



**AKILLI MİKRO ŞEBEKE MİMARİLERİNDE
MERKEZİ OLMAYAN VE HİYERARŞİK
DENETİM**

Ayşe BAĞIRAN

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Bilim Dalı

Prof. Dr. Köksal ERENTÜRK

2017

Her Hakkı Saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**AKILLI MİKRO ŞEBEKE MİMARİLERİNDE MERKEZİ
OLMAYAN VE HİYERARŞİK DENETİM**

Ayşe BAĞIRAN

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Elektrik Tesisleri Bilim Dalı**

**ERZURUM
2017**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü



TEZ ONAY FORMU

AKILLI MİKRO ŞEBEKE MİMARİLERİNDE MERKEZİ OLMAYAN VE HİYERARŞİK DENETİM

Prof. Dr. Köksal ERENTÜRK danışmanlığında, Ayşe BAĞIRAN tarafından hazırlanan bu çalışma, 18/01/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Bilim Dalı'nda Yüksek lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Köksal ERENTÜRK

İmza :

Üye : Doç. Dr. Birol SOYSAL

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ahmet DUMLU

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **20.05/2017** tarih ve **..16..../..24.....** nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AKILLI MİKRO ŞEBEKE MİMARİLERİNDE MERKEZİ OLMAYAN VE HİYERARŞİK DENETİM

Ayşe BAĞIRAN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Tesisleri Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Köksal ERENTÜRK

Bu tezde Akıllı Mikro şebeke mimarilerinde dağıtık kontrol ve hiyerarşik denetim hakkında detaylı literatür taraması yapılmıştır. Mikro şebekeler için yapılmış kontrol çalışmalarından; DROOP kontrol yöntemi ile ortalama güç kontrol yöntemlerinin birleştirilmesi, 3 fazlı PWM gerilim eviricileri için dijital kontrol stratejisi ve hiyerarşik kontrol yöntemleri incelenmiştir. Ayrıca mikro şebeke kontrol yöntemleri avantaj ve dezavantajları bakımından mukayese edilmiştir.

2017, 85 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Dağıtık kontrol, DROOP yöntemi, Hiyerarşik Kontrol, Mikro Şebeke

ABSTRACT

Master Thesis

DECENRALIZED and HIERARCHICAL CONTROL IN INTELLIGENT MICROGRIDS ARCHITECTURES

Ayşe BAĞIRAN

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering
Department of Electrical Facilities

Supervisor: Prof. Dr. Köksal ERENTÜRK

In this thesis, a detailed literature survey on distributed control and hierarchical control in intelligent microgrid architectures was conducted. Control studies made for microgrids; integration of DROOP control method and average power control methods, digital control strategy for 3-phase PWM voltage converters and hierarchical control methods have been investigated. The advantages and disadvantages of microgrid control methods have also been compared.

2017, 85 pages

Keywords: Distributed control, droop method, hierarchical control, microgrids.

TEŞEKKÜR

Sunduğum bu Yüksek Lisans Tez Çalışması, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Elektrik Tesisleri Bilim Dalında hazırlanmıştır.

Tez çalışmam süresince her zaman yanımda olduğunu hissettirip desteklerini esirgemeyen, tecrübe ve bilgi birikimlerini benimle paylaşan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Köksal ERENTÜRK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde görev yapan öğretim üyesi hocalarıma, Sayın Doç. Dr. Birol SOYSAL'a ve manevi desteğini hiç esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Gökhan ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini her an arkamda ziyadesiyle hissettiren değerli aileme ve kalben yanımda olduğundanşüphe etmediğim rahmetli ağabeyim Sayın Mehmet Emin BAĞIRAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bana her zaman destek olan Makine Mühendisi Sayın Ayşe YEŞİLYURT'a, Sayın Elektrik Elektronik Mühendisi Hayriye Tuğba SEKBAN'a, Sayın Elektrik Elektronik Mühendisi Ayça BAKIR'a ve Sayın Elektrik Elektronik Mühendisi Betül SOSLU'ya teşekkür ederim.

Kendisi ile aynı gün doğma şerefine nail olduğum, bana çalışmalarımdaya ilham kaynağı olan çalışmalarıyla insanlığa paha biçilmez bir miras bırakan Sayın Nikola TESLA'ya teşekkür ederim.

Ayşe BAĞIRAN

Ocak 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Akıllı Şebekelerin Kullanım Amaçları.....	5
1.2. Akıllı Şebekelerin Temel Özellikleri	5
1.3. Akıllı Şebekelerin Anahtar Görevleri.....	6
1.4. Güç Şebekesinin Akıllı Şebeke Haline Getirilmesi	7
1.5. Yenilenebilir Enerjiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın Bakışı	8
1.6. İlgili Çalışmalar	9
1.7. Merkezi Olmayan Kontrol Yöntemi.....	10
2. KAYNAK ÖZETLERİ	16
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	45
3.1. Gerilimlerine Göre Şebeke Çeşitleri	45
3.1.1. Alçak gerilim şebekeleri.....	46
3.1.2. Orta gerilim şebekeleri	46
3.1.3. Yüksek gerilim şebekeleri	47
3.1.4. Çok yüksek gerilim şebekeleri	47
3.2. Dağıtım Şekillerine Göre Şebeke Çeşitleri	48
3.2.1. Dallı (radyal) şebekeler	48
3.2.2. Ring (halka) şebekeler	49
3.2.3. Ağ (gözlü) şebekeler	50
3.2.4. Enterkonnekte şebekeler.....	51
3.3. Mikro Şebekelerde Hiyerarşik Kontrol Sistemi	56
3.3.1. İç kontrol çevrimi	60

3.3.2. Birincil kontrol	61
3.3.3. İkincil kontrol	64
3.3.4. Üçüncül kontrol	66
3.4. Mikro Şebekelerde Kullanılan Diğer Kontrol Yöntemleri	68
3.4.1. PQ kontrol	68
3.4.2. DROOP kontrol	69
3.4.3. V/f kontrol	75
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	76
5. SONUÇ	82
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	86

KISALTMALAR DİZİNİ

A	Amper
AC	Alternative Current
BPL	Broadband Power Line
CSC	Current Source Converter
CSI	Current Source Inverter
DB	Dead Beat
DC	Direct Current
DER	Distributed Energy Resource
DG	Distributed Generation
DGS	Distributed Generation System
DIC	Distributed Resources Interface Converters
DOE	Department of Energy
DS	Distributed Storage
DSM	Demand Side Management
DSR	Demand Side Response
DSP	Digital Signal Process
DÜK	Dağıtık Üretim Kaynağı
EI-DG	Electronically Interfaced Distributed Generation
GPS	Global Positioning System
HAN	Home Automation Network
Hz	Hertz
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PCC	Point of Common Coupling
PI	Proportional Integral
PID	Proportional Integral Derivative
PLL	Phase Locked Loop
PMS	Power Management System
PPS	Pulse per Second

PR	Proportional Resonant
PTP	Precision Time Protocol
PWM	Pulse Width Modulation
SG	Smart Grid
SISO	Single Input Single Output
SST	Solid State Transformer
THD	Total Harmonic Distortion
UCTE	The Union for the Coordination of Transmission of Electricity
UPS	Uninterruptible Power Supply
V	Volt
VSC	Voltage Source Converter
VSI	Voltage Source Inverter
WAMS	Wide Area Measurement System

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Dağıtık kaynaklı ve yüklü mikro şebeke yapısı.....	10
Şekil 1.2. Dağıtık mikro şebeke için güç elektroniği bileşenleri	11
Şekil 2.1. İki UPS biriminden oluşan dağıtık sistem	17
Şekil 2.2. P_{oi}^* ayar noktası ile frekansın geri yüklenmesi.....	18
Şekil 2.3. Tüm kontrol sistemi.....	19
Şekil 2.4. PI denetleyicili senkron referans çerçeve gerilim ve akım kontrolü	19
Şekil 2.5. Bağımsız AC güç sisteminde DGS devre modeli.....	22
Şekil 2.6. Mikro şebeke çalışma sisteminin tek hat diyagramı.....	23
Şekil 2.7. n. EI-DG biriminin blok diyagramı	24
Şekil 2.8. n. EI-DG birimi için önerilen gerçek güç denetleyici.....	25
Şekil 2.9. Bir EI-DG birimi için reaktif güç kontrol yaklaşımları (a) gerilim DROOP karakteristiği yöntemi (b) gerilim regülasyonu yöntemi (c) reaktif güç kompanzasyonu yöntemi	26
Şekil 2.10. Şekil 2.6'daki mikro şebeke sisteminin küçük işaret modeli	27
Şekil 2.11. Klasik kontrol yöntemi	29
Şekil 2.12. Dağıtık kontrol yöntemi.....	30
Şekil 2.13. Paralel evirici sistemine süreksiz iletim modu uygulaması.....	31
Şekil 2.14. DIC birimlerinden oluşan sistem	33
Şekil 2.15. AC mikro şebekenin üçüncül kontrolü ve senkronizasyon çevrimi	36
Şekil 2.16. DC mikro şebekenin üçüncül kontrol yapısı	37
Şekil 2.17. AC mikro şebeke mimarisi	38
Şekil 2.18. DC mikro şebeke mimarisi	39
Şekil 2.19. Hibrit AC-DC mikro şebeke mimarisi.....	40
Şekil 2.20. DC depolamalı AC mikro şebeke mimarisi.....	41
Şekil 2.21. DC bölgesi mikro şebeke mimarisi	42
Şekil 2.22. Katı hal transformatörü tabanlı mikro şebeke mimarisi	43
Şekil 3.1. Dallı şebekedeki ana hatlar ve branşmanlar	49
Şekil 3.2. Ring şebeke çalışması.....	50
Şekil 3.3. Bir ve birden fazla yerden beslenen ağ şebekeler.....	51

Şekil 3.4. Enterkonnekte şebeke çalışması	52
Şekil 3.5. Çoklu dağıtık enerji üretim kaynaklı mikro şebeke çalışması.....	54
Şekil 3.6. Hiyerarşik kontrol çalışması	57
Şekil 3.7. Güç sistemi için UCTE tarafından tanımlanan çok seviyeli kontrol çalışması.....	59
Şekil 3.8. P-Q dairesi ile P-f ve Q-E DROOP için birincil kontrol ilişkisi	62
Şekil 3.9. Birincil kontrol: Sanal empedanslı DROOP kontrol ilişkisi ve eviriciye uygulanan iç kontrol çevrimi.....	64
Şekil 3.10. P-f ve Q-E birincil ve ikincil kontrol çalışması	66
Şekil 3.11. P-f ve Q-E üçüncül kontrolün temel çalışma prensibi.....	67
Şekil 3.12. PQ akım kontrolü.....	69
Şekil 3.13. (a) Eş değer devre - (b) İletim hattı karakteristiği	70
Şekil 3.14. DROOP denetleyici blok diyagramı	72
Şekil 3.15. Minimum çıkışlı akım izleme diyagramı.....	73
Şekil 3.16. Açık değişimleri.....	74
Şekil 3.17. V/f kontrol grafiği (a) Frekans DROOP karakteristiği (b) Gerilim DROOP karakteristiği	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Çıkış gerilimi regülasyonu.....	20
Çizelge 2.2. Çıkış gerilimlerindeki toplam harmonik bozulma.....	20
Çizelge 2.3. Sistemin paylaşım faktörleri	28
Çizelge 2.4. DIC birimleri arasındaki dağıtım.....	34
Çizelge 2.5. İncelenen mikro şebeke mimarilerinin performans karşılaştırması.....	44
Çizelge 4.1. Mikro şebekeler için kontrol stratejileri	76
Çizelge 4.2. Dağıtık üretim kaynakları için kontrol yaklaşımlarının karşılaştırılması ...	78
Çizelge 4.3. Mikro şebekelerde kontrol yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları.....	80

1. GİRİŞ

Elektrik ticareti 20. yüzyılın ilk yarısında başlamış, güç sistemlerindeki teknolojik gelişmeler ise büyük oranda II. Dünya Savaşı sonrasında, 1950-1960 yılları arasında meydana gelmiştir. Ampul devrimi ve elektrik motoru, elektrik dağıtım sisteminin gelişmesini hızlandırmışlardır. Bunun sonucunda talep edilen elektrik enerjisinde patlama yaşanmıştır. Başlangıçta elektrik enerjisi, yerel endüstriyel tesislere ve özel topluluklara küçük ölçekli elektrik tedarik şirketleri tarafından sağlanırken zamanla bazı büyük işletmeler kendi elektrik enerjisini üretmişlerdir. Elektrik tedarik şirketleri verimliliği artırmak ve daha çok dağıtım yapmak istediği için kaynaklarını, iletim hatlarını ve şebekelerini bir araya getirmişlerdir.

George Westinghouse, Niagara Şelaleleri'nde hidroelektrik santral kurmuş, bu santral uzun mesafeli güç sağlayan ilk elektrik santrali olarak endüstrinin canlanmasında önemli bir rol oynamıştır. Böylece George Westinghouse, elektriğin en etkili güç iletim şekli olduğunu da kanıtlamıştır. Şebeke işinin genişletilmesi ile yerel şebekeler giderek enterkonnekte bağlantılı bir sistem haline gelmiştir. Kıtalarından oluşan ABD'de birbirleriyle de bağlantılı olan üç ulusal şebeke; Doğu Bağlantısı, Batı bağlantısı ve Texas Bağlantısı kurulmuştur. Böylece neredeyse bütün kullanıcılara elektrik enerjisi ulaştırılmıştır.

Günümüz akıllı şebeke teknolojisi elektrik şebekesindeki iletim verilerinin kaydedilmesini ve bu verilerin analiz edilmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda da bu iletim verilerine çift yönlü haberleşme ile cevap verebilmektedir. Böylece kaynak yönetimi daha verimli hale gelmektedir ve tüketiciler elektriği daha uygun fiyatta kullanabilmekteledir. Ancak tüm bunlar yeterli değildir. Mevcut elektrik sisteminin 21. yüzyıl standartlarına uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Bu durum, büyük teçhizatların daha kaliteli olmasını, yeniden kablo çekme işlemini ve yeni teknolojinin iyileştirilmesini gerektirmektedir.

Akıllı şebeke teknolojileri elektronik kontrol, sayaç ve izleme teknolojilerinden önce ortaya çıkmıştır. 1980’lerde otomatik sayaç okuma sadece büyük müşterilerden gelen yükleri izlemek amacı ile kullanılmıştır. 1990’larda günün farklı zamanlarında, elektriğin nasıl kullanıldığını kaydedebilen, gelişmiş ölçüm alt yapısına sahip sayaçlara dönüşmüştür. Akıllı sayaçlar, sürekli veri toplayarak gerçek zamanlı izleme yapabilmektelerdir. Akıllı sayaçlar, evdeki cihazların ve akıllı soketlerin bilinen cevabını talep etmek için akıllı bir geçit olarak kullanılabilenlerdir. Talep tarafı yönetimi, güç kaynağının frekans değişimlerini izleyerek şebekelerdeki yükü algılayan dinamik talep bilgisi cihazları ile başlamıştır. Talep tarafı yönetimi, şebekede talebin yoğun olduğu zamanlarda endüstriyel ve ev tipi klimalar, buzdolapları ve ısıtıcılar gibi cihazların devreye girmesini engellemek için doluluk boşluk oranını ayarlamıştır. 2000 yılının başlarında, İtalya’nın Teleskop Projesi düşük band genişlikli güç haberleşme hattı vasıtası ile akıllı sayaçlara bağlanan yaklaşık 27 milyon evin şebekeye katılması yönüyle bir ilk olmuştur. Son projelerde de kablosuz teknolojiler kullanılmıştır.

1990’larda Bonneville Enerji İdaresi, hızlı analiz etme yeteneği olan prototip sensörler kullanarak çok geniş coğrafik alanlarda elektrik kalitesindeki dengesizlikleri azaltmıştır. Bu durum geniş bir alana yayılmış şebekelerin izlenmesi ve senkronize edilmesi bakımından bir devrim yaratmıştır. 2000 yılında yapılan ilk operasyonel Geniş Alan Ölçüm Sistemi (WAMS), Bonneville Enerji İdaresi’nin yapmış olduğu bu çalışmanın doruk noktası olmuştur. Diğer ülkeler bu teknolojiyi hızla var olan sistemlerine entegre ederken, 5 yıllık ekonomi planı tamamlandığında Çin, kapsamlı bir Ulusal WAMS sistemine sahip olmuştur.

Teleskop projesi, Enel S.p.A tarafından kurulmuş dünyanın en eski ve en büyük akıllı şebeke örneği olan İtalyan sistemidir. Teleskop Projesi’nin kullanımının dünya genelinde alışılmışın dışında olmasının sebebi kendi sayaçlarını tasarlaması, üretmesi, kendi sisteminin entegratörü olarak çalışması ve kendi yazılımını geliştirmesidir. Teleskop Projesi akıllı şebeke teknolojisinin ticari boyuttaki ilk kullanımı olarak kabul edilmektedir. Teleskop Projesi, 2,1 milyar euroluk maliyeti ile yıllık 500 milyon euro tasarruf sağlamaktadır.

ABD’de Texas Austin kenti, elle kullanılan sayaçlarının ilk 1/3’ini kablosuz ağ şebekesiyle haberleşen akıllı sayaçlar ile değiştirdiği 2003 yılından bu yana kendi akıllı şebekesini kurmaktadır. Kurulan bu akıllı şebeke 200,000 cihazı (akıllı sayaçlar, akıllı termostatlar, sensörler vs.) gerçek zamanlı yönetmektedir. Bu akıllı şebekenin 1 milyon tüketicinin ve 43,000 işletmesinin gerçek zamanlı olarak kullanılacak 500,000 cihazı desteklemesi beklenmektedir. Boulder, Colorado ise kendi akıllı şebeke projesinin ilk aşamasını 2008 yılında tamamlamıştır. Sistemlerin ikisi de akıllı soketleri ve cihazları kontrol eden ev otomasyonu ağına (HAN) geçiş noktası olarak akıllı sayaç kullanmaktadır. HAN tasarımcılarından bazıları, ev elektronik cihazlarındaki hızla gelişen faaliyet alanının beraberinde getirdiği yeni standart ve teknolojilerin mevcut teknolojiyle uyuşmayacağından endişe ettikleri için kontrol fonksiyonlarının sayaçtan ayrılmasını tercih etmişlerdir. Kanada’nın en kalabalık ve ikinci en büyük eyaleti olan Ontario’daki Hydro One Şirketi, Trilliant standartlarına uygun bir haberleşme alt yapısı oluşturan geniş ölçekli bir akıllı şebeke girişiminde bulunmuştur. Bu sistem 2011 yılının sonunda Ontario eyaletinde 1,3 milyon aboneye hizmet vermiştir. Bu girişim, Fayda Planlama Ağı’ndan “Kuzey Amerika’daki En İyi AMR Girişimi” ödülünü kazanmıştır. Almanya’daki Mannheim şehri, “MOMA” projesinde gerçek zamanlı Geniş Band Güç Hattı (BPL) haberleşmesini kullanmaktadır. Benzer şekilde Güney Avustralya’daki Adelaide eyaleti, Tonsely Park’ın yeniden geliştirilmesi için Yeşil Akıllı Şebeke Uygulaması planlanılmaktadır.

