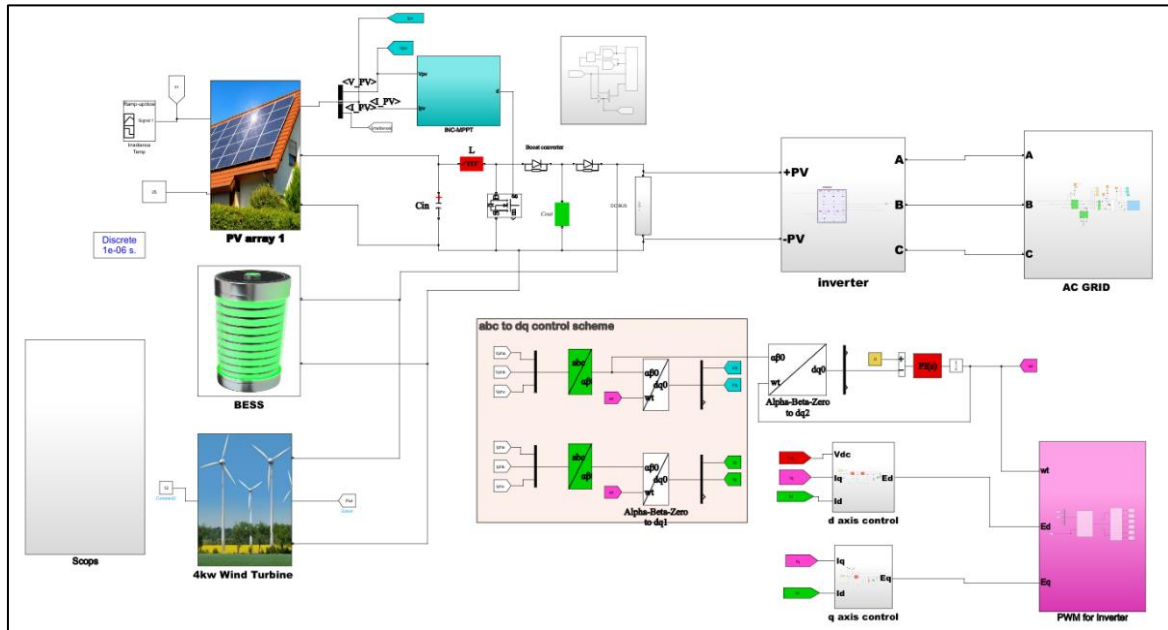


Şekil 4.12. LLCL filtre

Filtre tipinin seçimi, eviricinin güç derecesi, gereken THD seviyesi, kontrol algoritmaları ve maliyet kısıtlamaları gibi çeşitli faktörlere bağlıdır.

5. BENZETİM SONUÇLARI

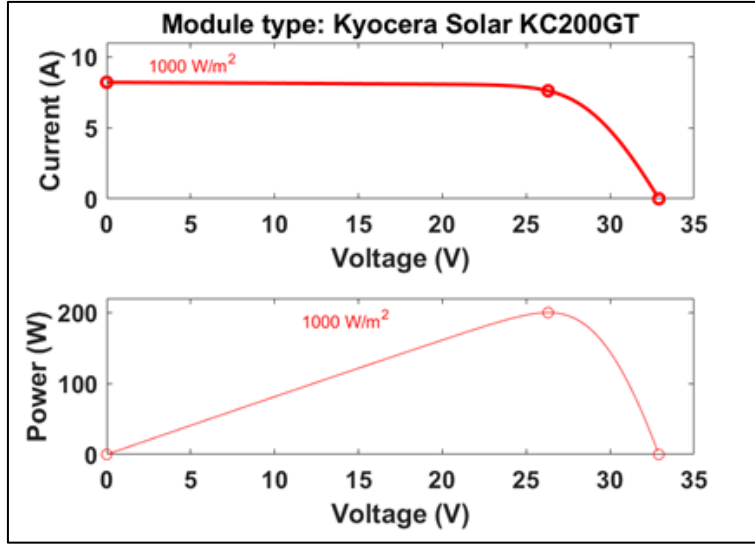
Önerilen mikro şebeke sisteminin performansını doğrulamak ve test etmek için bir Şekil 5.1'de verilen MATLAB/Simulink modeli tasarlanmış ve benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Önerilen sistemin ve bileşenlerinin performanslarını incelemek için sabit güneş ışınımı ve rüzgar hızı koşulları ve değişken güneş ışınımı ve rüzgar hızı koşulları olmak üzere iki çalışma koşulu için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda tartışılmıştır.



Şekil 5.1. Mikro şebeke simülasyon modeli

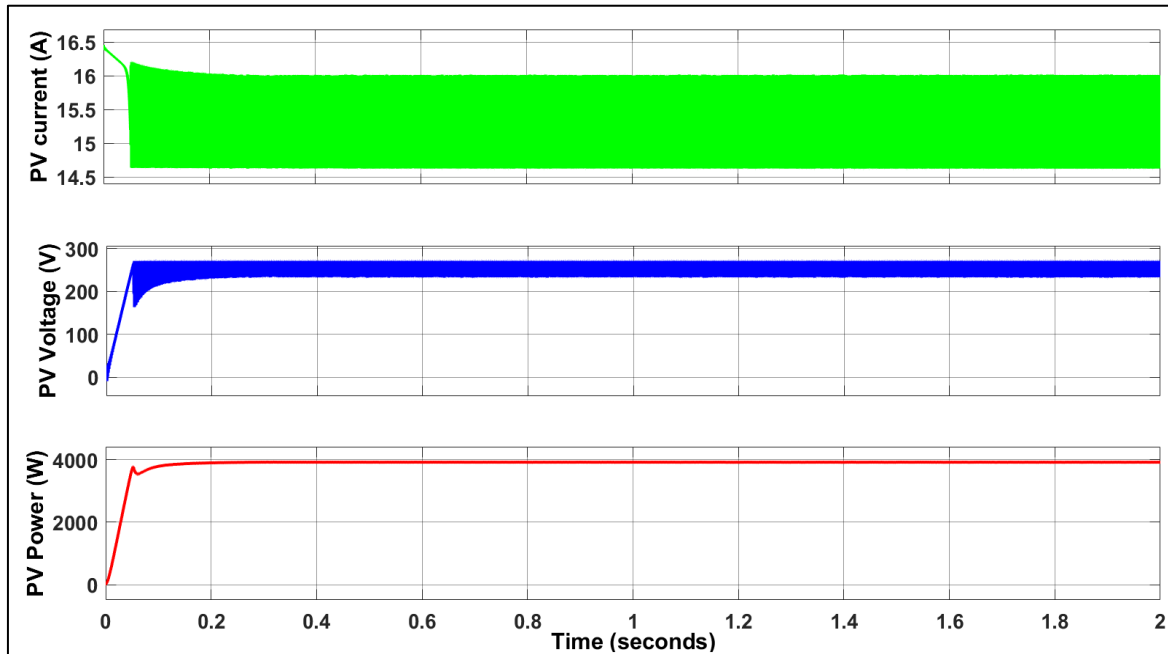
5.1. Sabit Güneş Işınım Koşulları ve Rüzgar Hızı Koşulu İçin Tasarlanan Sistemin Performansı