InovGrid, Evora’da yenilikçi bir proje olup bu proje, şebeke yönetimini otomatikleştirmek, servis kalitesinin artırmak, işletme maliyetlerini düşürmek, enerji verimliliğini ve çevresel sürdürülebilirliği teşvik etmek, yenilenebilir enerjilerin ve elektrikli araçların nüfuzunu artırmak için elektrik şebekesini bilgi ve cihazlarla donatmayı amaçlamaktadır. Tedarik ve enerji hizmeti şirketleri herhangi bir zamanda, tüketici bilgisini, katma değerli enerji üretimini ve hizmetini sunmak için bu teknolojik platformu kullanmaktadırlar. Bu şekilde elektrik dağıtım şebekesinin tüm durumunu kontrol etmek ve aynı zamanda yönetmek mümkün olmaktadır. Bu proje akıllı enerji şebekesi kurmak için Portekiz’i Avrupa’nın teknolojik yenilik ve hizmet sunumunun en uç noktasına taşımaktadır.

Akıllı şebeke enerjiyi korumak, fiyatı azaltmak, güvenilirliği ve şeffaflığı artırmak, tüketicinin evindeki cihazları kontrol etmek amacıyla çift yönlü dijital teknoloji kullanarak elektriği kaynaktan tüketicilere ileten bir sistemdir. Akıllı şebeke, sayaç sistemi ile elektrik dağıtım şebekesini kapsamakta olup bu sistemde güç, enerji dağıtım şebekesi sistemi aracılığıyla güç santralinden haneye taşınmaktadır. Yenileştirilmiş elektrik şebekeleri, enerji bağımsızlığına, küresel ısınmaya ve acil durum esnekliğine hitap ettiği için, çoğu hükümet tarafından desteklenmektedir. Akıllı sayaçlar, akıllı şebekenin bir parçası olmalarına karşın tek başlarına bir akıllı şebeke oluşturmamaktadırlar.

Akıllı şebeke, sistemde kullanılan tüm elektriğin kaydını tutan akıllı bir izleme sistemi içeren ve daha az güç kaybı için süper iletken iletim hatları kullanan bir sistemdir. Bunun yanı sıra akıllı şebeke, güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji sistemleriyle de birleştirilebilir bir yapıdadır. Akıllı şebeke, ev kullanıcıları ve zamandan bağımsız çalışan fabrikalar için çalışma zamanı belirlenmesinde sağlanacak olan gücün fiyatının en düşük olduğu zamanı esas almaktadır. Kalan durumlarda acil gereksinim arz eden cihazlar dışındaki diğer cihazların çalışması akıllı şebeke ile en aza indirgenebilmekte veya tamamen durdurulabilmektedir. Akıllı şebeke, hava durumları ve arızalı ekipmanlar gibi farklı durumlar için uygun ve gerekli cevabı üretebilen ve aynı zamanda arızalı cihazı bulabilen bir sistemdir. Akıllı şebeke, sistemdeki arızayı tespit edebilmekte ve bu arızayla ilgili şebeke tedarikçisini uyarabilmektedir.

Kısacası, akıllı şebeke yeni teknolojilerin, ekipmanların ve kontrol sistemlerinin enerji şebekesine kolayca entegre edilmesini sağlayan, güvenilir ağıl iletim ve dağıtım sisteminin tamamını içeren mimarinin en genel adıdır.

Akıllı şebekeye olan ihtiyacı anlayabilmek için mevcut enerji sisteminin alt yapısı hakkındaki bazı gerçeklerin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Güç şebekesi enerji sınırlaması yüzünden daha fazla elektriğe gereksinim duyar. Bunun yanı sıra akıllı şebekenin güç şebekesinden daha az fosil yakıt kullanması, güvenilirliğini artırırken maliyetine yansıtması, daha az bakım gerektiren elektrik dağıtımına ve doğal felaketler sonunda oluşabilecek sorunlara karşı etkili bir yeniden yapılandırmaya sahip

olması beklenmektedir. Bu gibi talepler giderek artarken, mevcut elektrik iletimi sistemi hala eski yapıdadır ve tüm bu talepleri karşılaması oldukça zordur. Sonuç olarak mevcut elektrik sistemine akıllı şebeke sisteminin eklenmesi gerekmektedir.

1.1. Akıllı Şebekelerin Kullanım Amaçları

Mevcut enerji sistemi ile karşılaştırıldığında akıllı şebekenin kullanım amaçları:

- Kullanıcı odaklı bir yaklaşım sağlamak ve yeni hizmetlerin pazara girmesine izin vermek,
- Elektrik şebekelerinin ekonomik bir şekilde yenilenmesini sağlamak,
- Entegrasyonu, birlikte çalışılabilirliği ve güvenliği garanti etmek,
- Serbest pazar için erişilebilirlik sağlamak ve rekabete teşvik etmek,
- Dağıtık üretimi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını mümkün kılmak,
- Merkezi üretimin en iyi şekilde kullanılmasını sağlamak,
- Çevresel sınırlamaların etkisini göz önünde bulundurmak,
- Talep tarafı cevabını (DSR) ve talep tarafı yönetimini (DSM) etkinleştirmek,
- Toplumsal yönlerini dikkate almak

olarak sıralanabilir.

1.2. Akıllı Şebekelerin Temel Özellikleri

Bir akıllı şebekenin temel özellikleri sırasıyla;

- Akıllı olması: Bir akıllı şebekenin akıllı olabilmesi, sistemin aşırı yüklenmesini algılayabilme, potansiyel kesintiyi engellemek ya da en aza indirmek için gücü yeniden ayarlayabilme, hızlı cevaplama zamanına sahip olma, tüketicilerin ve düzenleyicilerin hedefleri doğrultusunda yeniden çözümleme yapabilme ve otonom çalışma gibi özelliklerin bütünüdür.
- Etkili olması: Yeni bir alt yapı eklenmesine gerek duyulmadan artan tüketici talebini etkili bir şekilde karşılayabilmesi özelliğidir.

- Karşılایıcı olması: Güneş ve rüzgâr enerjisini içeren tüm kaynaklardan, kömür ve doğal gaz kadar kolay bir şekilde enerji ihtiyacını karşılaması ayrıca enerji depolama teknolojilerini birleştirme kapasitesine sahip olma özelliğidir.
- Motive edici olması: Tüketici ve hizmet arasındaki haberleşmeyi sağlayarak tüketicinin bütçesi ve bireysel önceliklerine göre enerji tüketimini ayarlayabilmesidir.
- Dayanıklı olması: Güvenlik protokolü gereğince tek bir merkezi olmadığından farklı çevre ve çalışma koşullarına göre daha dayanıklı olmasıdır.
- Yeşil (temiz) olması: Küresel iklim değışikliğini yavaşlatan çevre dostu bir sistemdir.
- Yük taşıma: Akıllı şebeke sisteminin aşırı yüklenme ve güç şebekesinde zamanla değışen yük durumlarında geçici olarak enerji tüketimini azaltmaları için tüketicilere tavsiye vermesi ve geçici olarak bu yük değeri karşılayabilmesidir.
- Talep cevabı desteğı olması: Kullanıcıları daha az enerji tüketen elektronik cihazlara yönlendirerek elektrik faturalarını düşürmesini sağlama özelliğidir.
- Merkezi olmayan güç üretimi olması: Dağıtık ya da merkezi olmayan güç sistemi, bireysel kullanıcıların kendi takdirine bağı olan uygun herhangi bir yöntemi kullanarak yerinde bir güç üretmesine imkan vermesidir.
- Teşvik edici olması: Tüketicinin şebeke çalışmalarına katılımını teşvik etmesidir.
- Güvenilir olması: Kaçak kaynak kullanımı önleyerek, birinci kalite güç sağlanmasını garanti etmesidir.

1.3. Akıllı Şebekelerin Anahtar Görevleri

Bir akıllı şebekenin anahtar özellikleri sırasıyla

- Şebeke güçlendirmesi: Enerji kaynaklarını, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarını, enterkonnekte şekilde bağlayarak iletim kapasitesinin uygun seviyeye çekilmesini garanti etmektedir.
- Açık deniz teknolojileri: Denizdeki rüzgar tarlaları ve diğer deniz teknolojileri için en verimli bağlantıları geliştirmektedir.

- Merkezi olmayan mimarilerin gelişimi: Daha küçük ölçekli elektrik tedarik sistemlerinin toplam sistemle uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlanmaktadır.
- Haberleşme: Var olan milyonlarca kullanıcının haberleşme alt yapısını kullanarak tekelerde ticaret ve çalışma yapmasına olanak sağlamaktadır.
- Aktif talep tarafı: Kendi enerji üretimleri olsun ya da olmasın, tüm tüketicilerin sistem çalışmasında aktif rol oynamasını sağlamaktadır.
- Birleştirilmiş kesikli üretim: Mikro üretim alanlarını kapsayan birleştirilmiş kesikli üretimin en iyi yollarını bulmaktadır.
- Gelişen zeki üretim: Üretim ve tüketimin şebekede çok önemli olan zeki bir şekilde yapılmasıdır.
- Elektrikli araçları hazırlama: Akıllı Şebekeler tüm tüketicilerin ihtiyacını karşılamak zorunda olmasının yanı sıra, elektrikli araçların hareketliliği, dağınıklılığı ve gelecek yıllardaki muhtemel yoğun kullanımı elektrik şebekeleri için büyük bir görev oluşturmaktadır.

1.4. Güç Şebekesinin Akıllı Şebeke Haline Getirilmesi

Elektrik tedarikçileri, endüstriyel ölçekli klimalardan konut tipi su ısıtıcılarına kadar, son kullanıcı donanım kontrolü ve haberleşebilme olanağını sağlamaktadırlar. Elektrik tedarikçileri bu olanağı, en yoğun kullanım saatlerinde talebi kısmen düşürerek, arz ve talebi dengelemek için kullanmaktadırlar. Bilgi teknolojilerinin avantajları sayesinde şebeke verimliliğini artırmak, aynı zamanda dağıtım sistemleri ve elektrik kullanımı için kendisi akıllı sayılan bir manevradır. Akıllı sayaçlar ile birleştirilen akıllı şebekeler tüketici ve tedarikçilerin daha verimli olmasına sağlamaktadır. Akıllı şebeke coğrafi şartlarda elektrik enerjisini daha verimli bir şekilde taşımakla kalmaz aynı zamanda elektriğin en yoğun kullanıldığı zamandan en az kullanıldığı zamana kadar şebekenin verimli şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Bu amacı gerçekleştirebilmek için herhangi bir zamanda elektrik enerjisinin ne kadar kullanıldığının ölçülmesi için tüketicilerde akıllı sayaçlar kullanılmaktadır. Bu sistem yapısı tedarikçi ile tüketici arasındaki çift yönlü haberleşme olanağı sağlamaktadır. Böylece her iki tarafın da avantajına olan en yoğun kullanım döneminde iş birliği yapabilmektelerdir. Ayrıca güneş enerjili elektrik

paneline veya rüzgar gülüne sahip olan tüketici, akıllı sayaç ile kendi kullanımından arta kalan elektrik enerjisini tedarikçiye geri satabilmektedir.

1.5. Yenilenebilir Enerjiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın Bakışı

662 sayılı Aile ve Sosyal Politikalar Bakanlığı'nın "Teşkilat ve Görevleri Hakkında Kanun Hükmünde Kararname ile Bazı Kanun ve Kanun Hükmünde Kararnamelerde Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun Hükmünde Kararname" uyarınca Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü kapatılmış olmakla beraber yenilenebilir enerji ve enerji verimliliğine ilişkin görevler, 3154 sayılı Kanun'un 10. maddesi uyarınca kurulan "Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü" çatısı altında sürdürülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımına ilişkin kanun, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 5346 sayılı Kanun'u ile 18.05.2005 tarihinde Resmi Gazete'de yayımlanmıştır. Yayımlanan bu kanuna ilişkin genel bilgiler aşağıda verilmektedir.

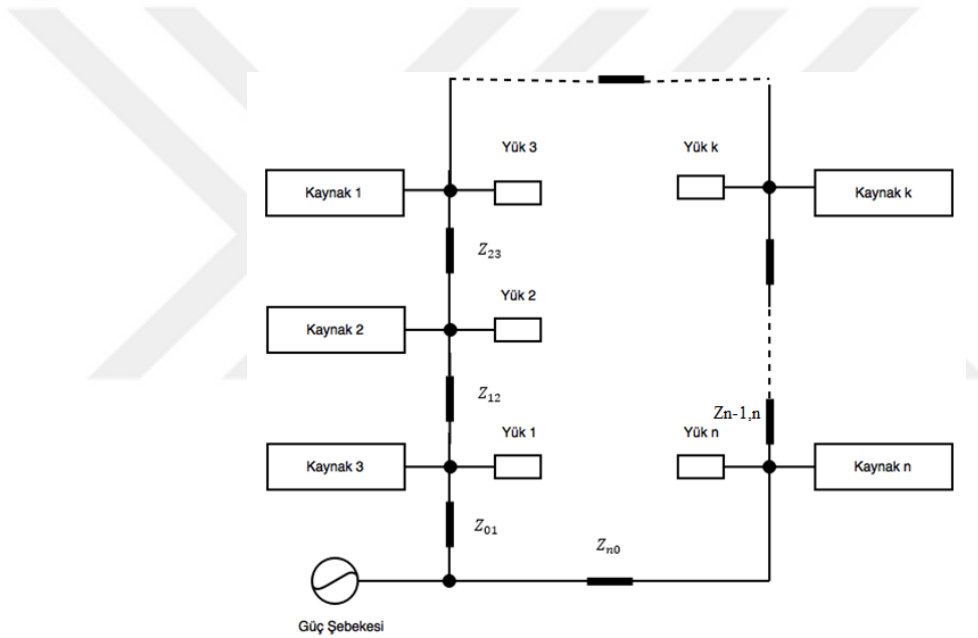
- Dağıtık enerji üretimi, enerjinin depolanmasını ve yenilenebilir enerji kaynaklarının birleştirilebilmesini daha standart ve etkin maliyetli hale getirmektedir.
- Akıllı şebekeler, klasik elektrik şebekesinin iş ve ileri haberleşme ve otomasyon denetim modelini içeren tipleridirler.
- İş vakaları, mali kaynaklar, dağıtım yolları ve devlet denetimini etkinleştirmek için kullanılacak olan modeller sadece tecrübeyle ortaya çıkmaktadırlar. Bu, elektrik sisteminin yasal olarak düzenlenmiş ve düzenlenmemiş yönleri için geçerlidir.
- Akıllı şebeke sosyal olarak dönüşümsel bir yapıya sahiptir. İnternet veya cep telefonu iletişimde olduğu gibi, elektrik ile ilgili deneyimlerimizin büyük ölçüde değişeceği açıktır. Yüksek seviye otomasyonunu başarılı bir şekilde entegre edebilmek için kültürel değişim gerekmektedir.

1.6. İlgili Çalışmalar

- **Bütünleşik Haberleşme:** Yüksek hızlı, tamamen entegre edilmiş, çift yönlü haberleşme teknolojileri modern şebekeyi, dinamik, gerçek zamanlı bilgi ve güç alış verişi için etkileşimli bir platform haline getirmektedir. Bu mimari, şebeke bileşenlerinin karşılıklı etkileşim içinde olmasına olanak veren tak çalıştır ortamı sağlamaktadır.
- **Algılama ve Ölçüm:** Bu teknolojiler; problemlere cevap verecek, algılayacak ve güç sistem ölçümlerini geliştireceklerdir. Ayrıca bu teknolojiler, ekipmanın sağlığını ve şebekenin bütünlüğünü değerlendirip, gelişmiş koruma rölesine destek veren teknolojiler olup sayaç tahminlerini ortadan kaldıran, enerji hırsızlığını önleyen, tüketici seçim ve taleplerine yanıt imkânı sağlayan ve tıkanıklığın azaltılmasına yardım eden teknolojik sistemlerdir.
- **Gelişmiş Bileşenler:** Gelişmiş bileşenler şebeke davranışının belirlenmesinde etkin bir rol oynamaktadırlar. Yeni nesil cihazlar malzemedeki son araştırmalardan süper iletkenlik, enerji depolama, güç elektroniği ve mikro elektronik alanlarının uygulanmasına olanak sağlayacaklardır. Bu yeni nesil cihazlar daha yüksek güç yoğunluğunu ve güvenilirliğini sağlayacak, geliştirilmiş gerçek zamanlı arıza tespitine de imkan verecektir.
- **Geliştirilmiş Ara Birimler ve Karar Desteği:** Çoğu durumda, operatörlerin karar vermesi için kullanılabilir zaman saniyelerle sınırlandırılmıştır. Böylece, modern şebeke, şebeke operatörlerinin ve yöneticilerin hızlı karar vermelerini sağlayan, geniş, kesintisiz, gerçek zamanlı uygulamasını ve araçların kullanımını gerektirmektedir. Geliştirilmiş ara birimlerle karar desteği, şebekenin her seviyesinde insan kararlarını kolaylaştıracak özelliktedir.
- **Gelişmiş Kontrol Yöntemleri:** Yeni yöntemler temel bileşenleri izlemek, hızlı arıza teşhisi ve her olaya zamanında uygun yanıtın verilmesi için olanak sağlanacaklardır. Ayrıca piyasa fiyatlandırmasını destekleyecek ve varlık yönetimini geliştirecektir.

1.7. Merkezi Olmayan Kontrol Yöntemi

Dağıtık enerji kaynaklı mikro şebekelerde, kaynaklar geniş bir alana dağıtılmaktadırlar. Bu kaynaklar birbirlerine ve dağıtım ağı yolu ile yüklere bağlanmaktadır. Ayrıca, dağıtık mikro şebekeler bir noktada ana enerji şebekesine de bağlanmaktadır. Şekil 1.1'de ana şebekeye bağlı mikro şebeke yapısı gösterilmektedir. Şekil 1.1'de aynı zamanda mikro şebekelerin hat empedansları (Z_{01} , Z_{12} , ... , $Z_{n-1,n}$) da gösterilmektedir. Kaynak, Şekil 1.2'de gösterildiği gibi bir evirici ve bir LCL filtre ile şebekeye bağlanmaktadır.