Bu bölümde, fotovoltaik sistem sabit doğal koşullarda (standart test koşulları (STC)) test edilmiştir. Güneş ışınım seviyesi 1000 W/m^2 ve sıcaklık değeri $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Ayrıca rüzgar türbini içinde rüzgar hızı 12 m/s 'de sabit tutulmuştur. Bu çalışmada kullanılan Kyocera KC200GT fotovoltaik modülünün STC koşulları altındaki güç-gerilim (P - V) ve akım-gerilim (I - V) değişimi eğrileri Şekil 5.2'de görülmektedir. Tasarlanan fotovoltaik sistem, 10 adet seri bağlı fotovoltaik modülden oluşan iki dizinin paralel bağlanması ile elde edilmiştir. Sistem maksimum 4 kW üretebilecek kapasitedir.



Şekil 5.2. KC200GT PV modülünün P-V ve I-V eğrileri

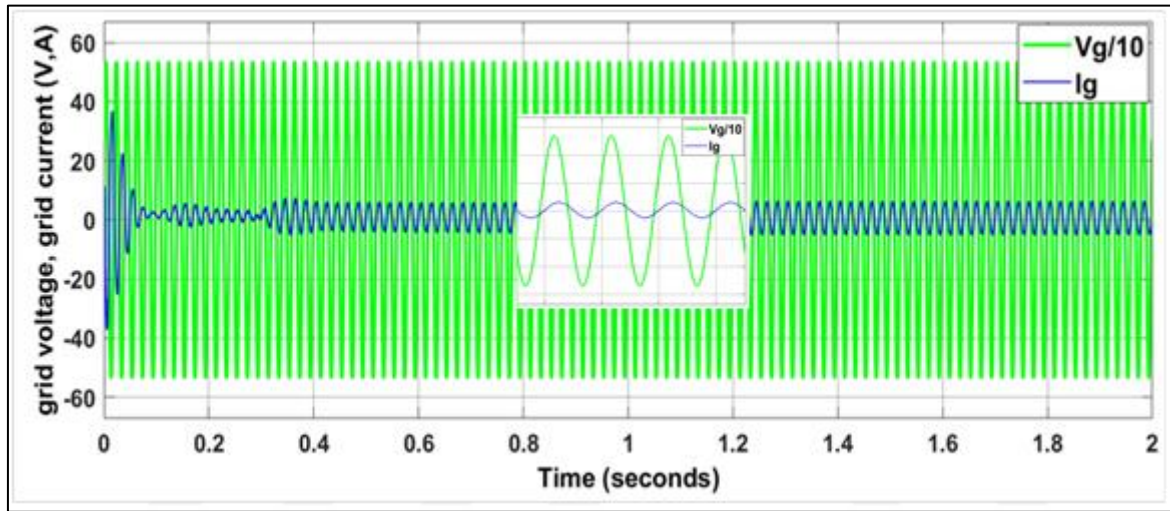
Bu fotovoltaik sistemin sisteminin çıkış gerilimi, akımı ve gücü Şekil 5.3'de gösterilmektedir. Benzetim sonuçları incelendiğinde sabit ışınlım ve çalışma sıcaklığı koşulu için sistemin maksimum gücü üretebildiği ve kararlı bir çalışmanın elde edildiği görülmektedir.



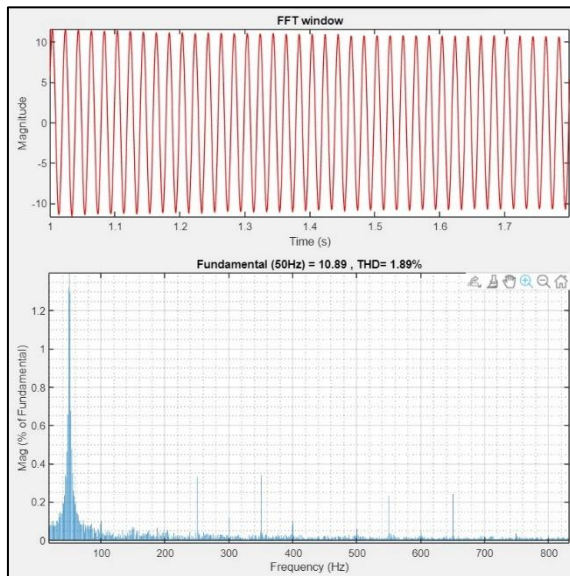
Şekil 5.3. STC koşullarında fotovoltaik sisteminin benzetim sonuçları

Sistemin şebeke ile arayüzünü oluşturan şebeke bağlantılı eviricinin çalışması yine bu sabit koşullar için test edilmiştir. Evirici çıkışında yüksek frekanslı anahtarlama frekansı

nedeniyle oluşabilecek bileşenlerin filtre edilebilmesi için bir LCL filtre kullanılmıştır. Şebekeye aktarılan akım ve şebeke gerilimi Şekil 5.4'te verilmiştir. Şekilden senkron referans düzleminde tasarlanan PI akım denetleyicisi ile kontrol edilen akım sinyalinin referans sinyali başarıyla takip ettiği görülmektedir. Ayrıca şebekeye aktarılan akım sinyali sinüzoidal dalga biçimindedir ve şebeke gerilimi ile aynı fazda ve frekanstadır. Akımın THD seviyesi %1,89 (<%5) olarak elde edilmiştir. Şebekeye enjekte edilen akımın harmonik spektrumu Şekil 5.6'da verilmiştir. Böylece birim güç faktöründe çalışma sağlanmıştır.