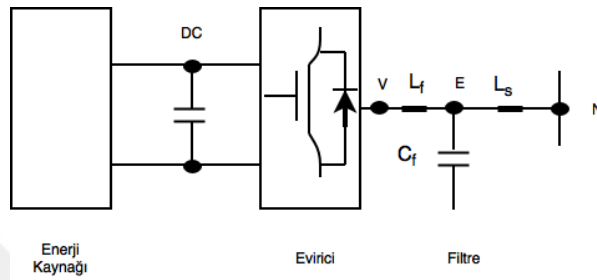


Şekil 1.1. Dağıtık kaynaklı ve yüklü mikro şebeke yapısı (Guerrero *et al.* 2013)

Sistemin dağıtık yapısı nedeni ile evirici ve filtre arabirimlerinin yerel ölçümlere dayalı olarak kontrol edilmesi gerekmektedir. Sadece haberleşme verilerinin kullanılmasının yerine ayrı arabirimlerin merkezi olmayan kontrolü aşağıdaki temel konuları ele almalıdır:

- Arabirimler toplam yükü (doğrusal veya doğrusal olmayan) istenen biçimde paylaşmalıdır.

- Yerel ölçümlere bağlı merkezi olmayan kontrol, genel ölçekte kararlılığı sağlamalıdır.
- Evirici kontrolü, mikro şebekede oluşabilecek DC ofset gerilimlerini önlemelidir.
- Evirici kontrolü, çıkış filtreleri arasında oluşan salınımları aktif olarak sönümlemelidir.



Şekil 1.2. Dağıtık mikro şebeke için güç elektroniği bileşenleri (Guerrero *et al.* 2013)

Dağıtık üretim yapısı, Şekil 1.1’de gösterilmektedir. Dağıtık üretim yapısını, ara bağlantı empedanslarına ($Z_{01}, \dots, Z_{n-1,n}$) göre merkezi olmayan kontrol bakımından; çok geniş alanlara yayılmış ağlar, daha küçük alanlara yayılmış ağlar ve oldukça küçük alanlara yayılmış ağlar olarak 3 sınıfa ayırmak mümkündür. Çok geniş alanlara yayılmış ağlarda, empedans bileşeninin büyük bir kısmı indüktiftir ve kaynak ara yüzünde kaynaklar ile ana şebekenin gerilim büyüklüğü ve faz açısı farklı olabilmektedir. Daha küçük bölgelere yayılmış ağlarda, empedans omik-indüktiftir ve kaynak ara yüzünde kaynaklar ile ana şebekenin gerilimleri aynı iken faz farklılıkları olabilmektedir. Oldukça küçük alanlara yayılmış ağlarda, empedans küçük ve neredeyse omiktir. Oldukça küçük ağlarda kaynak ara yüzünde kaynakların gerilim büyüklüğü ve faz açısı ile şebekenin gerilim büyüklüğü ve faz açısı arasında önemli bir fark yoktur. Bahsedilen üç durumda, tüm kaynaklar için kararlı hal frekansı aynı olmak zorundadır. Mikro şebeke frekansı, şebeke bağlantılı modda şebeke tarafından belirlenirken otonom modda ise frekans, mikro şebeke kontrolü tarafından belirlenmektedir.

Şekil 1.1’deki gibi kaynakların birbirine ağaç yapısı gibi peş peşe bağlandığı mikro şebekelere “Radyal Mikro Şebekeler” denirken, kaynakların örgülü bir yapı üzerinde dağıtıldığı mikro şebeke yapılarına da “Ağlarla Örülü Mikro Şebekeler” denilmektedir.

Şimdiye kadarki en kapsamlı araştırma Lesseter'ın çalışmasında tanımladığı türdeki Radyal mimariler için yapılmıştır. Lesseter, bu çalışmasında mikro şebekeler için genel bir yaklaşım sunmuştur. Bu çalışmanın içeriğinde temel mimariyi kontrol etme, koruma ve enerji yönetimi konuları yer almaktadır (Lesseter 2000).

Chandorkar ve arkadaşları, mikro şebeke çalışması için uygun merkezi olmayan paralel evirici kontrolü kavramı üzerine ilk çalışmayı yapmışlardır. Bu çalışmada, empedans bağlantı kaynaklarının çoğunlukla indüktif olduğunu, rezistif kısmın ihmal edildiğini varsaymışlardır. Klasik güç sistemlerinde kullanılan merkezi olmayan kontrole dayalı DROOP kullanımının, çıkış aktif gücüne göre frekans ayar noktasını ve çıkış reaktif gücüne göre gerilim büyüklüğünün ayar noktasını uyarlaması sebebi ile Chandorkar ve arkadaşları, DROOP denetimin bu şekilde kullanımını, jeneratörlerde başlatmışlardır. Bu şekilde DROOP kullanımı, dağıtık sistemin faz kilitleme çevrimi (PLL) kullanmaksızın çalıştırılabildiğini ve toplam yükün aktif ve reaktif güçlerinin çevirici hızına dayalı paylaşılabilirdiğini göstermiştir (Chandorkar *et al.* 1993).

Mikro şebeke çalışması için uygun merkezi olmayan paralel evirici kontrolü kavramı üzerine ilk çalışmayı yapan Chandorkar ve arkadaşlarından sonra, Tuladhar ve arkadaşları, DROOP kavramını, doğrusal olmayan yüklerin harmonik akım paylaşımını garanti etmek için genişletmişlerdir. Tuladhar ve arkadaşları bunu, paylaşılan miktar arttığında azalan frekansta, uzak birimlere kontrol sinyali gönderilmesi yoluyla DROOP kavramını genişleterek yapmışlardır. Bu çalışmada, uzak birimlerdeki PLL'ler gelen kontrol sinyali bilgisine göre yüklerin çıkışını uyarlamışlardır (Tuladhar *et al.* 1997, 2000).

DROOP kavramının ileri araştırmasında Majumder ve arkadaşları, dağıtık kaynak geriliminin faz açısının sistem genelinde ortak zamanlama referansı ile ilgili olarak DROOP kurallarına göre belirlendiği güç açısı DROOP kontrol yöntemini önermişlerdir. Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS), bu çalışmada ortak zamanlama referansı kaynağı olarak ele alınmıştır. Başka bir çalışmada Geier ve arkadaşları, GPS ile genel olarak 1µs içinde eş zamanlı yükselen kenar 1darbe/s (1PPS) sinyalinin üretildiğini belirtmişlerdir. Majumder ve arkadaşları, 1PPS sinyalini dağıtık kaynaklarda

yerel saat darbelerini eş zamanlı oluşturmak için kullanmışlardır. Bu çalışmada Majumder ve arkadaşları, yerel saat darbesini, çıkış fazının ölçüldüğü zamanlama referansını üretmek için kullanmışlardır. Majumder ve arkadaşları, çalışmalarında GPS saat darbesi sinyali için yakın gelecekteki bir alternatifin IEEE 1588-2008 standardında tanımlanan Hassas Zamanlama Protokolü (PTP) olabileceğini vurgulamışlardır. Bu çalışmada açı kontrolü, güç paylaşımının otonom çalışma boyunca sistem frekansında değişim olmaksızın elde edilmesi sayesinde avantaj sağlamıştır. Bu çalışmada kaynaklar arasında haberleşme olmamıştır. Ancak bu çalışmada sistem kararlılığı konusunda birkaç birimdeki küresel senkronizasyon sinyalinin kaybolması, güç frekans DROOP çalışması için dezavantaj olmuştur ve Majumder ve arkadaşları, şebekenin etkileşimli çalışması konusunda ileri boyutta araştırmaların yapılması gerektiğini belirtmişlerdir (Geier *et al.* 1995; Majumder *et al.* 2009, 2010).

Otonom çalışma modunda mikro şebekenin gerilim ve frekansının yükteki değişimden etkilenmesi, DROOP tabanlı kontrol yönteminin bir dezavantajı olmaktadır. STEEPER DROOP denetimi, DROOP denetimine göre, daha iyi yük paylaşımını garanti etmektedir, ancak aynı zamanda daha büyük frekans ve gerilim sapmalarına sebep olmaktadır. Chandorkar ve Divan ve daha sonra Katiraei ve İranavi çalışmalarında, mikro şebeke kaynaklarının IEEE 1547-2003 standartlarına uygun olarak tasarlandığında, yük değişimleri sırasında sistem frekansı ve gerilimini anma değerlerine döndürmek için bir mekanizma olması gerektiğini belirtmişlerdir. Elektrik güç sistemlerinde gerilim ve frekansın ikincil kontrolü olarak bilinen döndürme mekanizması, uzun bir zaman gereksinimine ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda merkezi olmayan kontrole ek olarak, Marwali ve arkadaşları, Prodanovic ve Green ve sonra Mehrizi-Sani ve İranavi çalışmalarında, döndürme mekanizmasının, yük paylaşımının ve yönetimin ikincil kontrol fonksiyonları için kaynak denetleyicileri arasında düşük band genişlikli haberleşme kanalları kullanılmasını düşünmüşlerdir (Chandorkar and Divan 1996; Marwali *et al.* 2004; Katiraei and İranavi 2006; Prodanovic and Green 2006; Mehrizi-Sani and İranavi 2010).

Guerrero ve arkadaşları, Brabandere ve arkadaşları, Lee ve arkadaşları, Lee ve Kao ve sonra Yu ve arkadaşları çalışmalarında, mikro şebeke ara bağlantı empedansının büyük

bir rezistif bileşeni olması durumunda, önceki çalışmalarda önerilmiş olan klasik frekans ve gerilim DROOP denetimi yönteminin kısıtlamalar meydana getirdiğini vurgulamışlardır. Bu bağlamda bu araştırmacılar, aktif güce karşılık frekans DROOP (P-f DROOP) ve reaktif güce karşılık gerilim DROOP (Q-E DROOP) denetimini geçersiz bulmuşlardır. Bu sebeple Guerrero ve arkadaşları çalışmalarında, gerçek gücün gerilim büyüklüğünden ve reaktif gücün de faz açısı büyüklüğünden çok etkilendiğini savunmuşlardır. Guerrero ve arkadaşları çalışmalarında, P-E DROOP ve Q-f DROOP denetimlerinden elde edilen rezistif empedansa göre DROOP denetleyiciyi uyarlamışlardır (Guerrero *et al.* 2005, 2006, 2007, 2009; Brabandere *et al.* 2007; Lee *et al.* 2009; Lee and Kao 2009; Yu *et al.* 2010).

Ara bağlantı hat empedansının DROOP tabanlı denetim üzerine etkisine değinmek için iki ana yaklaşım vardır. Birinci yaklaşım, hat empedansının aktif ve reaktif güç akışına olan etkisini analiz ve kompanze ederek gerilim ve frekans DROOP denetimlerini birbirinden ayırmaktır. İkinci yaklaşım, kapalı çevrim çevirici kontrolü aracılığıyla çevirici çıkışında sanal empedans kullanmaktır.

Brabandere ve arkadaşları çalışmalarında, hat empedansının aktif ve reaktif güç akışlarına olan etkisini analiz ve kompanze ederek gerilim ve frekans DROOP kontrollerini birbirinden ayırmak olan ilk yaklaşımı benimsemişlerdir. Brabandere ve arkadaşları bu çalışmada, ara bağlantı hattının farklı indüktans/rezistans (L/R) oranları için frekans ve gerilimin aktif ve reaktif güçlere olan etkisi incelemişlerdir. Brabandere ve arkadaşları, hattın reaktans/rezistans (X/R) oranı bilgisine dayalı referans çerçeve dönüşümünü (reference frame transformation) kullanarak frekans ve gerilim kontrol DROOP'larını birbirinden ayırma yöntemini önermişlerdir (Brabandere *et al.* 2007).

Guerrero ve arkadaşları, hat empedansı konusunu ele almak için kapalı çevrim çevirici aracılığı ile çevirici çıkışında sanal empedans kullanmak olan ikinci yaklaşımı çalışmalarında önermişlerdir. Guerrero ve arkadaşları bu çalışmada sanal rezistif çıkış empedansını, çıkış geri besleme akımına göre çıkış referans gerilimini uyarlayarak oluşturmuşlardır. Bu çalışmada sanal rezistif çıkış empedansı ile gerilim ve frekans DROOP denetleyicileri birbirinden ayrılmıştır (Guerrero *et al.* 2007).

Lee ve Kao, hat empedansının DROOP tabanlı denetim üzerine etkisine değinmek için çevirici çıkışında indüktif sanal empedans kullanımını benimsemişlerdir. Lee ve Kao çevirici çıkışında sanal indüktör sunan bir denetleyici oluşturmak için çıkış geri besleme akımını kullanmışlardır. Bu çalışmada frekans ve gerilim DROOP'ları çevirici çıkışında sanal indüktör ile birbirinden ayrılmıştır ve Lee ve Kao tasarımıda klasik DROOP şemasının kullanılabildiğini belirtmişlerdir (Lee and Kao 2009).

Sanal empedans yöntemi, hat empedansının yapısı için hassas olmayan ayırma yönteminden daha avantajlı olmaktadır. Böylece merkezi olmayan kontrol stratejisinin tamamı, DROOP denetim ile bağlantılı sanal empedans kontrolünü ve sistem frekansını ve gerilimini anma değerlerine döndürmek için ikincil kontrolü içermektedir.

Bu tez çalışmasında, yukarıda değinilen tüm problemler ve bu problemler için literatürde daha önceden önerilmiş olan çözüm yöntemleri ile ilgili olarak, mikro şebeke mimarisinde ve akıllı şebeke uygulamalarında son yıllarda yaygın olarak kullanılan ve üzerinde araştırma yapılan hiyerarşik denetim tanıtılacak ve incelenecektir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

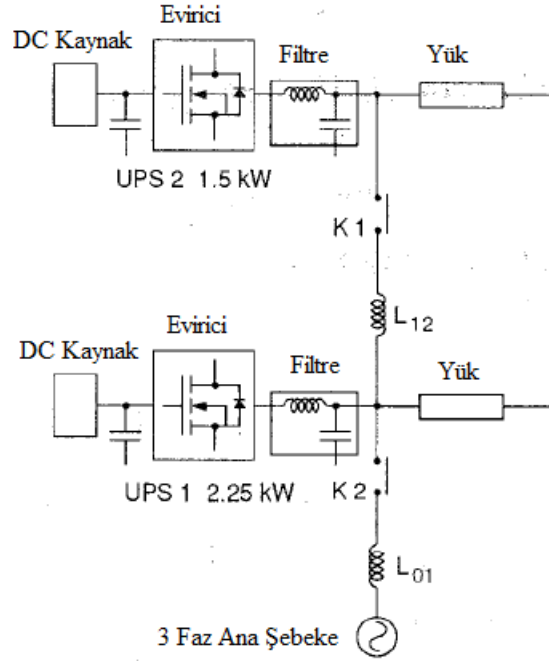
Bu bölümde merkezi olmayan ve hiyerarşik denetim üzerine yapılan çalışmalara değinilmiştir.

Chandorkar and Divan (1996), çalışmalarında, kesintisiz güç kaynaklarından (UPS) oluşan ara bağlantılı şebekenin, yani dağıtık UPS sisteminin merkezi olmayan kontrol çalışmasını sunmuşlardır. Chandorkar ve Divan, merkezi olmayan çalışmanın ana yönünün, UPS birimlerinin ayrı ayrı kontrol edilip bu kontrolün birimsel ölçüme dayalı yapılması ve sadece ara bağlantılı şebekede karşılıklı veri haberleşmesinin bulunmaması olduğunu vurgulamışlardır. Dağıtık sistem, birbirleri ile ve ana güç şebekesi ile paralel çalışan ve farklı güç değerlerinden oluşan iki tane UPS biriminden oluşmuştur. Bu iki UPS biriminden oluşan dağıtık sistem Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Şekil 2.1’deki her UPS birimi DC gerilim kaynağından, MOSFET eviriciden ve L_f ve C_f bileşenli filtreden oluşmuştur. Bu iki birim K_1 kontaktörü ile birbirlerine bağlanmışlar ve K_2 kontaktörü ile de bu iki birim 3 fazlı ana şebekeye bağlanmışlardır. Chandorkar and Divan, kontaktörlerin kapatma kumandasının her zaman kullanılabildiğini ve yüklerin de her zaman değişebildiğini çalışmalarında belirtmişlerdir. Her iki kontaktör de açık olduğunda, sistem çalışması tamamen izole edilmiş moddadır. K_1 kapalı ve K_2 açık olduğunda sistem çalışması ara bağlantılı acil durum modundadır. K_1 ve K_2 ’nin ikisi de kapalı olduğunda, sistem çalışması ara bağlantılı normal moddadır. K_1 açık ve K_2 kapalı olduğunda sistem çalışması UPS-1 için normal modda, UPS-2 için izole edilmiş moddadır.

$$\omega_i = \omega_0 - b_i(P_{0i} - P_i) \quad (1)$$

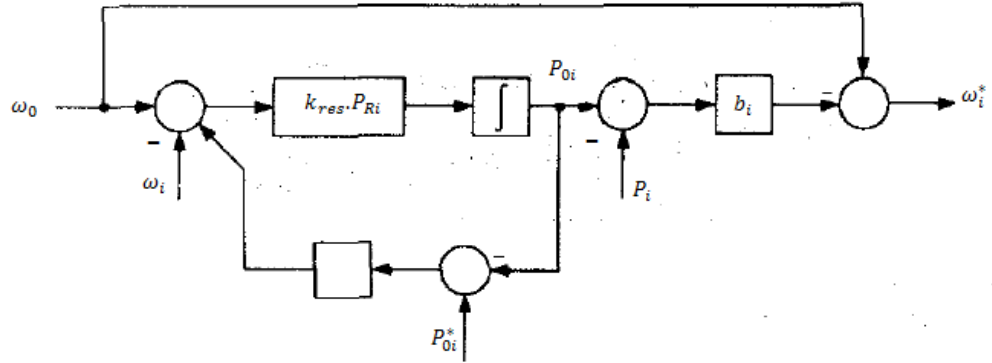
Chandorkar and Divan (1996), UPS birimleri gibi paralel çalışmaların, güç ve frekans DROOP kontrolü ile verimli bir şekilde elde edilebildiğini çalışmalarında belirtmişlerdir. (1) numaralı denklemde belirtilen indeks $i=\{0,1,2\}$ değerlerini almıştır. $i=0$ ana güç sistemini ve $i=1,2$ UPS birimlerini ifade etmiştir. ω_0 , ana frekans ve $b_i \leq 0$

olmak üzere b_i hattın eğimini vermiştir ($b_0 = 0$). P_{0i} , UPS birimlerinin gücü ve P_i de bu birimlerin çıkış gücünü vermiştir.