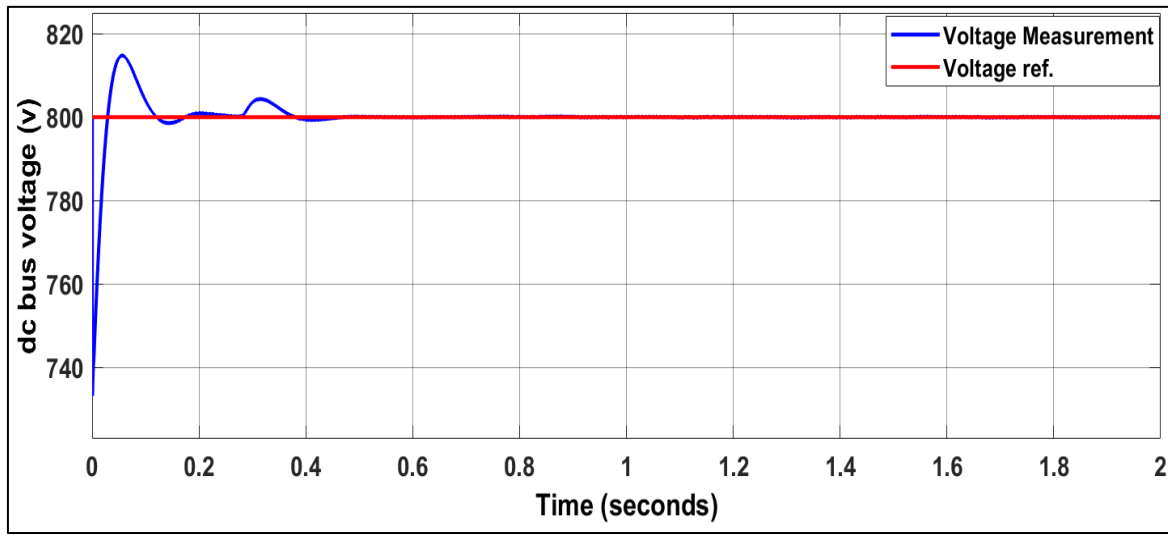


Şekil 5.4. Sabit hava koşullarında evirici çıkış akımı ve şebeke gerilimi



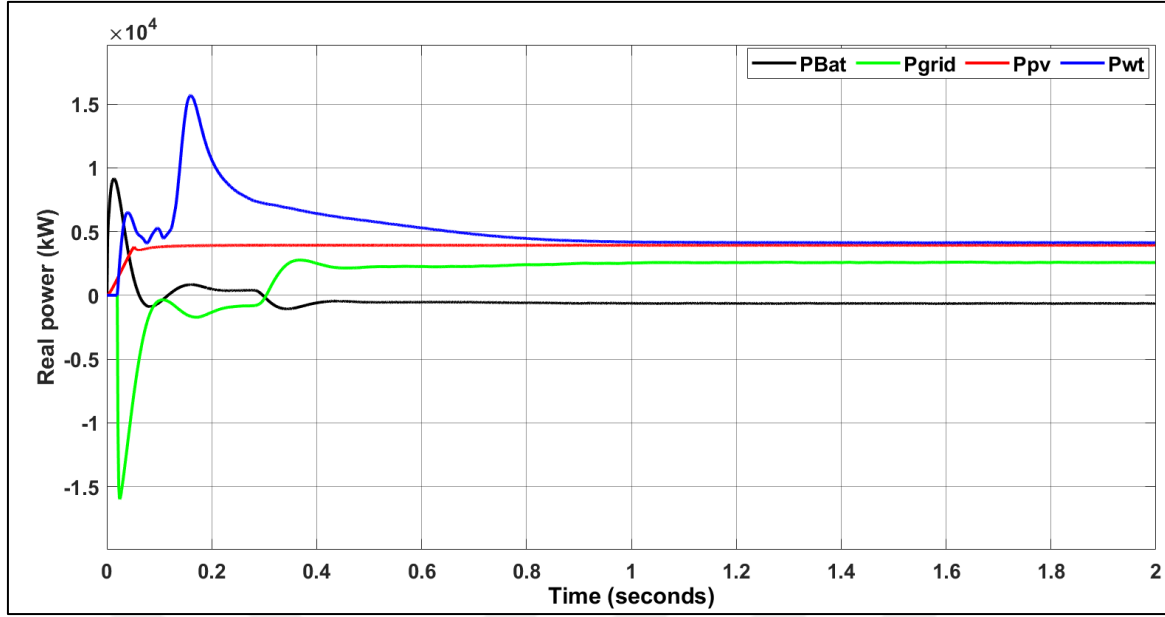
Şekil 5.5. Akımın THD seviyesi

Enerji yönetim sistemi ve Li-ion batarya tabanlı enerji depolama sisteminin amacı, referans değerinde (800V) sabit bir ortak DA bara gerilimi elde etmek ve yüklere ve şebekeye sürdürülebilir bir güç aktarımını sağlamaktır. Tasarlanan sistemdeki DA bara gerilimi Şekil 5.6'da referans sinyali ile birlikte verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi önerilen sistem ve tasarlanan denetleyiciler hızlı bir dinamik performans ve üstün bir kalıcı durum performansı sağlamıştır. Ortak DA bara geriliminde kalıcı durum hatası bulunmamaktadır. Benzer şekilde gerilimde ortaya çıkan maksimum aşım oranı çok düşüktür (%0,025). Ayrıca kalıcı durumda orta DA bara gerilimindeki dalgalanma değeri çok düşüktür ($\Delta V=2$ V).



Şekil 5.6. DA bara gerilimi

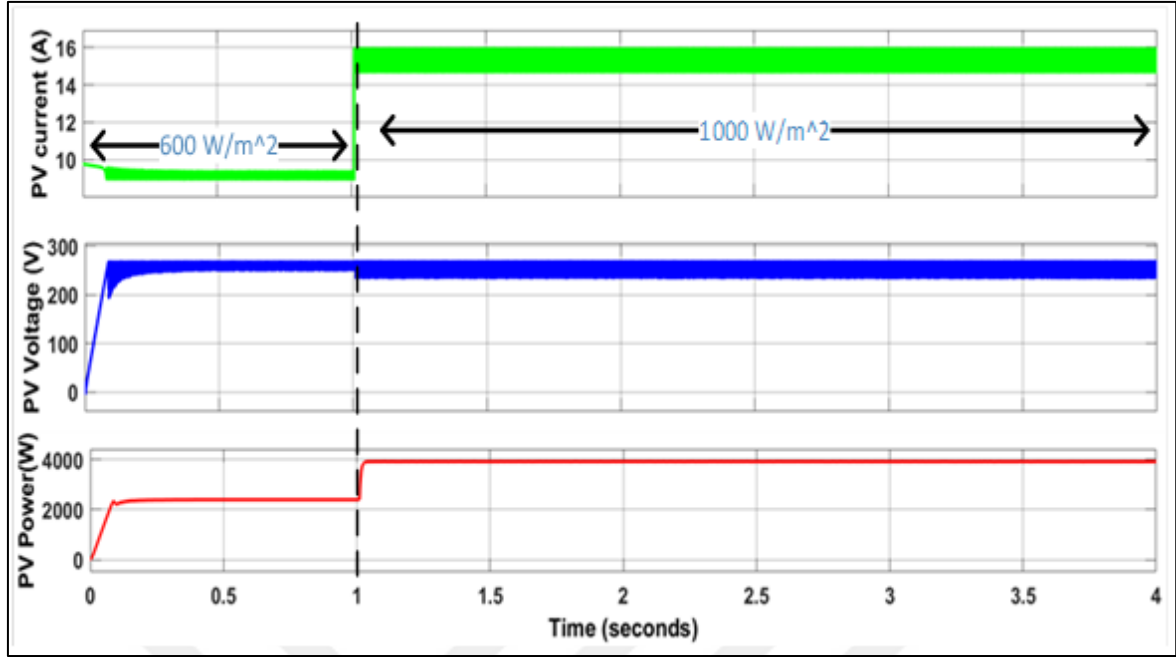
Önerilen mikro şebekedeki her bir kaynağın çıkış gücünün değişimi Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi fotovoltaik sistem ve rüzgar türbini için çıkış gücü 4 kW'dır. Ayrıca batarya gücü de negatiftir. Bu bataryanın şarj olduğunu göstermektedir. Bu çalışma koşulu durumda, fotovoltaik sistem ve rüzgar türbini şebekeye giden gücü desteklemekte ve ayrıca bataryayı şarj etmektedir.