Şekil 2.1. İki UPS biriminden oluşan dağıtık sistem (Chandorkar and Divan 1996)

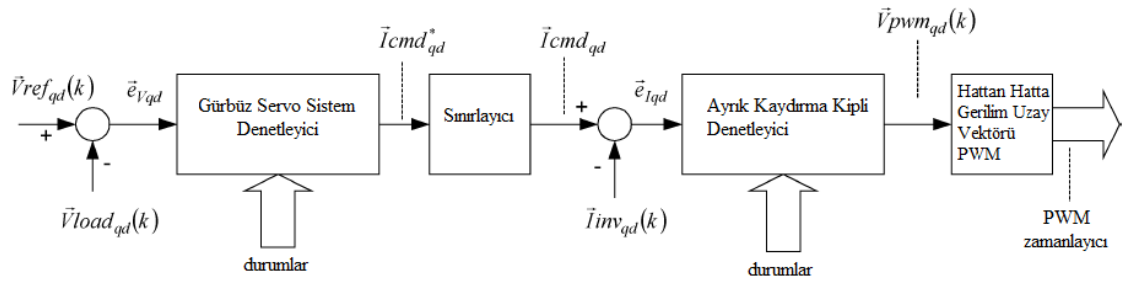
Chandorkar and Divan (1996), gerçek uygulamada, iki UPS biriminin çalışması DROOP karakteristiğinde sabitlenmediğini, onun yerine, bu karakteristiğin (1) numaralı denklemde belirtilen P_{0i} değerini değiştirerek dikey ekseninde kaydırma yeteneğinde olduğunu ifade etmişlerdir. Bu işlemin çalışma düzeneği Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Burada P_{0i} değeri, anma frekansından ve P_{0i}^* ayar noktasından sapmaya cevaben değiştirilmiştir. Bu yolla, ana güç sistemine bağlantı olmadığında, Şekil 2.2’deki denetleyici, yük değişimine müteakip değişiklik yapmış ve bu değişiklikten sonra çalışma frekansını kendi anma frekansına geri yüklemek için DROOP karakteristiğini düşey bir şekilde hareket ettirmeye eğilimli bir yol izlemiştir. Bu geri yükleme işlemi, haberleşme sistemi olmadan yapılmış ve UPS birimleri arasında güç paylaşımı korunmuştur. Chandorkar and Divan, ana güç sistemine bağlantı olduğunda, P_{0i}^* ayar noktasının ana güç sisteminden gerekli akü şarj gücünü çekmek için kullanılabildiğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.2. P_{0i}^* ayar noktası ile frekansın geri yüklenmesi (Chandorkar and Divan 1996)

Chandorkar and Divan (1996), çalışmalarında UPS 1'i yüksüz durumda çalıştırıp çıkış hattı doğal gerilimini ve eviricinin çıkış hattı akımını ölçmüşlerdir. Chandorkar ve Divan, ölçüm sonucunda sistemin sinüsoidal kararlı duruma hızlı bir şekilde ulaştığını ve yük olmasa bile filtrenin doğal salınım göstermediğini çalışmalarında belirtmişlerdir. Chandorkar ve Divan, bağımsız çalışma (acil durum) modunda UPS-1 birimini 1740W ve UPS-2 birimini 1160W güçlerinde çalıştırıp güç paylaşımını 1.5:1.0 oranında gözlemlemişlerdir. Chandorkar ve Divan, sistemin dinamik ve kararlı bir çalışma gösterdiğini belirtmişlerdir.

Marwali *et al.* (2004), çalışmalarının birinci kısmında, dağıtık enerji üretim sisteminde kullanılan 3 fazlı PWM gerilim eviricileri için dijital kontrol yaklaşımını ele almışlardır. Bu çalışmada önerilen 3 fazlı PWM gerilim eviricileri için dijital kontrol yöntemi, doğrusal olmayan yük altında çıkış gerilimindeki istenmeyen gerilim harmoniklerinin ortadan kaldırılmasını sağlamış ve yük süreksizliğinde iyi bir ters toparlanma performansı elde etmek için servo sistemli kontrol teorisini kullanmıştır. Bu yöntem, aşırı yüklenme ya da kısa devre şartları altında gerekli olan hızlı akım sınırlama yeteneğine sahip ayırık zamanlı kayan kipli akım denetleyici ile birleştirilmiştir. Bu kontrol yöntemi, sayısal işaret işleme (DSP) sistemi üzerinde çalıştırılmıştır.



Şekil 2.3. Tüm kontrol sistemi (Marwali *et al.* 2004)

Marwali ve arkadaşları, önerilen kontrolün senkron çerçevede yapılmasının gerekli olmadığını belirtmişlerdir. PI kontrolörleri kullanılarak gerilim ve akımların senkron referans çerçevesinin kontrol şeması Şekil 2.4’de gösterilmiştir. Bu şekilde, gerilim ve akım senkron referans çerçevesi ile elde edilmiştir.

Çizelge 2.1. Çıkış gerilimi regülasyonu (Marwali *et al.* 2004)

Yük Çeşidi	%Reg	N yük Çıkış V			AVG	F yük Çıkış V			AVG
V Reg, (%100 rezistif yük)	0.031	120.23	120.07	120.16	120.15	120.17	120.03	120.15	120.12
V Reg, (%100 0.8 yük güç faktörü)	0.033	120.23	120.07	120.16	120.15	120.20	120.00	120.14	120.11
V Reg, (%100 2.75:1 yük kapasitif güç faktörü)	0.019	120.23	120.07	120.16	120.15	120.14	120.11	120.14	120.13
V Reg, (%100 dengesiz rezistif yük A)	0.019	120.23	120.07	120.16	120.15	120.59	119.59	120.21	120.13
V Reg, (%100 dengesiz rezistif yük A&B)	0.028	120.23	120.07	120.16	120.15	120.67	119.97	119.72	120.12
		540Vdc, çıkış V			AVG	390 Vdc, çıkış V			AVG
V Reg, (%100 rezistif yük 390Vdc)	-0.089	120.17	120.03	120.15	120.26	120.26	120.12	120.29	120.22

Marwali *et al.* (2004), Çizelge 2.1’de verilen farklı yük durumlarına göre kararlı durum RMS çıkış gerilim regülasyonları sonuçlarını elde etmişlerdir. Marwali ve arkadaşları, Dengesiz yük durumu için çıkış gerilimindeki sapmaların, kontrol edilemeyen sıfır bileşenli yük akımları yüzünden oluştuğunu belirtmişlerdir. Marwali ve arkadaşları, transformatörün çıkış tarafındaki LC filtrenin verimliliğini gösteren etkinin oldukça az olduğunu gözlemlemişlerdir.

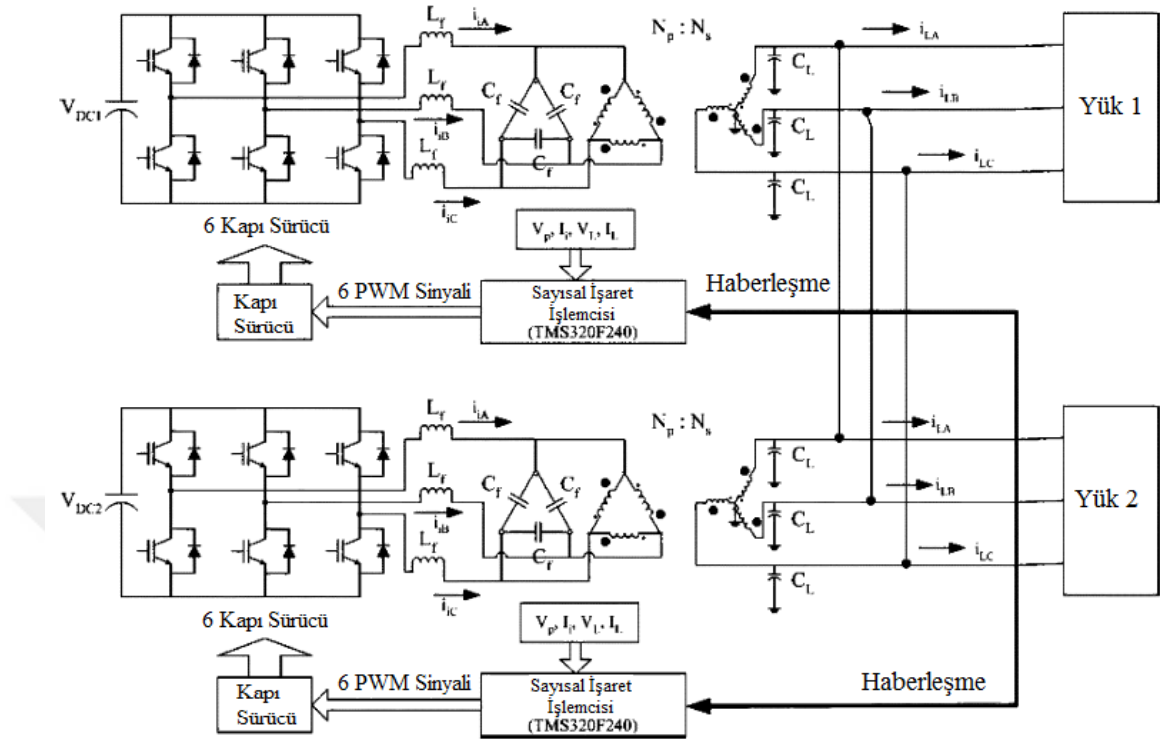
Çizelge 2.2. Çıkış gerilimlerindeki toplam harmonik bozulma (Marwali *et al.* 2004)

Yük Çeşidi	Çıkış Gerilimlerinde Toplam Harmonik Bozulma (THD)
Yüksüz	%0.90
%100 dengeli rezistif yük	%1.30
%100 0.8 yük güç faktörü	%1.32
%100 dengesiz rezistif yük (ph.A)	%1.70
%100 dengesiz rezistif yük (ph.A&B)	%1.89
Tepe yükü (3:1)	%2.7

Marwali *et al.* (2004), Çizelge 2.2’de verilen farklı yük durumlarına göre çıkış gerilimindeki toplam harmonik bozulma (THD) sonuçlarını elde etmişlerdir. Marwali ve arkadaşları, önermiş oldukları kontrol yaklaşımının üstün THD performansı gösterdiğini belirtmişlerdir. Marwali ve arkadaşları, daha iyi sonucun, gürbüz servo sistem denetleyicisine yok edilecek daha fazla harmonik bileşen dahil edilerek elde edilebileceğine dair öneride bulunmuşlardır.

Marwali *et al.* (2004), çalışmalarının ikinci kısmında, bağımsız bir AC güç kaynağında dağıtık üretim sistemlerinin (DGS) paralel çalışması için gerçek, reaktif ve harmonik güçler gibi güç paylaşımını düzgün bir şekilde kontrol edebilen yeni bir kontrol yöntemini ele almışlardır. Bu kontrol yöntemi, yerel olarak ölçülebilir geri beslemeye ek olarak, her üretim sistemi arasında sadece düşük band genişlikli veri haberleşmesi sinyallerini kullanma esaslıdır. Bu çalışmada önerilen şema, DROOP kontrol yöntemi, ortalama güç kontrol yöntemi ve harmonik yük kontrol çevriminden oluşturulmuştur. Bu çalışmada gerilim ve akım ölçüm hatalarını düzeltmek için tepki süresi gecikmeli olan ortalama güç kontrol yöntemi ve her bir DGS arasındaki düşük band genişlikli güç bilgisi değişimini kullanmak için harmonik yük kontrol çevrimi kullanılmıştır.

Marwali *et al.* (2004), Şekil 2.5’te gösterilen bağımsız AC güç sistemli DGS devre modelini kullanmışlardır. Bu devre modeli, iki yükün beslendiği paralel çalışan iki adet üç fazlı PWM eviriciden oluşmuştur. Marwali ve arkadaşları, dönüştürücü olarak her DGS için bir DC/AC gerilim kaynaklı evirici kullanmışlardır. Bu modelde her evirici, bir LC çıkış filtresi ve bir transformatör (600 kVA, $N_p:N_s = 245:208$) ile donatılmıştır. Marwali ve arkadaşları, bu modelde devre analizini basitleştirmek için, yanma motoru, küçük hidro türbin, güneş panelleri, yakıt hücreleri, mikro türbinler veya akü enerji depolama sistemleri gibi üretim kaynaklarının DC gerilim kaynakları (V_{DC1} ve V_{DC2}) olarak modellenebileceğini belirtmişlerdir.

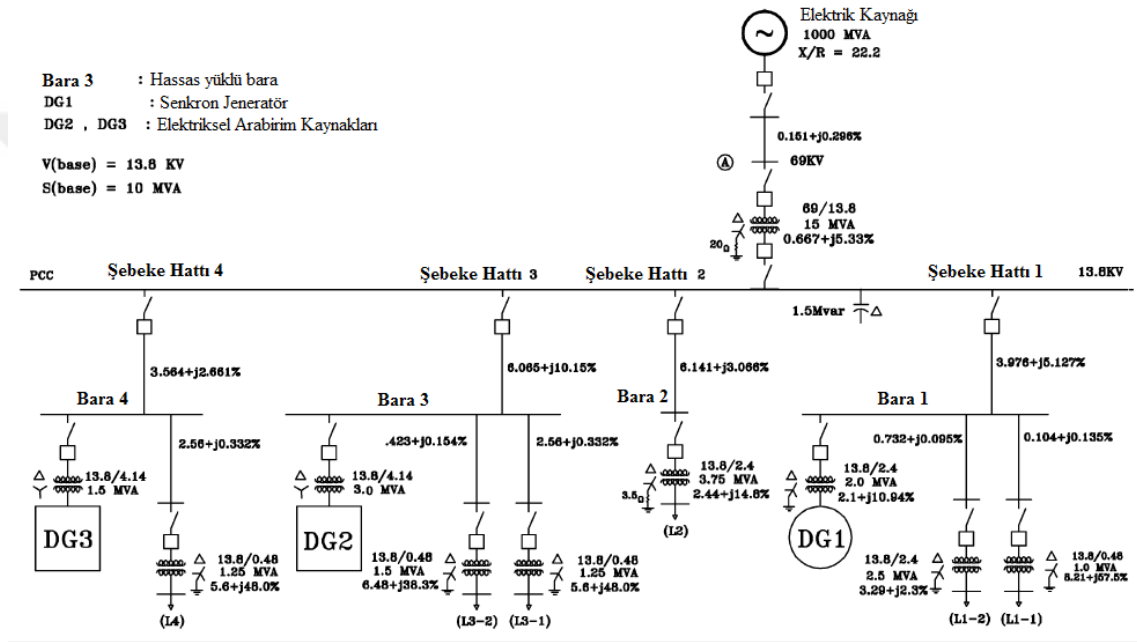


Şekil 2.5. Bağımsız AC güç sisteminde DGS devre modeli (Marwali *et al.* 2004)

Marwali *et al.* (2004), üç farklı durum için simülasyon çalışması yapmışlardır. İlk iki durumda doğrusal yükler, üçüncü durumda doğrusal olmayan yükler kullanılmıştır. İlk durumda, tüm birimler aynı yük şartlarındayken gerçek ve reaktif güçlerin yük paylaşımının çok iyi olduğu gözlemlenmiştir. İkinci durumda, farklı güç değerleri ve yük şartlarında yükler her birimin güç kapasitesine göre düzgün bir şekilde paylaşılmıştır. Üçüncü durumda, iki birim arasındaki güç paylaşımının hala iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Marwali *et al.* (2004), deneysel çalışmalarında dengeli üç fazlı rezistif yük, dengesiz rezistif yük ve RC yüklerinden oluşan üç fazlı diyot doğrultuculu doğrusal olmayan yük şartlarında yük paylaşımını kararlı durum performansı açısından değerlendirmişlerdir. Marwali ve arkadaşları, yük akımlarının iki birim arasında iyi bir şekilde paylaşıldığını ve harmonik paylaşım DROOP kontrol yönteminin verimli çalıştığını çalışmalarında göstermişlerdir.

Katiraei and Iranavi (2006), çalışmalarında otonom mikro şebeke sistemi için gerilim DROOP karakteristiği, gerilim regülasyonu ve güç kompanzasyonu olmak üzere 3 farklı güç yönetim yaklaşımını (PMS) ele almışlardır. Katiraei ve Iranavi, çalışmalarında önermiş oldukları PMS'ler doğrultusunda mikro şebekenin dinamik davranışını incelemek amacıyla, dağıtık üretim (DG) birimlerinden oluşan mikro şebeke sistemi için küçük işaret dinamik modelini geliştirmişlerdir.