Şekil 5.7. Enerji depolama birimi, fotovoltaik sistem, rüzgar türbini ve şebekeye aktarılan güç eğrileri

5.2. Tasarlanan Sistemin Değişken Güneş Işınımı Koşulları ve Rüzgar Hızı Koşullarındaki Performansı

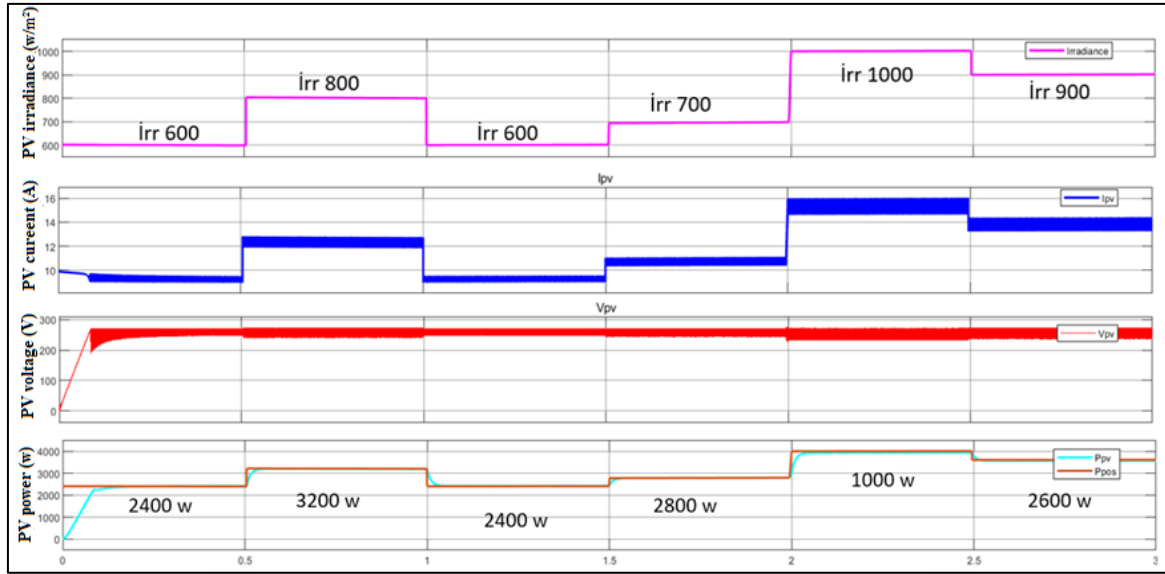
Mikro şebekenin performansı, değişken çalışma koşulları için de test edilmiştir. Güneş ışınlamı $t=1$ s anında 600 W/m^2 'den 1000 W/m^2 'ye yükseltilmiştir. Bu koşul için fotovoltaik sisteminin çıkış gerilimi, akımı ve gücünün değişimi Şekil 5.7'de verilmiştir. Görüldüğü gibi ışınlam değeri 600 W/m^2 değerinde iken 2400 W civarı olan fotovoltaik sistem gücü, ışınlamın 1000 W/m^2 değerine arttırılmasıyla 4000 W civarına yükselmiştir. Işınımın ani olarak değiştirildiği $t=1$ s anındaki güç değişimi incelenirse önerilen MPPT yöntemi ve DA-DA boost dönüştürücünün hızlı tepki verdiği, maksimum güç noktası etrafında minimum salınıma neden olduğu görülmektedir.



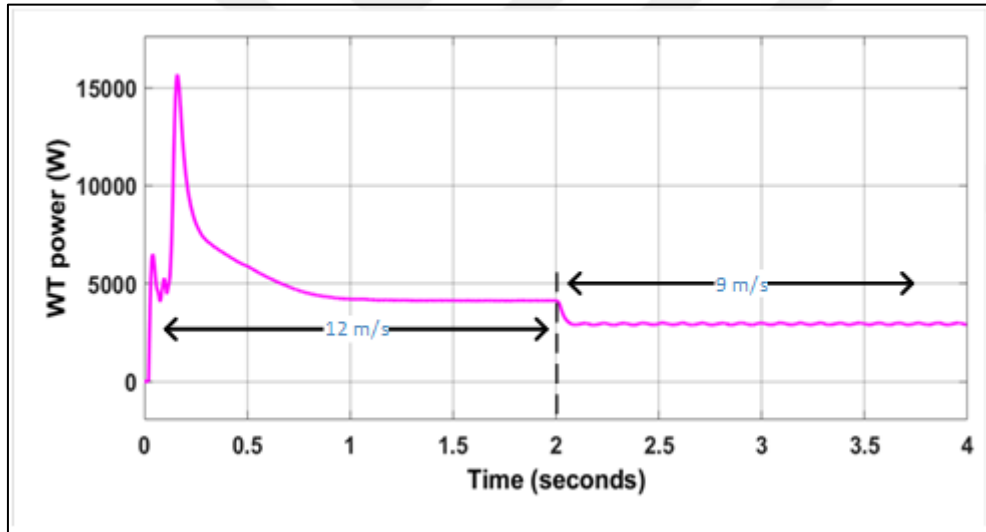
Şekil 5.8. Güneş ışınlamı değişiminin fotovoltaik sisteme etkileri

Sistemin dinamik tepkisini test etmek için güneş ışınlamı miktarında daha farklı değişimler uygulanmış ve bu koşullarda fotovoltaik sistemin tepkisi dolayısıyla MPPT performansı incelenmiştir. Şekil 5.9'da, $t=0.5$ s anında ışınlamı miktarı 600 W/m^2 'den 800 W/m^2 'ye yükseltilmiştir ve 2400 W güç elde edilmiştir. $t=1$ s anında ışınlamı miktarı 800 W/m^2 'den 600 W/m^2 'ye düşürülmüştür ve fotovoltaik sistem gücü 3200 W olarak elde edilmiştir. $t=1.5$ s anında ışınlamı miktarı 600 W/m^2 'den 700 W/m^2 'ye yükseltilmiştir ve fotovoltaik sistem gücü 2800 W elde edilmiştir. $t=2$ s anında ışınlamı miktarı 700 W/m^2 'den 1000 W/m^2 'ye yükseltilmiştir ve fotovoltaik sistem gücü 4000 W olarak elde edilmiştir. $t=2.5$ s anında ışınlamı miktarı 1000 W/m^2 'den 900 W/m^2 'ye düşürülmüştür ve fotovoltaik sistem gücü 3600 W olarak elde edilmiştir.

Benzer şekilde, rüzgar hızı $t=2$ s anında 12 m/s 'den 9 m/s değerine düşürülmüştür. Rüzgar türbininin çıkış gücü Şekil 5.9'da verilmiştir. Görüldüğü gibi tasarlanan DA-DA boost dönüştürücü ve P&O maksimum güç takibi algoritması sayesinde rüzgar türbini değişik rüzgar hızı koşullarında üretebileceği maksimum güç değerini üreterek sisteme sağlamaktadır. Rüzgar hızı düştüğünde üretim kapasitesi düşen rüzgar türbinin aşırı yüklenmesi ve bu nedenle verimsiz çalışması veya etkin çalışamaması durumu engellenmiştir.



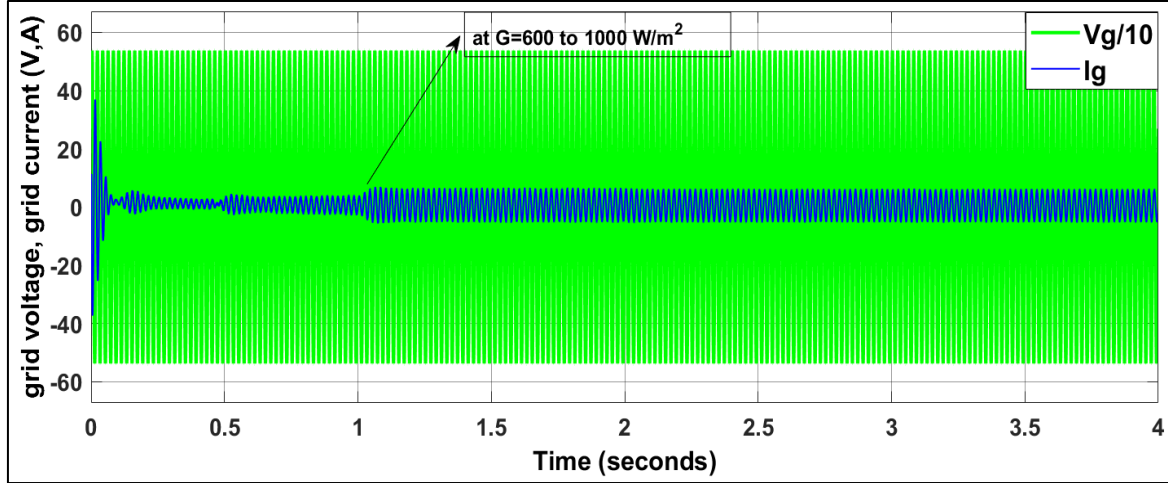
Şekil 5.9. Farklı ışınlım MPPT performansı incelenmek



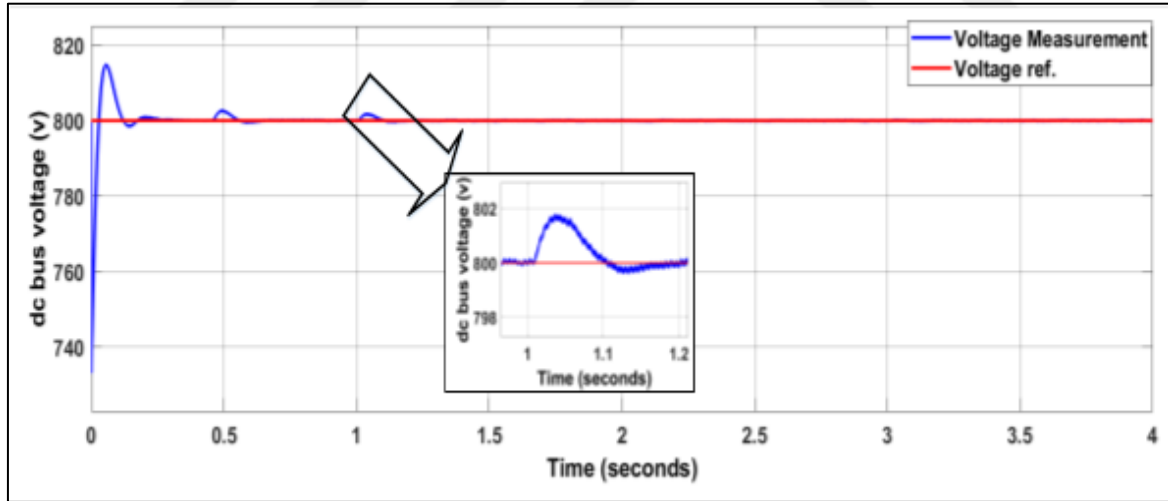
Şekil 5.10. Rüzgar Hızı Değişimi ile Rüzgar Türbini Çıkış Gücü Değişimi

Değişken ışınlım ve rüzgar hızı koşulları altında, şebekeye aktarılan akım Şekil 5.11'de gösterilmiştir. Şekilden kolaylıkla görülebileceği gibi her çalışma koşulu için şebekeye aktarılan akımın dalga formu sinüzoidal biçimdedir. Ayrıca şebekeye aktarılan akımın şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekansta olduğu gözlemlenmiştir. $t=1$ s anında, ışınlımın dolayısıyla elde edilmesi mümkün fotovoltaiik sistem gücünün artırılması ile evirici çıkış gücü de artmaktadır. Bu durumda ortak DA bara gerilimi Şekil 5.12'de görüldüğü gibi sabit tutulmuştur. Bara gerilimi atmosferik koşullarda ani bir değişiklik olsa bile önerilen enerji yönetim sistemi ile dengelenmiştir. Bu çalışma koşullarında bataryanın tepkisi, şarj ve deşarj

durumu Şekil 5.13’de görülmektedir. Görüldüğü gibi rüzgar hızı, güneş ışınlam seviyesi ve sıcaklığa göre yenilenebilir kaynakların ürettikleri güç miktarı değiştikçe o andaki yük gücü talebine göre batarya tabanlı enerji depolama sistemi şarj veya deşarj modunda çalışarak sistemde üretim-tüketim dengesini sağlamaktadır.