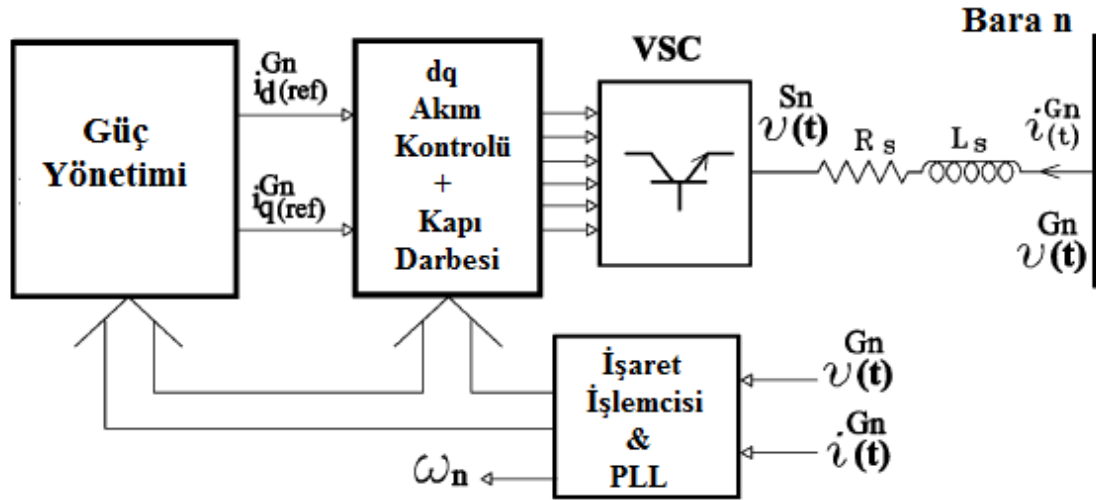


Şekil 2.6. Mikro şebeke çalışma sisteminin tek hat diyagramı (Katiraei and Iranavi 2006)

Katiraei and Iranavi (2006), çalışmalarında olası mikro şebeke güç yönetim yaklaşımlarını araştırmak için Şekil 2.6'da gösterilen 13.8 kV dağıtım sistemini kullanmışlardır. Mikro şebeke sistemi, Şebeke Hattı 1'e bağlı olan klasik bir DG1 (1.8 MVA), Şebeke Hattı 3 ve 4'e sırasıyla bağlı olan DG2 (2.5 MVA) ve DG3 (1.5 MVA) olmak üzere iki adet "Elektronik Arabirimli Dağıtık Kaynak" (EI-DG) birimlerini içermiştir. DG1, dizel-jeneratörü gibi tepki süresi uzun olan, DG2 ve DG3 ise tepki süresi kısa olan dağıtık kaynakları temsil etmişlerdir. Katiraei ve Iranavi, DG2 ve DG3'ün planlanmış kontrol komutlarına dayalı sınırlar kapsamında sisteme bağımsız kontrol edilen gerçek ve reaktif güç tedarik etmek için yeterli kapasiteye sahip

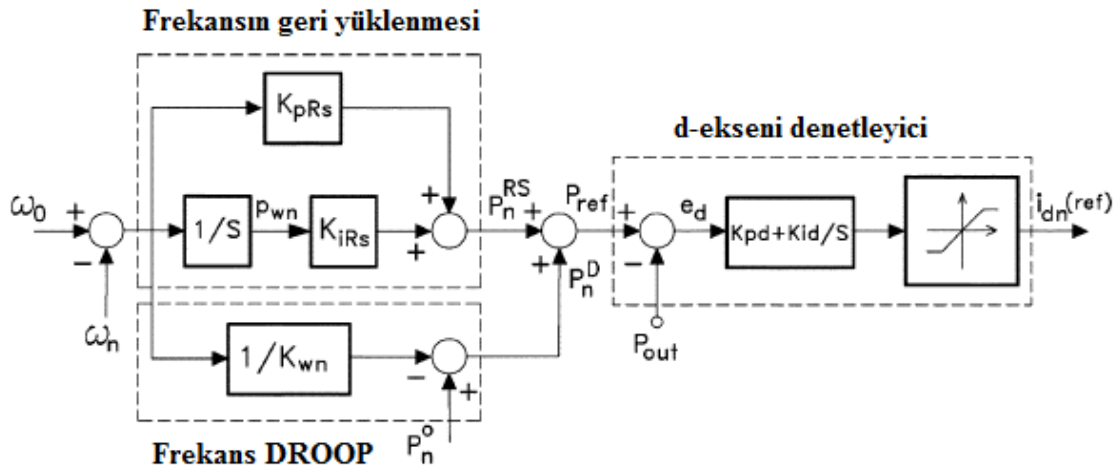
olduklarını kabul etmişlerdir. Katiraei ve Iranavi, önermiş oldukları güç yönetim yaklaşımının sadece DG2 ve DG3 gibi dağıtık kaynaklar için geçerli olduğunu belirtmişlerdir.

Katiraei and Iranavi (2006), Şekil 2.7’de gösterilen güç yönetim sisteminin, kontrol sisteminin ve EI-DG birimlerindeki VSC arabirimlerinin blok diyagramını çalışmalarında kullanmışlardır. Katiraei ve Iranavi, EI-DG biriminin çıkış gücünü belirlemek için bağımsız gerçek ve reaktif güç kontrol yaklaşımlarını önermişlerdir. Denetim, AC akımların d ve q eksen bileşenlerini belirleyen $dq0$ referans çerçevesinde uygulanmıştır. Akım ayar noktası güç yönetim bloğu ile belirlemiştir. Akım bileşeninin d eksen ayar noktası, EI-DG biriminin gerçek güç üretimini belirlemiştir. Benzer şekilde, akım bileşeninin q eksen ayar noktası, EI-DG biriminin reaktif güç enjeksiyonunu belirlemiştir. Şekil 2.7’de gösterilen sinyal işleme bloğu ve faz kilitleme çevrimi (PLL) devresi, DG biriminin ölçülen akım ve gerilimlerini işlemesi ve DG barasındaki yerel frekansı hesaplaması bakımından kontrol sisteminin tamamlayıcı kısmı olarak kullanılmıştır.



Şekil 2.7. n. EI-DG biriminin blok diyagramı (Katiraei and Iranavi 2006)

Katiraei and Iranavi (2006), Şekil 2.8’de gösterilen mikro şebekenin EI-DG birimleri için tasarladıkları gerçek güç yönetim blok diyagramını kullanmışlardır. Blok diyagramın girişi, klasik PLL kullanan bara gerilimi aracılığıyla hesaplanan ω_n birim frekansı, olmuştur. Blok diyagramın çıkışı, ünitenin P_{ref} gerçek güç referansına karşılık gelen d eksenli iç akımı denetleyicisi için referans akımı olmuştur.



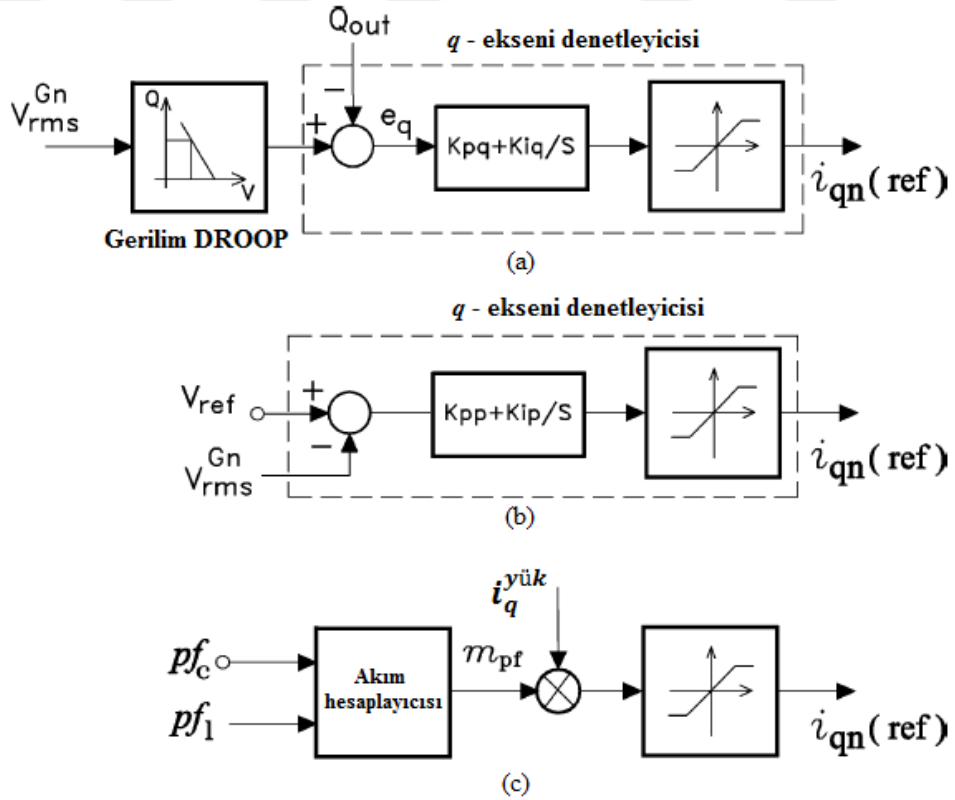
Şekil 2.8. n. EI-DG birimi için önerilen gerçek güç denetleyici (Katiraei and Iranavi 2006)

Katiraei and Iranavi (2006), Şekil 2.9 (a)’da gösterilen gerilim DROOP karakteristiğine dayanan bir reaktif güç kontrol yaklaşımını önermişlerdir. Katiraei ve Iranavi, çalışmalarında birimin Q_{ref} reaktif güç referansını belirlemek için bir V-Q karakteristiği ve $i_{qn(ref)}$ q eksenli akımı sinyalini göndermek bir PI denetleyicisi kullanmışlardır. Burada blok diyagramının girişi, DG biriminin ortak bağlantı noktasındaki (PCC) gerilimin RMS değeri olmuştur. Birimin reaktif güç referansını belirlemek için önceden ayarlanmış V-Q karakteristiği kullanılmıştır.

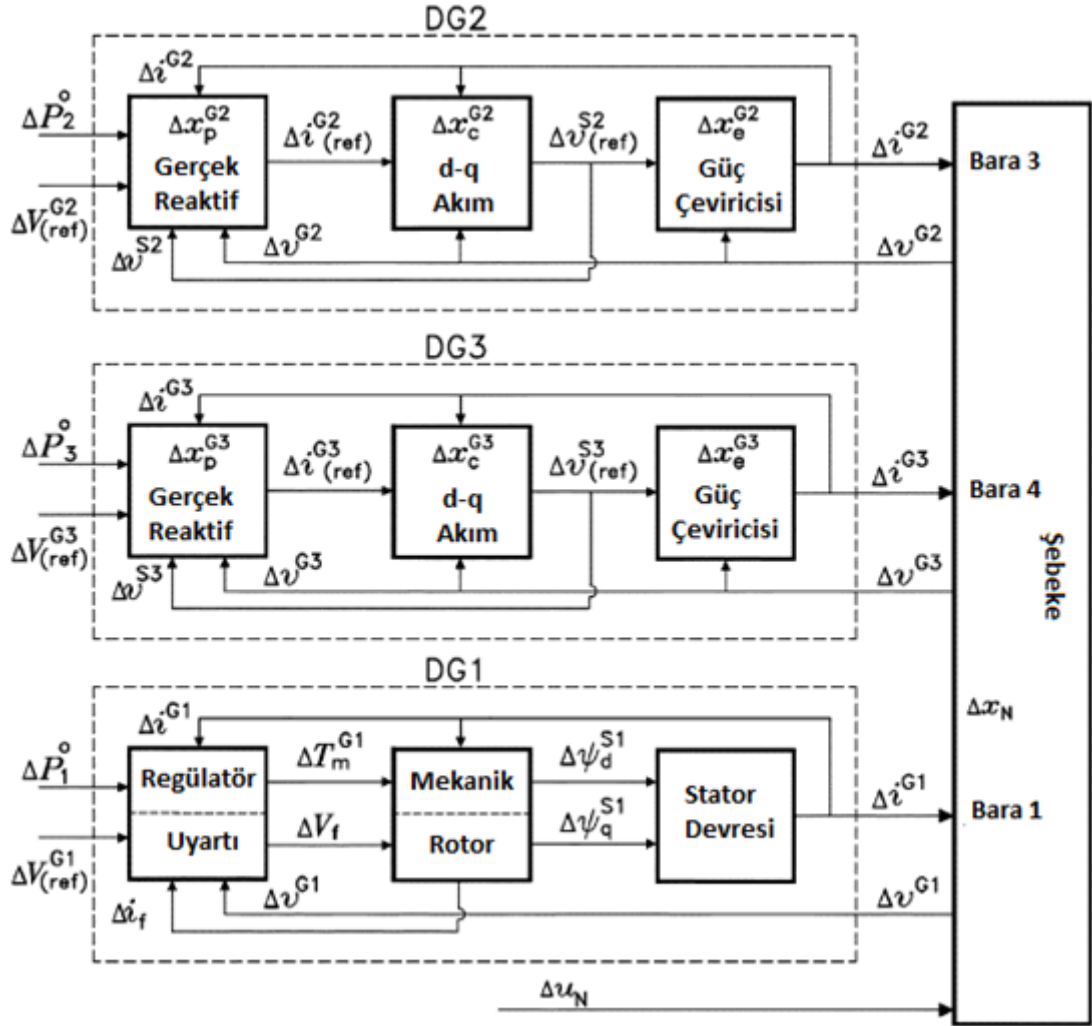
Katiraei and Iranavi (2006), Şekil 2.9 (b)’de gösterilen gerilim regülasyonuna dayanan başka bir reaktif güç kontrol yaklaşımını önermişlerdir. EI-DG biriminin reaktif gücü, PCC gerilimini önceden belirlenmiş bir seviyede (normalde 1 p.u.) regüle etmek için kontrol edilmiştir. Dolayısıyla, bu kontrol yaklaşımı, V-Q karakteristiğinin tanjantının sıfıra ayarlandığı ve birimin reaktif güç referansının belirlendiği, gerilim DROOP

karakteristiğinin özel bir durumu olarak yorumlanabilir. Şekil 2.9 (b) 'de gösterildiği gibi $i_{qn(ref)}$ akımı, bir PI denetleyicisi aracılığıyla önceden belirlenmiş referans gerilimine göre terminal geriliminin rms değerindeki sapmalardan üretilmiştir. Katiraei ve Iranavi, reaktif güç yaklaşımını, sadece gerilim değişimleri için çok sınırlı toleransa sahip hassas yükler sağlayan mikro şebeke sistemindeki bu baralara uygulamışlardır.

Katiraei and Iranavi (2006), Şekil 2.9 (c)'de gösterilen güç kompanzasyonuna dayanan üçüncü bir reaktif güç kontrol yaklaşımını önermişlerdir. Katiraei ve Iranavi, bu yaklaşımın, güç faktörünü arttırmak veya bir yükün reaktif güç gereksinimlerini hızlı reaktif güç değişimi karakteristiğiyle karşılamak için kullanıldığını çalışmalarında belirtmişlerdir. Bu kontrol yaklaşımı, bir yükün reaktif gücünü yük barasına bağlı bir DG birimi tarafından birimsel olarak kompanse etmek için mikro şebeke sistemine uyarlanmıştır. Katiraei ve Iranavi, yük faktörlerinin yük değişimlerinden bağımsız olarak önceden belirlenmiş bir değere getirildiğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.9. Bir EI-DG birimi için reaktif güç kontrol yaklaşımları (a) gerilim DROOP karakteristiği yöntemi (b) gerilim regülasyonu yöntemi (c) reaktif güç kompanzasyonu yöntemi (Katiraei and Iranavi 2006)



Şekil 2.10. Şekil 2.6'daki mikro şebeke sisteminin küçük işaret modeli (Katiraei and Iranavi 2006)

Katiraei and Iranavi (2006), Şekil 2.10'de blok diyagramı verilen Şekil 2.6'daki mikro şebeke sisteminin otonom çalışma modu için küçük işaret dinamik modelini çalışmalarında kullanmışlardır. Bu sistem, 1) Bara 1, 2) Bara 3'e bağlanan DG2 ve DG2'nin gerçek ve reaktif güç yönetim denetleyicileri, 3) Bara 4'e bağlanan DG3 ve DG3'e karşılık gelen gerçek ve reaktif güç yönetimi denetleyicileri ve 4) ortak bağlantı noktasına (PCC) bağlanan dağıtık hatlar, yükler ve sabit kondansatör bankı içeren şebeke olarak isimlendirilen dört alt sistemden oluşmuştur.

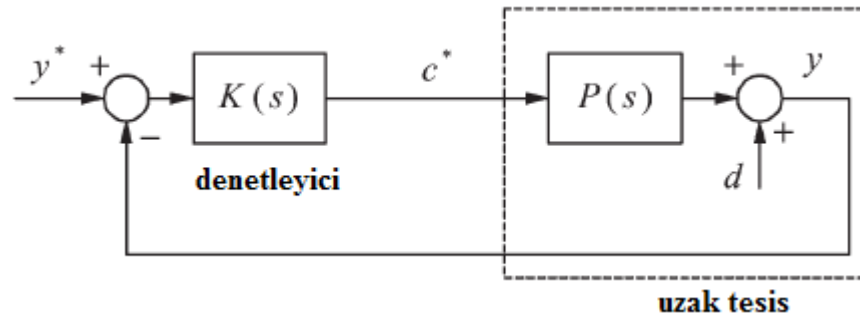
Çizelge 2.3. Sistemin paylaşım faktörleri (Katiraei and Iranavi 2006)

Sistem Durumları		Öz değerler											
		1,2	3,4	5,6	7,8	9,10	11,12	13,14	15,16	17,18	19,20	21,22	23,24
DG1	Stator	0.775	0.836	0.881	1.0	0.778	0.941	0.921	1.0	0.124	0.83	0.64	0.751
	Uyartı				0.345	0.299		0.12	0.226		0.427	0.931	1.0
	Rotor												1.0
DG2	Çevirici		0.115	1.0	0.719	1.0			0.132		0.326		0.276
	Kontrol		0.164	1.0	0.781	1.0			0.146		0.323	0.652	0.87
DG3	Çevirici		0.287	0.565	0.695	1.0		0.292	0.465		0.91	0.49	1.0
	Kontrol		0.286	0.562	0.695	1.0		0.291	0.462		0.91	1.0	1.0
Hatlar	Hat 1	0.94	0.961	0.93	0.995	0.712	1.0	0.587	0.762		0.787	0.559	0.8
	Hat2	0.131		0.14	0.324	0.814	0.104	0.189	0.556	1.0	0.27	0.124	0.2
	Hat3	0.138	0.191	0.423	0.5	0.285	0.135	0.278	0.299	1.0	0.75	0.43	0.8
PCC	Kondans. Bank.	1.0	0.895	0.573	0.322		0.784	0.364	0.263		0.13	0.18	0.264
	Paylaşım yükü							1.0					

Katiraei and Iranavi (2006), önermiş oldukları güç yönetim yaklaşımlarında mikro şebeke sisteminin 12 çift karmaşık eşlenik özdeğeri bulunduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir. Katiraei ve Iranavi, frekans DROOP ve gerilim DROOP tabanlı güç kontrol yaklaşımı kullanarak sistemin her bir durum değişkeninin salınım modları için normalize edilmiş paylaşım faktörlerini Çizelge 2.3'te göstermiş ve 0.1'in altındaki paylaşım faktörlerini çizelgeye dahil etmemişlerdir. Katiraei ve Iranavi, Çizelge 2.3'te gösterilen 1-22 arasındaki özdeğerlerin elektriksel modlara ve kontrol modlarına karşılık geldiğini ve ayrıca DG üniteleri arasında veya DG birimleri ile şebeke arasındaki etkileşimleri gösterdiğini, 23 ve 24 özdeğerlerinin ise sistemin geri kalanına göre DG1'in mekanik salınım modunu temsil ettiğini çalışmalarında ifade etmişlerdir. Çizelge 2.3 ayrıca DG1'in stator sargılarına karşılık gelen durum değişkenlerini ve sistem modlarını besleyen 1-2-3 numaralı şebeke hatlarını da göstermiştir. Katiraei ve Iranavi, stator sargılarını ve dağıtım hatlarını göz ardı etmenin yanlış sonuçlara sebep olabileceğini belirtmişlerdir. Katiraei ve Iranavi, (19,20) ve (21,22) özdeğer çiftlerinin

dağıtık üretim birimlerinin kontrol sistemleri aracılığıyla, DG birimleri arasındaki etkileşimlere karşılık geldiği sonucuna varmışlardır.