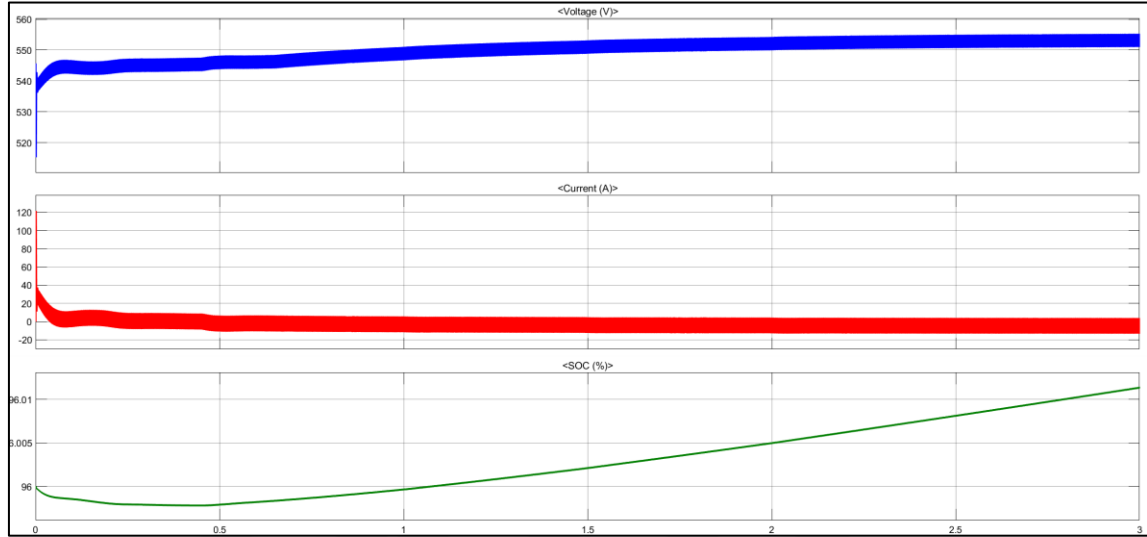
Şekil 5.11. Değişken hava koşulları için şebeke gerilimi ve şebekeye aktarılan akım grafiği



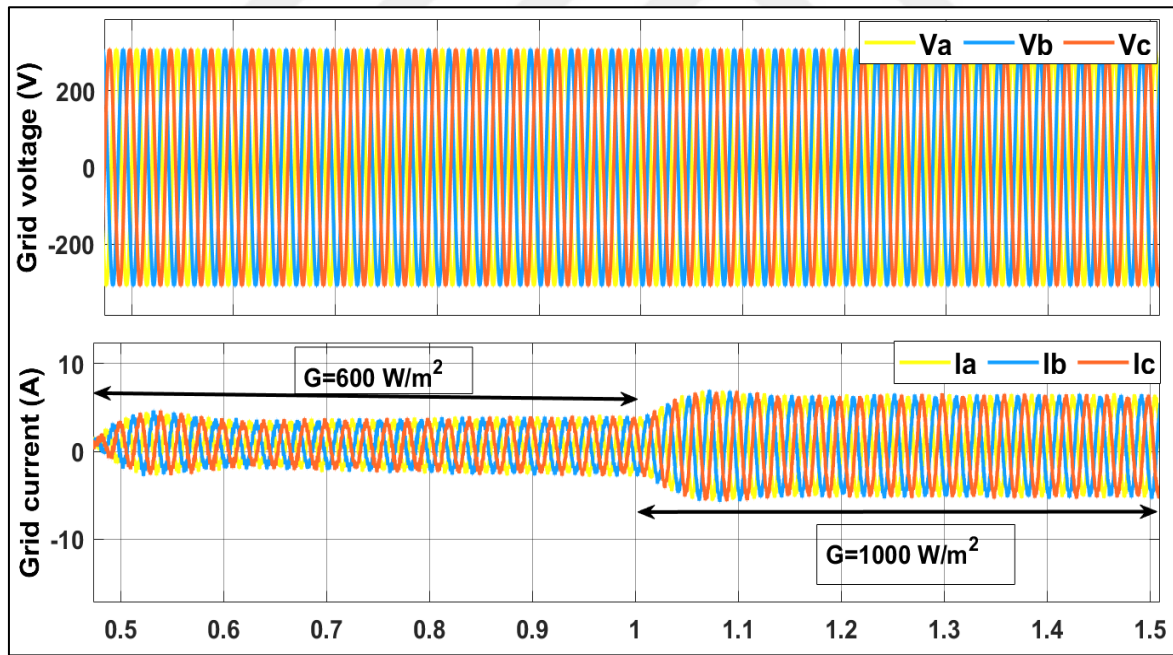
Şekil 5.12. Farklı çalışma koşulları için DA bara gerilimi

Bu çalışma koşulları için üç fazlı şebekeye gerilimleri ile şebekeye aktarılan üç faz akımlarının dalga şekilleri Şekil 5.14’de verilmektedir. Bu şekilde gösterildiği gibi şebekeye aktarılan akım, hava koşullarına göre değişen fotovoltaik sistem ve rüzgar türbini güçlerinin miktarı ile orantılıdır. Ayrıca, Şekil 5.15’de sistem bileşenlerinin her birinin güç değerlerinin

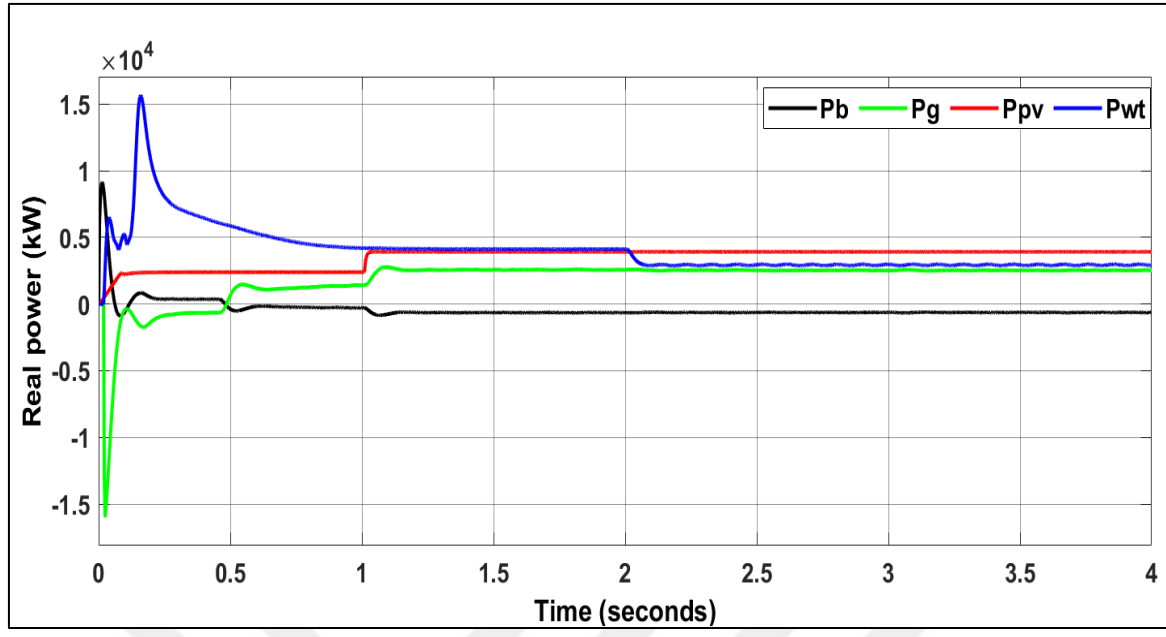
değişimleri gösterilmektedir. Görüldüğü gibi fotovoltaik sistem ve rüzgar türbini hem şebekeye enerji aktarmakta hem de batarya grubunu şarj etmektedir.



Şekil 5.13. Bataryanın şarj ve deşarj durumu.



Şekil 5.14. Değişken hava koşulları için üç fazlı şebeke gerilimi ve şebekeye aktarılan akımlar



Şekil 5.15. ESS, PV, WT ve şebeke'nin çıkış gücü değişimleri

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, fotovoltaik modüllerden, rüzgar türbini ve Li-Ion batarya içeren enerji depolama ünitesinden oluşan şebekeye bağlantılı bir mikro şebeke sistemi tasarlanmıştır. Ayrıca, bu sistemi oluşturan her birim için yerel denetleyiciler ve tüm sistemin dengeli ve kararlı biçimde çalışması için bir enerji yönetim sistemi tasarlanmıştır. Enerji depolama ünitesi kullanılarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının performansı, dolayısıyla mikro şebekenin genel performansı doğal değişkenlik içeren atmosferik koşullardan bağımsız olarak artırılmıştır. Enerji yönetim sistemi, sistemdeki üretim/talep dengesinin korunmasını sağlamaktadır. Bu sistem, batarya şarj veya deşarj gücü ile ve bataryanın çalışma modunu (şarj/deşarj) kontrol ederek, ortak DA bara gerilimini sabit tutmuş ve böylece üretim/talep dengesini sağlamıştır.

Önerilen sistem MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve sistemin performansını test etmek için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, her bir kaynak için önerilen denetleyicinin farklı çalışma koşullarında başarılı olduğunu ve bu nedenle önerilen eviricinin şebekeye yüksek güç kalitesi ile güç sağlayabildiğini göstermiştir. Ayrıca, önerilen MPTT teknikleri ile rüzgar türbini ve PV sisteminin verimliliği artırılmış ve farklı çalışma koşullarında dahi bu sistemlerden mümkün olan en yüksek güç miktarının alınabilmesi sağlanmıştır. Mikro şebekenin verimliliği, enerji depolama ve enerji yönetim sistemi kullanılarak yenilenebilir enerjilerin yönetilmesiyle artırılmıştır. Sonuç olarak, tasarlanan sistemdeki DA bara geriliminin kararlılığı arttırılarak mikro şebekenin kararlı durum ve dinamik performansı iyileştirilmiştir.



KAYNAKLAR

1. İnternet: TEİİAS (2023). Web: <https://www.teias.gov.tr/kurulu-guc-raporlari>, Son Erişim Tarihi: 06/03/2023.
2. Abusara, M. A., Sharkh, S. M. and Guerrero, J. M. (2015). Improved droop control strategy for grid-connected inverters. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 1, 10-19.
3. Sefa, İ. and Altın, N., (2006). *Simulation of current controlled grid interactive inverter*, TPE-2006 3rd Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering, Ankara, 12-15.
4. Sefa, İ. and Altın, N. (2009). Grid interactive photovoltaic inverters- a review, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 24(3), 409-424.
5. Gao, W., Zheglov, V., Wang, G. and Mahajan, S. M. (2009). *PV-wind-fuel cell-electrolyzer micro-grid modeling and control in Real Time Digital Simulator*. 2009 International Conference on Clean Electrical Power, Capri, 29-34.
6. Gonzalez, A. A., Bottarini, M., Vechiu, I., Gautier, L., Ollivier, L. and Larre, L. (2019). *Model predictive control for the energy management of a hybrid PV/battery/fuel cell power plant*. 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), Porto, 1-6
7. Khalilian, M. and Guglielmi, P. (2016). *Single-stage grid-connected flyback inverter with zero current switching for AC module application*. IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Florence, 2390-2395.
8. Watanabe, H. and Itoh, J. I. (2017). *Isolated single-phase AC grid connected converter with small inductors and capacitors for micro-inverters*. 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, 1542-1549.
9. Hassan, S. Z., Li, H., Kamal, T., Arsalan, A. and Lawan, A. U. (2016). *Performance of grid-integrated Wind/Microturbine/battery Hybrid renewable power system*. 2016 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Melaka, 78-83.
10. Islam, H., Mekhilef, S., Shah, N. M., Soon, T. K., Wahyudie, A. and Ahmed, M. (2021). Improved proportional-integral coordinated MPPT controller with fast tracking speed for grid-tied PV systems under partially shaded conditions. *Sustainability*, 13(2), 830.
11. Saidi, A. S., Salah, C. B., Errachdi, A., Azeem, M. F., Bhutto, J. K. and Ijyas, V. T. (2021). A novel approach in stand-alone photovoltaic system using MPPT controllers & NNE. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1973-1984.
12. Zhang, B., Wu, W., Gao, N., Koutroulis, E., Chung, H. S. H. and Blaabjerg, F. (2021). *Finite Control Set-Model Predictive Control Based on Deadbeat Control for LCL-Type Grid-connected Inverters*. 2021 IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS), Shanghai, 1-6.

13. Tong, W. (2016). *A new control method for inverters parallel operation in microgrid*. 2016 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), Beijing, 769-773.
14. Agrawal, M. and Mittal, A. (2011). Micro grid technological activities across the globe: A review. *International Journal of Applied Science*, 7(2), 147-152.
15. Basak, P., Chowdhury, S., nee Dey, S. H. and Chowdhury, S. P. (2012). A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5545-5556.
16. Dohn, R. L. (2011). The business case for microgrids. <https://www.semanticscholar.org/paper/The-business-case-for-microgrids-White-paper-%3A-The-Dohn/bcda54b9f2c4b83873db4d5c3bbc13e05b4e782e>. White paper: The new face of energy modernization. Siemens AG.
17. Ko, S. H., Lee, S. R., Dehbonei, H. and Nayar, C. V. (2006). Application of voltage- and current-controlled voltage source inverters for distributed generation systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(3), 782-792.
18. Hartono, B. S., Budiyanto, Y. and Setiabudy, R. (2013). *Review of microgrid technology*. 2013 International Conference on QiR, Yogyakarta, 127-132.
19. Jayawarna, N., Wu, X., Zhang, Y., Jenkins, N. and Barnes, M. (2006). *Stability of a microgrid*. 2006 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives-PEMD 2006, Dublin, 316-320.
20. Majumder, R. (2013). Some aspects of stability in microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), 3243-3252.
21. Coelho, E. A., Cortizo, P. C. and Garcia, P. F. D. (1999). *Small signal stability for single phase inverter connected to stiff AC system*. Conference record of the 1999 IEEE industry applications conference. Thirty-fourth IAS annual meeting (Cat. No. 99CH36370), Phoenix, 2180-2187.
22. Coelho, E. A. A., Cortizo, P. C. and Garcia, P. F. D. (2002). Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone AC supply systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(2), 533-542.
23. Pogaku, N., Prodanovic, M. and Green, T. C. (2007). Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid. *IEEE Transactions on power electronics*, 22(2), 613-625.
24. Acevedo, S. S. and Molinas, M. (2011). *Power electronics modeling fidelity: Impact on stability estimate of micro-grid systems*. 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Perth, 1-8.
25. Herrera, L., Inoa, E., Guo, F., Wang, J. and Tang, H. (2013). Small-signal modeling and networked control of a PHEV charging facility. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(2), 1121-1130.