Prodanovic and Green(2006), çalışmalarında, bir mikro şebekede paralel bağlanmış eviricilerin kontrolü için dağıtık kontrol yöntemini kullanmış ve klasik kontrol yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Merkezi kontrole kıyasla dağıtık kontrol, harmonik ve geçiş gücü açısından avantajlı olmuştur. Senkron jeneratör çalışmasını taklit eden kontrol yöntemlerine kıyasla dağıtık kontrol, iyi gerilim dengesi ve düşük harmonik bozulma sağlamıştır. Prodanovic ve Green, üç adet 10 kVA'lık evirici için tasarlanmış kontrol sistemine ait deneysel sonuçları çalışmalarında göstermişlerdir.

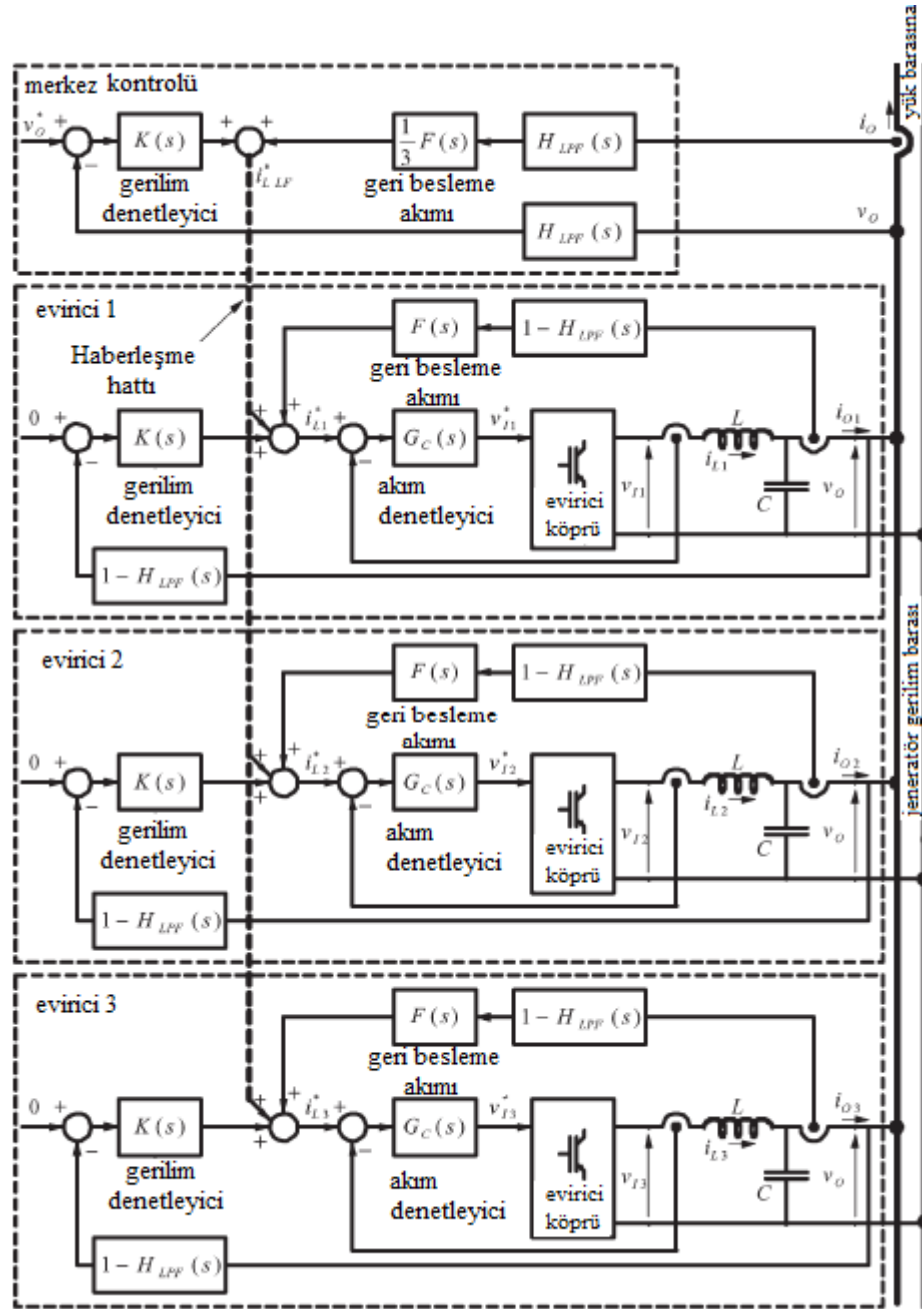


Şekil 2.11. Klasik kontrol yöntemi (Prodanovic and Green 2006)

Prodanovic and Green (2006), Şekil 2.11’da gösterilen klasik kontrol çevriminde $K(s)$ denetleyicisinin $P(s)$ tesisine doğrudan bağlandığını ve c^* sürücü sinyalinde band genişliği sınırlaması olmadığını çalışmalarında belirtmişlerdir. Prodanovic ve Green, dağıtık üretimde tesisin, bir evirici ve bu eviricinin akım denetleyicisinden oluştuğunu çalışmalarında belirtmişlerdir. Prodanovic ve Green, tesisin denetleyiciye uzaktan bağlanması durumunda kontrol edilen çıkış sinyalinin yüksek frekans bileşenleri sınırının, sürücü sinyalin dağıtıldığı band genişliği vasıtası ile saptandığını vurgulamışlardır.

Prodanovic and Green(2006), dağıtık kontrolü, kontrol çalışmasını bir frekans bölücü aracılığıyla merkezi denetim ile diğer denetim birimleri arasında dağıtma işlemi olarak tanımlamışlardır. Merkezi denetim birimi, düşük frekanslı referans gerilimin düzgün

bakılmaksızın temel frekanslı gerçek ve reaktif gücün birimler arasında paylaşılmasını sağlamıştır. Dengesiz akım tedarik eden ve geçici tepki veren kontrol gücü, merkezi denetleyici ve haberleşme bağlantısının band genişliği buna izin veriyorsa paylaşılmıştır.



Şekil 2.13. Paralel evirici sistemine süreksiz iletim modu uygulaması (Prodanovic and Green 2006)

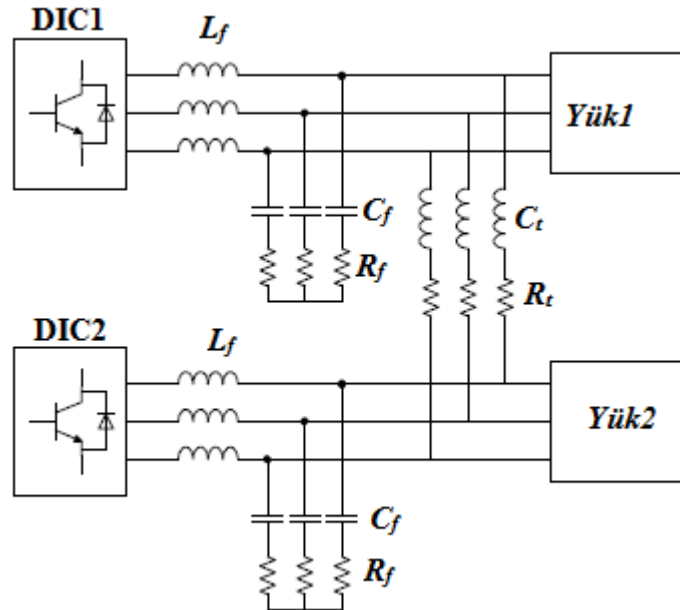
Prodanovic and Green (2006), çalışmalarında kullandıkları eviricinin, prensip olarak güç kalitesinin iyileştirilmesinden sorumlu bir denetleyici içerdiğini belirtmişlerdir. Şekil 2.13'de gösterilen evirici, baranın yerel geri besleme gerilimine ve sıfır referansa göre çalışmıştır. Yüksek frekans tepkisi, yük akımının neden olduğu bara gerilimine harmonik ve geçici bozulmaları bastırmak için kullanılmıştır. Prodanovic ve Green, ölçme hataları ve farklı eviricilerin parametre değişimi için kontrol yaklaşımının gürbüzlüğünü incelemişlerdir. Şekil 2.13'deki ilk birim, Δv_o çıkış geriliminin ölçüm hatası şeklinde ilk birimin çıkışına uygulanan bir bozucu etkiye sahiptir. Prodanovic ve Green, çıkış geriliminin d, q ve 0 bileşenlerine etki eden üç paralel kontrol çevrimi aracılığıyla tüm eksenlere uygulandığını çalışmalarında belirtmişlerdir.

Prodanovic and Green (2006), çalışmalarında üç adet 10 kVA'lık evirici için tasarlanmış dağıtık kontrol sistemine ait deneysel sonuçları göstermişlerdir. Prodanovic ve Green, geçiş gücü paylaşımının paralel bağlı eviriciler için önemli olduğunu belirtmişlerdir. Prodanovic ve Green, geçiş tepkisinin 2ms sürdüğünü ve kontrol sisteminin osilasyonsuz iyi bir kararlılık gösterdiğini vurgulamışlardır. Geçiş sonrası sistem kararlı duruma girmiş ve dengeli üç fazlı sistem karakteristiği göstermiştir. Üç fazlı gerilim ve akım değerleri sırasıyla 220 V_{rms} ve 42 A_{rms} olmuştur. Toplam çıkış gücü 28 kW olmuştur. Toplam harmonik bozulma (THD) açısından gerilim ve akım kalitesi, üç evirici için yüksek ve tutarlı olmuştur. Kapasitif etki gösteren tek fazlı diyotlu doğrultucu, güç kalitesi açısından evirici sistemi için en kötü durum örneği olarak ele alınmıştır. A-fazının RMS akımı, 3.4 tepe faktörü ile 16.4 A olmuştur. %0.9 ve %0.6 değerli negatif ve sıfır bileşenler ile faz gerilimleri, 219 V_{rms}, 220 V_{rms} ve 221 V_{rms} olmuştur. Sistemin ve A-fazının çıkış aktif ve reaktif güçleri, 2.5 kW ve 2.7 kVAr olmuştur. A-fazı için gerilimdeki toplam harmonik bozulma %6.7 olmuştur. Prodanovic ve Green, yerel denetleyicilerde referans çerçeve dönüşümü kullanılarak diğer iki faz %2.4 ve %2.2 THD seviyelerini gözlemlemişlerdir.

Lee *et al.* (2009) çalışmalarında düşük gerilimli mikro şebeke sisteminde güç paylaşım sorunlarını iyileştirmek amacıyla dağıtık enerji kaynaklarının ara birim çeviricileri için minimum çıkışlı akım kontrol yöntemi sunmuşlardır. Önerilen çalışma ile yüklerin ve iletim hattı karakteristiklerinin farklı çalışma şartları altında çalışan çeviriciler için en

düşük çıkış akımı elde edilebilecek uyarlanmış DROOP kontrol yöntemi incelenmiştir. Klasik DROOP kontrol yönteminde dengesiz aktif güç paylaşımı ve devridaim reaktif akımı kısmen giderilirken, bu çalışmada uyarlanmış DROOP kontrol yöntemi ve minimum çıkış akımı izleme yöntemi ile çıkış akımı azaltılmıştır. Lee ve arkadaşları çalışmalarında, Şekil 3.14'te gösterilen blok diyagramı kullanmışlardır. Şekil 3.14'te gösterilen sistemin çalışma mantığı 3. bölümde anlatılmıştır.

Lee *et al.* (2009), Şekil 2.14'te gösterilen devreyi simülasyon çalışmalarında kullanmışlardır. Şekil 2.14'teki sistem R-L güç hattı ile bağlı olan 2 adet dağıtık üretim kaynağı arabirim çevircisinden (DIC) oluşmuştur. Sistem gerilimi $220 \text{ V}_{\text{rms}}$ ve frekansı 60 Hz olarak iki DIC birimine uygulanmıştır. Çıkış indüktör filtresi $L_f = 1 \text{ mH}$ ve çıkış kondansatör filtresi $C_f = 10 \mu\text{F}$ anahtarlama dalgalanmalarını azaltmak için kullanılmıştır. Lee ve arkadaşları, iletim hattı karakteristiğine benzetmek amacıyla R-L güç hattını $R_t + jX_t = 1 + j0,754 (\Omega)$ olarak seçmişlerdir. Lee ve arkadaşları, 690 W'lık R yük dengesini DIC₁'e ve 1960W+690Var güçlü R-L yük dengesini DIC₂'ye uygulamışlardır. Lee ve arkadaşları, DIC birimlerinin aynı kapasiteye sahip oldukları varsayımında bulunmuşlardır.



Şekil 2.14. DIC birimlerinden oluşan sistem (Lee *et al.* 2009)

Çizelge 2.4. DIC birimleri arasındaki dağıtım (Lee *et al.* 2009)

Yük1=690W, Yük2=1960W+690Var	1.Durum		P(W)	Q(Var)	$ i^{e^+} $ (A)	δ
	Klasik DROOP	DIC1	1297	-129	4.847	0
		DIC2	1297	807	5.742	0
	Uyarlanmış DROOP	DIC1	978	113	3.709	53
		DIC2	1560	550	6.273	53
	Önerilen DROOP	DIC1	1307	353	4.997	-52
		DIC2	1300	328	5.039	22
Yük1=1960W, Yük2=690W+690Var	2.Durum		P(W)	Q(Var)	$ i^{e^+} $ (A)	δ
	Klasik DROOP	DIC1	1304	539	5.285	0
		DIC2	1304	156	4.898	0
	Uyarlanmış DROOP	DIC1	1395	428	5.519	53
		DIC2	1157	249	4.462	53
	Önerilen DROOP	DIC1	1318	315	5.068	1
		DIC2	1301	384	5.032	-31
Yük1=0W, Yük2=1390W+690Var	3.Durum		P(W)	Q(Var)	$ i^{e^+} $ (A)	δ
	Klasik DROOP	DIC1	687	-170	2.631	0
		DIC2	687	850	4.111	0
	Uyarlanmış DROOP	DIC1	360	95	1.393	53
		DIC2	997	575	4.344	53
	Önerilen DROOP	DIC1	738	145	2.779	-89
		DIC2	638	536	3.133	39

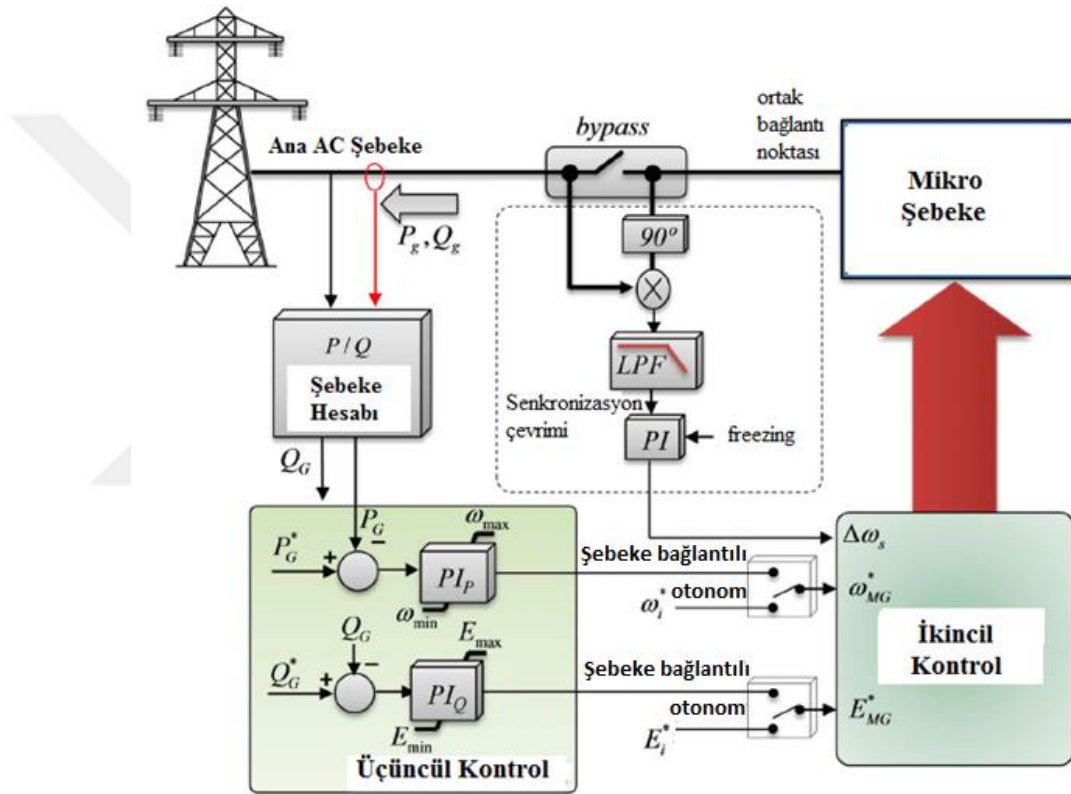
Lee *et al.* (2009), üç farklı yük durumu için Çizelge 2.3'te gösterilen farklı DROOP kontrol yöntemleri ile yaptıkları simülasyon çalışmasının kararlı durum güç paylaşımı sonuçlarını elde etmişlerdir. Lee ve arkadaşları, birinci durum için klasik DROOP kontrol yöntemi ile $P_{err} = \%0$ hatalı gerçek güç paylaşımı elde etmelerine rağmen, DIC birimleri arasında büyük devridaim reaktif gücü oluştuğunu ve çıkış akımı büyüklüğü farkının $i^{e^+}_{err} = \%8.5$ olduğunu belirtmişlerdir. Lee ve arkadaşları, uyarlanmış DROOP kontrol yöntemi ile devridaim reaktif gücü azalırken gerçek güç paylaşım miktarının da azaldığını gözlemlemişlerdir. Uyarlanmış DROOP kontrol yönteminde

$P_{err} = \%22.9$ ve $i^{e+}_{err} = \%25.7$ değerleri oluşmuştur. Lee ve arkadaşlarının önermiş oldukları minimum çıkış akımı izleme yönteminde ise $P_{err} = \%0.3$ hata ile iyi bir gerçek güç paylaşımı ve $i^{e+}_{err} = \%0.4$ değerinde çıkış akımı büyüklüğü farkı elde etmiş ve devridaim reaktif gücü oluştuğunu da belirtmişlerdir. Lee ve arkadaşları, ikinci durumda Yük1'in gerçek gücü Yük2'nin gerçek gücünden daha büyük ve Yük1'in reaktif gücünü Yük2'den daha küçük olarak seçmişlerdir. Lee ve arkadaşları, üçüncü durumda Yük1'i neredeyse yüksüz olarak seçmişlerdir. Lee ve arkadaşları, ikinci ve üçüncü durumda ilk durumdakine benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Lee ve arkadaşları, klasik DROOP yönteminde DIC birimleri arasında oluşan akım miktarının, uyarlanmış DROOP yöntemi ile azaltıldığını vurgulamışlardır.

Vasquez *et al.* (2011), çalışmalarında, mikro şebekenin akıllı ve esnek olması için hiyerarşik kontrol yöntemini önermişlerdir. Vasquez ve arkadaşları, 3 seviyeli hiyerarşik kontrol yöntemini, AC ve DC mikro şebekelere uygulamışlardır. Bu 3 seviyeli hiyerarşik kontrol, çıkış sanal empedansından oluşan birincil kontrol, birincil kontrol tarafından üretilen sapmaların geri yüklenmesini sağlayan ikincil kontrol ve mikro şebeke ile harici bir elektrik dağıtım sistemi arasındaki güç akışını düzenleyen üçüncül kontrolden oluşmuştur.

Vasquez *et al.* (2011), çalışmalarında hiyerarşik kontrolün üçüncül kontrol seviyesi için Şekil 2.15'teki kontrol yapısını AC mikro şebekeye uygulamışlardır. Vasquez ve arkadaşları, mikro şebekenin şebekeye bağlamak için şebekenin frekans ve geriliminin ölçülmesi gerektiğini ve bu ölçüm sonucunu da ikincil kontrol çevriminin verdiğini çalışmalarında belirtmişlerdir. Vasquez ve arkadaşları, şebeke ve mikro şebeke arasındaki fazı, Şekil 2.15'te gösterilen senkronizasyon çevrimi vasıtasıyla senkronize etmişlerdir. Bu senkronizasyon çevrimi, faz kilitle çevriminden (PLL) oluşmuştur. Vasquez ve arkadaşları, AC mikro şebekeler için önermiş oldukları hiyerarşik kontrol yapısını simülasyon ortamında 5 kVA'dan oluşan 3 adet eviriciye uygulamışlardır. Denetim, akım ve gerilim çevrimlerinden, P ve Q hesaplamalarından ve DROOP kontrol çevrimlerinden oluşmuştur. Vasquez ve arkadaşları, mikro şebeke sisteminin aktif gücü ve reaktif paylaşım dinamiğini incelemişlerdir. Şebeke referansı $t=2.5$ sn değerinde 0-1kW arasında üçüncül kontrol ile sabitlenmiş ve her bir evirici 650 W

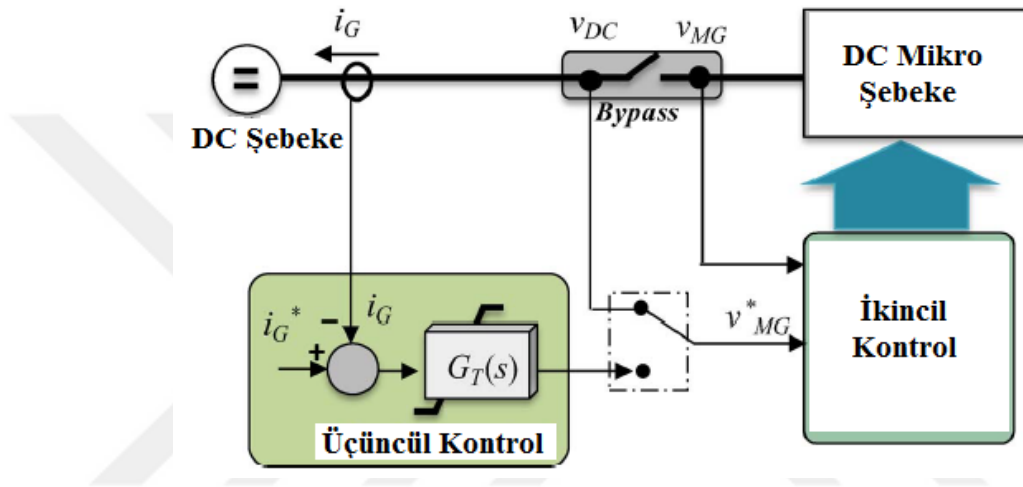
vermiştir. Otonom çalışma moduna, $t=2.5$ sn anında geçilmiştir. Eviricilerden biri $t=5$ sn anında devre dışı bırakılmış ve diğer iki evirici, yüklere güç sağlamıştır. Kalan iki eviriciden biri $t=7$ sn anında devre dışı bırakılmış ve sadece üçüncü evirici yüklere gerekli tüm gücü temin etmiştir. Vasquez ve arkadaşları, önerilen hiyerarşik kontrol yöntemi ile hem şebeke bağlantılı hem otonom mod çalışma durumlarında mikro şebekenin esnek çalışmasını elde etmişlerdir.



Şekil 2.15. AC mikro şebekenin üçüncül kontrolü ve senkronizasyon çevrimi (Vasquez *et al.* 2011)

Vasquez *et al.* (2011), çalışmalarında hiyerarşik kontrolün üçüncül kontrol seviyesi için Şekil 2.16'daki kontrol yapısını DC mikro şebekeye uygulamışlardır. Mikro şebeke DC kaynağa bağlandıktan sonra, mikro şebekenin gerilim değiştirilerek güç akışı kontrol edilmiştir. Vasquez ve arkadaşları, ölçülen i_G akımını enerji çekme veya gönderme durumuna göre pozitif veya negatif olan i_G^* akımı ile karşılaştırmışlardır. Vasquez ve arkadaşları, simülasyon çalışmalarında önermiş oldukları hiyerarşik kontrol yapısını DC mikro şebeke oluşturan iki adet DC/DC buck çeviriciye uygulamışlardır. Vasquez ve

arkadaşları, mikro şebeke gerilimini 400 V olarak seçmişler ve sanal çıkış empedansının değeri 2Ω olmuştur. Vasquez ve arkadaşları, birincil ikincil ve üçüncül kontrol yöntemiyle DC mikro şebekenin gerilim ve akım karakteristiğinde birincil kontrolü 8 ms'de devreye girdiğini ve 15 ms'de yükün ani bir basamağı olduğunu gözlemlemişlerdir. Vasquez ve arkadaşları, akımdaki artışın daha yüksek gerilim düşümüne sebep olduğunu vurgulamışlardır.

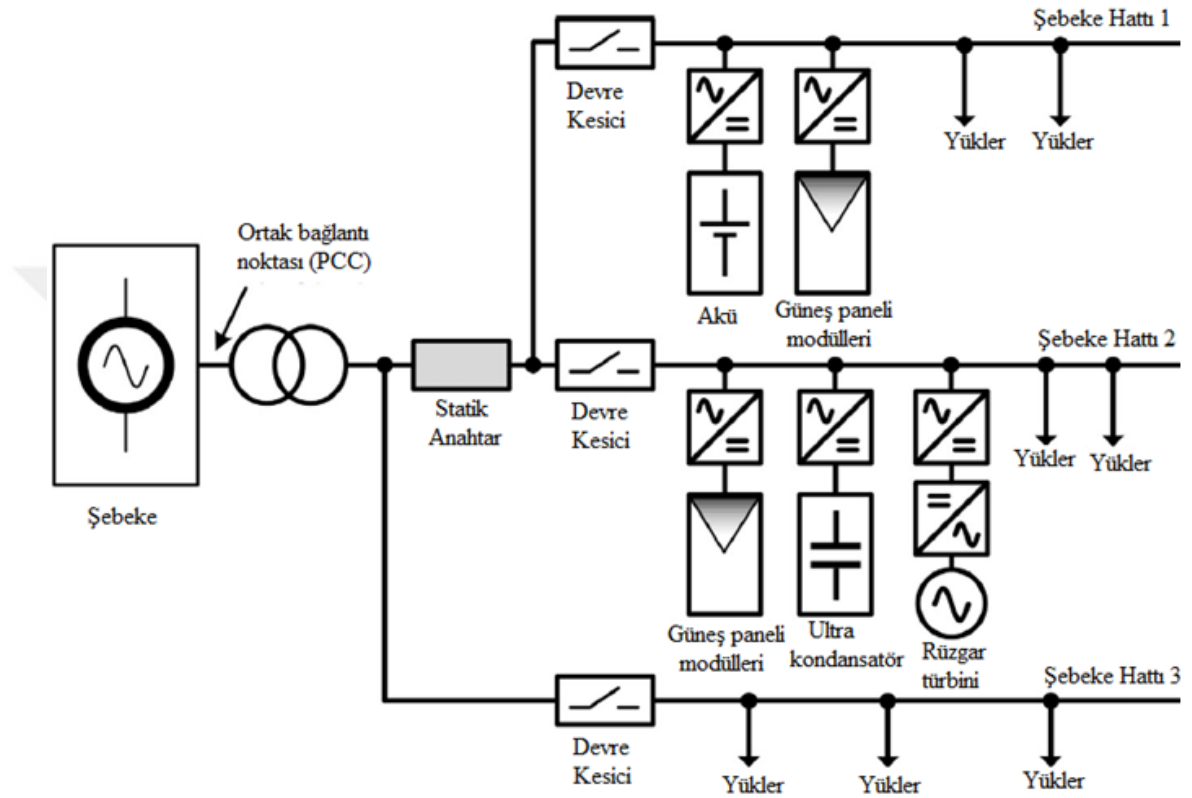


Şekil 2.16. DC mikro şebekenin üçüncül kontrol yapısı (Vasquez *et al.* 2011)

Patrao *et al.* (2014), çalışmalarında mikro şebeke mimarileri için bir literatür incelemesi yapmışlardır. Bu çalışmada ele alınan mimariler; AC mikro şebeke, DC mikro şebeke, hibrit AC-DC mikro şebeke, DC depolama ile AC mikro şebeke, DC bölgesel mikro şebeke ve mikro şebeke tabanlı katı hal transformatörü (SST) kullanan mimarileridir.

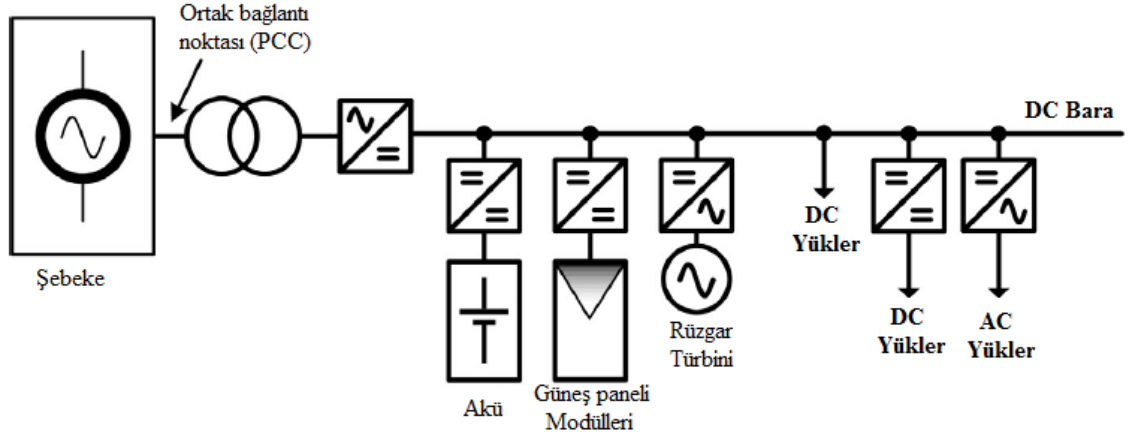
Patrao *et al.* (2014), AC mikro şebeke mimarisine bir örnek Şekil 2.17'de gösterilen yapıyı ele almışlardır. Patrao ve arkadaşları, AC mikro şebeke oluşumunun, bir veya daha fazla AC bara ve herhangi bir cihazın bir AC arabirim vasıtasıyla mikro şebekeye bağlanması ile gerçekleştiğini ve bu sebeple dağıtık üretim birimlerinin çoğunda DC/AC güç elektroniği arabirimlerinin kullanılması gerektiğini çalışmalarında belirtmişlerdir. Patrao ve arkadaşları, mikro şebeke, ortak bağlantı noktasında (PCC) şebekeye bağlandığı için, mikro şebekenin tamamının dağıtım şebekesi olarak güç sağlayabildiğini vurgulamışlardır. Şekil 2.17'da gösterilen AC mikro şebeke yapısı 3

AC şebeke hattından oluşmuştur. Şebeke Hattı 1 ve 2, dağıtık üretim kaynakları ve kritik yükler içerirken Şebeke Hattı 3, kritik olmayan yükler içermiştir. Her bir şebeke hattı yükler, dağıtık üretim kaynakları ve enerji depolama birimlerinden oluşmuştur.



Şekil 2.17. AC mikro şebeke mimarisi (Patrao et al. 2014)

Patrao et al. (2014), AC Mikro şebekeler için 4 seviyeli hiyerarşik kontrol yapısının literatürde önerildiğini belirtmiştir. Üçüncül kontrol seviyesi, mikro şebeke güç akışlarını yönetmek için; ikincil kontrol seviyesi, mikro şebekedeki elektrik seviyelerini korumak için ve birincil kontrol seviyesi, sistemi kararlı hale getirmek için literatürde kullanılmıştır. Ayrıca, iç gerilim ve akım kontrol çevrimleri tarafından oluşturulan sıfır seviyesi tanımlanmıştır. Patrao ve arkadaşları, DROOP kontrol algoritmasından oluşan birincil seviye kontrol yöntemi, AC mikro şebeke mimarilerinin denetiminde en yaygın kullanılan yöntem olduğunu belirtmişlerdir. DROOP kontrol yöntemi, herhangi bir kritik haberleşme bağlantısını kullanan bir yük paylaşım yaklaşımı sağlamıştır.

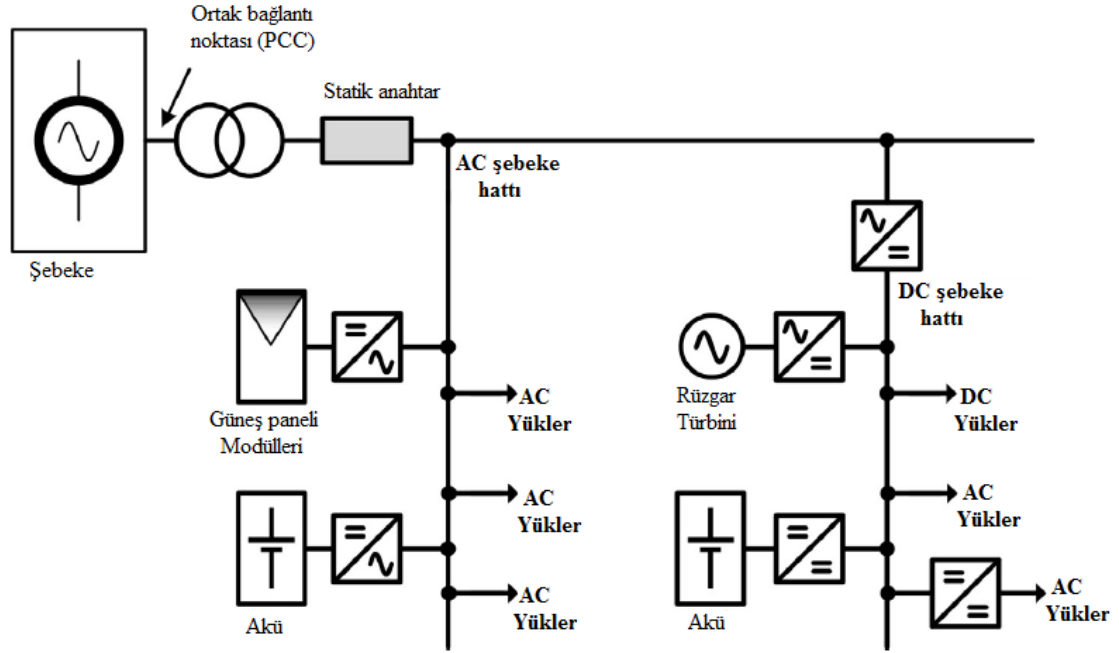


Şekil 2.18. DC mikro şebeke mimarisi (Patrao *et al.* 2014)

Patrao *et al.* (2014), DC mikro şebeke mimarisine örnek olarak Şekil 2.18'deki yapıyı incelemişlerdir. DC mikro şebeke, bir AC/DC dönüştürücü aracılığıyla şebekeye bağlanmıştır. Mikro şebekede üretilen gücün fazlasının dağıtılması için, güç elektroniği arabirimleri iki yönlü olmuştur. Dağıtık üretim birimlerinin, baraya bağlanması için bir DC/DC veya AC/DC güç elektroniği arabirimi gerekmiştir.

Patrao *et al.* (2014), DC mikro şebeke mimarisi, AC mikro şebekeye göre bazı avantajlarının bulunduğunu belirtmişlerdir. Patrao ve arkadaşları, DC mikro şebeke mimarisinde AC mikro şebekelere göre güç dönüştürücü sayısının azaldığını ve DC baranın kalitesine ve mikro şarj gereksinimine göre DC bara gerilimini uyarlayanın mümkün olduğunu vurgulamışlardır. DC mikro şebeke mimarisinin en büyük dezavantajı, şebekedeki tüm güç akışını yöneten çift yönlü AC/DC bağlantısının güvenilirliği azaltması olmuştur.

Patrao *et al.* (2014), AC-DC hibrid mikro şebeke mimarisine örnek olarak Şekil 2.19'daki yapıyı incelemişlerdir. AC-DC hibrid mikro şebeke mimarisi, çift yönlü bir AC/DC dönüştürücü ile birbirine bağlanmış bir AC mikro şebeke ve DC alt şebekeden oluşmuştur. Patrao ve arkadaşları, dağıtık üretim kaynaklarının AC veya DC şebeke hatlarına bağlanabildiğini belirtmişlerdir. Patrao ve arkadaşları, AC yükler AC şebeke hattına ve DC yükler DC şebeke hattına bağlanırken, gereken gerilim seviyesini ayarlamak için bir güç dönüştürücüsü kullanıldığını ifade etmişlerdir.