26. Vasquez, J. C., Guerrero, J. M., Luna, A., Rodríguez, P. and Teodorescu, R. (2009). Adaptive droop control applied to voltage-source inverters operating in grid-connected and islanded modes. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(10), 4088-4096.
27. Tabatabaee, S., Karshenas, H. R., Bakhshai, A. and Jain, P. (2011). *Investigation of droop characteristics and X/R ratio on small-signal stability of autonomous microgrid*. 2011 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, Tehran, 223-228.
28. Barklund, E., Pogaku, N., Prodanovic, M., Hernandez-Aramburo, C. and Green, T. C. (2008). Energy management in autonomous microgrid using stability-constrained droop control of inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(5), 2346-2352.
29. Ariyasinghe, D. P. and Vilathgamuwa, D. M. (2008). *Stability analysis of microgrids with constant power loads*. 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore, 279-284.
30. Jayawardena, A. V., Meegahapola, L. G., Perera, S. and Robinson, D. A. (2012). *Dynamic characteristics of a hybrid microgrid with inverter and non-inverter interfaced renewable energy sources: A case study*. 2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), Auckland, 1-6.
31. Xiao, Z. X. and Fang, H. W. (2012). Transient stability analysis of microgrids containing multiple micro sources. *Advanced Materials Research*, 403(2), 3608-3614.
32. Xiao, Z. and Fang, H. (2010). *Impacts of motor load on the transient stability of the MicroGrid*. 2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, Jinan, 2623-2627.
33. Xyngi, I., Ishchenko, A., Popov, M. and van der Sluis, L. (2008). *Protection, transient stability and fault ride-through issues in distribution networks with dispersed generation*. 2008 43rd International Universities Power Engineering Conference, Padua, 1-5.
34. Hall, D. J. and Colclaser, R. G. (1999). Transient modeling and simulation of a tubular solid oxide fuel cell. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14(3), 749-753.
35. Achenbach, E. (1995). Response of a solid oxide fuel cell to load change. *Journal of Power Sources*, 57(1-2), 105-109.
36. Chen, X., Pei, W. and Tang, X. (2010). *Transient stability analyses of micro-grids with multiple distributed generations*. 2010 International Conference on Power System Technology, Zhejiang, 1-8.
37. Jin, Q. and Li, Y. L. (2010). *A study on steady characters of inverter interfaced distributed generation in three phase symmetrical system*. 2010 International Conference on Power System Technology, Zhejiang, 1-7.
38. Altin, N. and Eyimaya, S. E. (2021). *A review of microgrid control strategies*. 2021 10th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), İstanbul, 412-417.

39. Fu, Q., Nasiri, A., Bhavaraju, V., Solanki, A., Abdallah, T. and David, C. Y. (2013). Transition management of microgrids with high penetration of renewable energy. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2), 539-549.
40. Gopalan, S. A., Sreeram, V., Iu, H. H. C., Xu, Z., Dong, Z. Y. and Wong, K. P. (2012). *Fault analysis of an islanded multi-microgrid*. 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, 1-6.
41. Mahat, P., Chen, Z., Bak-Jensen, B. and Bak, C. L. (2011). A simple adaptive overcurrent protection of distribution systems with distributed generation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(3), 428-437.
42. Nikkhajoei, H. and Lasseter, R. H. (2009). Distributed generation interface to the CERTS microgrid. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(3), 1598-1608.
43. Rajesh, K. S., Dash, S. S., Rajagopal, R. and Sridhar, R. (2017). A review on control of ac microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 814-819.
44. Memon, A. A. and Kauhaniemi, K. (2015). A critical review of AC Microgrid protection issues and available solutions. *Electric Power Systems Research*, 129, 23-31.
45. Mohammadi, J., Ajaei, F. B. and Stevens, G. (2018). Grounding the AC microgrid. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(1), 98-105.
46. Al-Ismael, F. S. (2021). DC microgrid planning, operation, and control: A comprehensive review. *IEEE Access*, 9, 36154-36172.
47. Chandra, A., Singh, G. K. and Pant, V. (2020). Protection techniques for DC microgrid-A review. *Electric Power Systems Research*, 187, 106439.
48. Altin, N., Eyimaya, S. E. and Nasiri, A. (2023). Multi-Agent-Based Controller for Microgrids: An Overview and Case Study. *Energies*, 16(5), 2445.
49. Loh, P. C., Li, D., Chai, Y. K. and Blaabjerg, F. (2012). Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(5), 2214-2223
50. Ribó-Pérez, D., Bastida-Molina, P., Gómez-Navarro, T. and Hurtado-Pérez, E. (2020). Hybrid assessment for a hybrid microgrid: A novel methodology to critically analyse generation technologies for hybrid microgrids. *Renewable Energy*, 157, 874-887.
51. Barik, A. K., Jaiswal, S. and Das, D. C. (2022). Recent trends and development in hybrid microgrid: a review on energy resource planning and control. *International Journal of Sustainable Energy*, 41(4), 308-322.
52. Hemmati, R. and Faraji, H. (2022). Resilient control of hybrid microgrid with harmonic-unbalanced loads under outages and faults. *IET Renewable Power Generation*, 16(3), 565-580.

53. Zhao, J., Wang, C., Zhao, B., Lin, F., Zhou, Q. and Wang, Y. (2014). A review of active management for distribution networks: current status and future development trends. *Electric Power Components and Systems*, 42(3-4), 280-293.
54. Arangarajan, V., Oo, A. M. T., Amanullah, C., Shafiullah, G. M. and Stojcevski, A. (2014). “*Characteristics and Applications of Energy Storage System to power network-A review*”, International Conference Renewable Energy and Sustainable Development. (ICRESD), Pune, 15-18.
55. Altin, N. (2016). *Energy storage systems and power system stability*. 2016 International Smart Grid Workshop and Certificate Program (ISGWCP), İstanbul, 1-7.
56. Vandoorn, T. L., Meersman, B., De Kooning, J. D. and Vandevelde, L. (2012). Directly-coupled synchronous generators with converter behavior in islanded microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(3), 1395-1406.





EKLER



Gazili olmak ayrıcalıktır