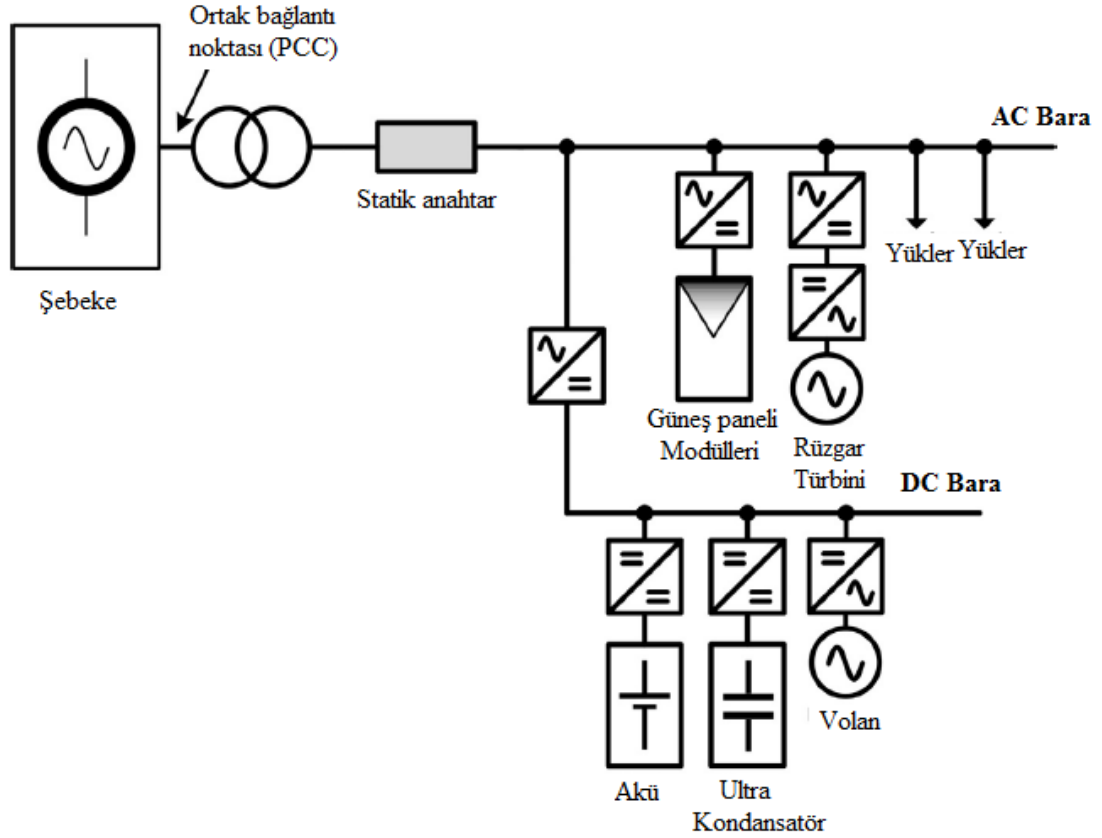


Şekil 2.19. Hibrit AC-DC mikro şebeke mimarisi (Patrao *et al.* 2014)

Patrao *et al.* (2014), AC-DC hibrid mikro şebeke mimarisinin AC ve DC mikro şebekelerin avantajlarını bir araya getirdiğini ifade etmişlerdir. AC-DC hibrid mikro şebeke mimarisi, ana şebekeye doğrudan bağlantı olduğu için yüksek güvenilirlik sağlamıştır. DC şebeke hattı daha az sayıda ve basit güç dönüştürücülerin kullanımını sağlamıştır. Bu AC-DC hibrid mikro şebeke mimarisi, kritik yükler (DC şebeke hattında) ve daha büyük yükler (AC şebeke hattında) ile birlikte kurulumlar için uygun olmuştur.

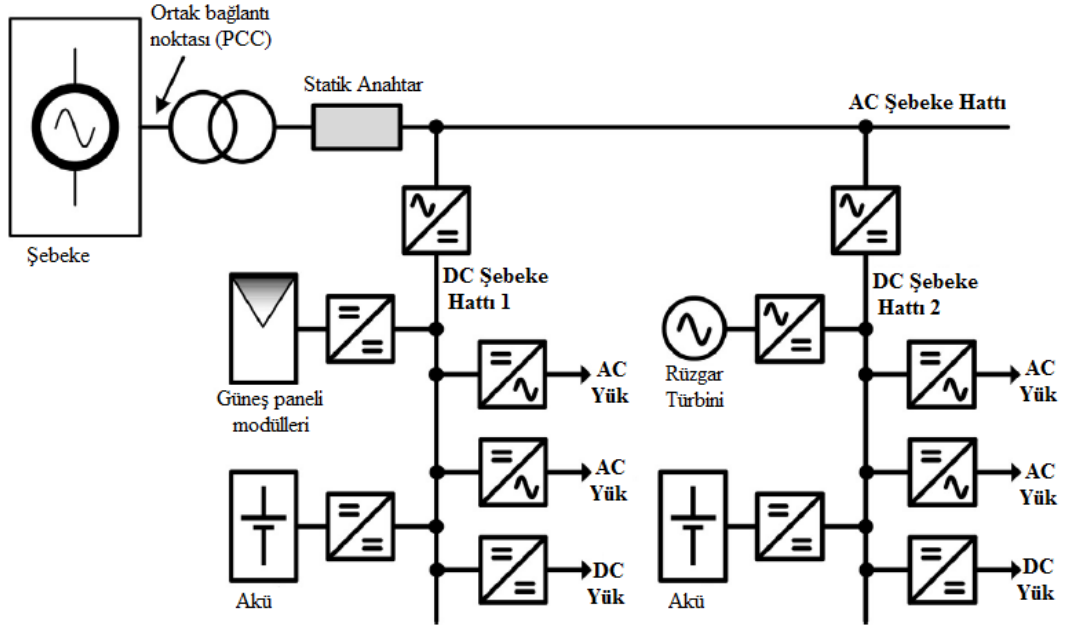
Patrao *et al.* (2014), DC depolamalı AC mikro şebeke mimarisine örnek olarak Şekil 2.20'deki yapıyı incelemişlerdir. Dağıtık üretim kaynakları ve AC yükler AC baraya bağlanırken AC mikro şebekenin esnekliğini arttırmak için, enerji depolama üniteleri ayrı bir DC baraya yerleştirilmiştir. Şebeke ile ara bağlantı, statik bir anahtar vasıtasıyla yapılmıştır. Patrao ve arkadaşları, bu statik anahtarın otonom çalışma modundan şebeke bağlantılı çalışma modlarına geçişleri ve tersini yönettiğini belirtmişlerdir. Ayrı bir DC baraya yerleştirilen enerji depolama ünitelerini bağlamak için bir AC DC çift yönlü güç elektroniği arabirimi kullanılmıştır. Patrao ve arkadaşları, DC depolamalı AC mikro şebeke mimarisinin çalışma performansı açısından AC-DC hibrid mikro şebeke

mimarisine benzediğini ve ondan farklı olarak enerji depolamasını daha kolay yönettiğini ifade etmişlerdir.



Şekil 2.20. DC depolamalı AC mikro şebeke mimarisi (Patrao *et al.* 2014)

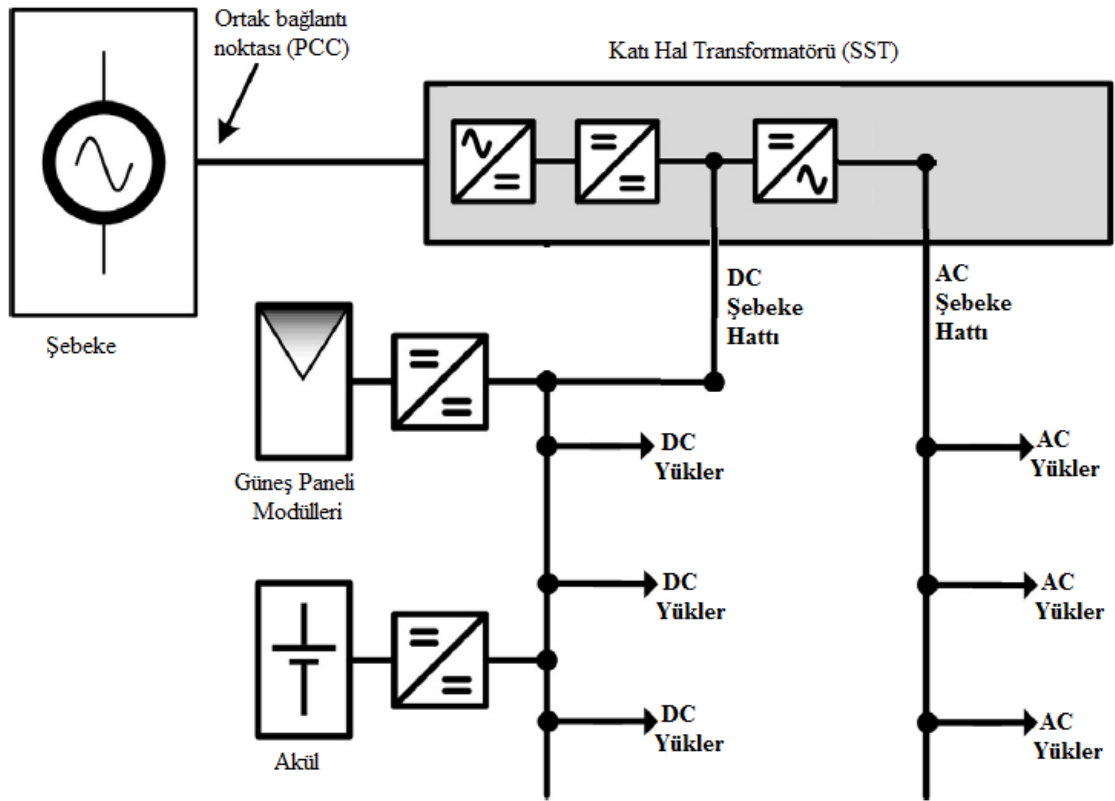
Patrao *et al.* (2014), DC bölgesi mikro şebeke mimarisine örnek olarak Şekil 2.21'deki yapıyı incelemişlerdir. DC bölgesi mikro şebekede, DC şebeke hatları, merkezi AC/DC dönüştürücüler vasıtasıyla ana AC baraya bağlanmıştır. Dağıtık üretim kaynakları ve yükler, DC şebeke hattına uygun güç elektroniği arabirimi ile bağlanmıştır. Patrao ve arkadaşları, DC bölgesi mikro şebeke mimarisinde, DC şebeke hatları farklı gerilim seviyeleri sağlayarak mikro şebekenin performansını artırdığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.21. DC bölge mikro şebeke mimarisi (Patrao *et al.* 2014)

Patrao *et al.* (2014), DC bölge mikro şebeke mimarisinin, DC mikro şebeke ile aynı avantaj ve dezavantajları sağladığını ancak DC bölge mikro şebekenin, farklı DC bara gerilimleri ve yönetim tekniklerine müsaade ettiğini ifade etmişlerdir. DC bölge mikro şebeke mimarisinin en büyük dezavantajı, şebeke hatları arasındaki ara bağlantı nedeniyle karmaşıklığın artması olmuştur. Patrao ve arkadaşları, DC bölge mikro şebeke mimarisinin en yüksek gerilim kalitesi ve güvenilirliğin gerekli olduğu tesisler için uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Patrao *et al.* (2014), katı hal transformatörü tabanlı mikro şebeke mimarisine örnek olarak Şekil 2.22'deki yapıyı incelemişlerdir. Bu tür bir mimaride şebeke frekans transformatörünün yerini bir katı hal transformatörü (SST) almıştır. Şebeke frekans transformatörlerine göre hem boyutu hem de ağırlığı azaltan ve yüksek frekanslı bir transformatör olan SST, mikro şebekeye AC ve DC şebeke hatları sağlamıştır. Ayrıca, SST, şebeke hatları ve ana şebeke arasındaki güç akışını yönetmiştir. AC yükler doğrudan AC şebeke hattına, DC yükler ise DC şebeke hattına bağlanmıştır.



Şekil 2.22. Katı hal transformatörü tabanlı mikro şebeke mimarisi (Patrao *et al.* 2014)

Patrao *et al.* (2014), katı hal transformatörü tabanlı şebeke mimarinin avantajlarının yüksek kaliteli enerji, basit elektronik arabirimler, DC yüklerin kolay bağlanması, AC şebeke yükleri ile uyumluluk ve enerji depolama ünitelerinin iyi yönetimi olduğunu ifade etmişlerdir. Katı hal transformatörünün sistemin güvenilirliğini ve verimliliğini düşüren bir seri bağlı güç dönüştürücüsü olması ana dezavantaj olmuştur. Patrao ve arkadaşları, düşen verimliliğin şebeke hatlarına bağlı az sayıda güç dönüştürücüsü ile telafi edildiğini belirtmişlerdir.

Patrao *et al.* (2014), çalışmalarında incelemiş oldukları mikro şebeke mimarilerinin performans açısından karşılaştırmasını Çizelge 2.5 ile vermişlerdir.

Çizelge 2.5. İncelenen mikro şebeke mimarilerinin performans karşılaştırması (Patrao *et al.* 2014)

	AC Mikro Şebeke	DC Mikro Şebeke	Hibrid AC-DC Mikro Şebeke	DC depolamalı AC mikro şebeke	DC bölgesel mikro şebeke	SST tabanlı Mikro şebeke
Seri bağlı güç çevirici	Yok	Var	Yok	Yok	Var	Var
Şebeke ile uyumlu cihazlar	Var	Yok	Var	Var	Yok	Var
Mevcut tesislerin yeniden yapılandırılma imkanı	Var	Yok	Birkaç uyarılma ile	Var	Yok	Birkaç uyarılma ile
Gereken güç elektroniği arabirimi sayısı	Fazla	Orta	Çok az	Az	Orta	Çok az
Gereken güç elektroniği arabirimlerinin karmaşıklığı	Karmaşık	Basit	Basit	Basit	Basit	Basit
Mikro şebekedeki enerjinin kalitesi	Düşük	Yüksek	Orta	Düşük	Yüksek	Çok yüksek
Enerji depolama yönetiminin kolaylığı	Yok	Var	Yok	Var	Var	Var

Yapılan bu kısa literatür incelemesinden anlaşıldığı üzere; akıllı şebekelerin bir alt dalı olan mikro şebeke yapılarında etkili ve verimli bir denetim ve yönetim için merkezi olmayan ve hiyerarşik kontrol oldukça önemli bir yere sahiptir. Bunun sebeplerinin başında dağıtık üretimde ve mikro şebeke sistemlerinde sistem bileşenlerinin her birinin birbirinden bağımsız yani dağıtık, aynı zamanda hiyerarşik bir işleyiş içerisinde denetlenmesi gerektiği gelmektedir.

Bir sonraki bölümde enerji sistemleri ile ilgili temel bilgiler ve hem dağıtık hem de hiyerarşik denetim için önemli alt yapı bilgileri verilecektir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Aynı anma gerilimli ve birbirine bağı elektrik tesisine şebeke denir. Bir elektrik şebekesinde aşağıdaki özellikler bulunmalıdır:

- Elektrik iletim ve dağıtım şebekelerinin, elektrik enerjisinin üretiminden tüketimine kadar enerjinin kesintisiz ve güvenilir bir şekilde iletilmesini ve dağıtılmasını garanti etmesi gerekir.
- Elektrik şebekelerinin planlanmasının ve kurulumunun çok iyi yapılmış olması gerekir.
- Dağıtım şebekelerinin hat başında, hat ortasında ve hat sonunda bulunan tüketicilerin hepsinin aynı sabit gerilim ve frekanstaki elektrik enerjisini kullanabilmelerini sağlaması gerekir.
- Elektrik şebekelerinin her an değişen durumlara ve güçlüklerle yanıt verebilmesi gerekir.

Elektrik şebekeleri, gerilimlerine ve dağıtım şekillerine göre sınıflandırılır.

3.1. Gerilimlerine Göre Şebeke Çeşitleri

Kullanıldıkları gerilime göre şebeke çeşitleri dört grupta incelenir:

- Alçak gerilim şebekeleri: 1-1000 V arası
- Orta gerilim şebekeleri: 1-35 kV arası
- Yüksek gerilim şebekeleri: 35-154 kV arası
- Çok yüksek gerilim şebekeleri: 154 kV'den büyük

3.1.1. Alçak gerilim şebekeleri

Alçak gerilim şebekeleri 1-1000 V arası çalışma gerilimine sahip şebekelerdir. Alçak gerilim şebekeleri dağıtım trafolarından tüketicilere kadar olan elektrik hatlarından oluşmaktadır. Türkiye’de son kullanıcılara alçak gerilim 220 Volt ve 380 Volt olarak sağlanmaktadır.

3.1.2. Orta gerilim şebekeleri

Orta gerilim şebekeleri 1 kV ile 35 kV arasındaki gerilimlere sahip şebekelerdir. Orta gerilim şebekeleri, çok yüksek gerilim şebekeleri ve yüksek gerilim şebekeleri ile alçak gerilim şebekelerini birbirine bağlamak amacı ile kullanılmaktadır.

Yüksek gerilimlerin doğrudan son kullanıcılara verilmesi güvenlik ve izolasyon açısından sağlıklı değildir. Bu nedenle yüksek gerilimler, gerekli gerilim değerlerine indirilerek orta gerilim şebekelerine bağlanırlar. Elektrik enerjisi küçük şehirlere ve sanayi bölgelerine orta gerilim şebekeleri vasıtası ile taşınarak şehirlerin girişindeki trafolarla bağlanıp buradan da son kullanıcılara dağıtılmaktadır.

Orta gerilim şebekeleri olarak Türkiye’de 10 kV, 15 kV, 31,5 kV ve 34,5 kV’lik gerilimler kullanılmaktadır. Hat gerilimi, orta gerilim şebekelerinde kullanılan enerji nakil hatlarının uzunluğuna göre tespit edilmektedir. Buna göre iletim hatlarının uzunluğuna göre aşağıdaki gibi bir sınıflandırma yapılmaktadır:

- Uzunluğu 10 km’ye kadar olan enerji nakil hatlarında hat gerilimi olarak 3-10 kV,
- Uzunluğu 20-30 km arasındaki enerji nakil hatlarında hat gerilimi olarak 10-20 kV,
- Uzunluğu 30-70 km arasındaki enerji nakil hatlarında hat gerilimi olarak 20-35 kV’luk gerilimlerin kullanılması uygundur.
- Uzunluğu 70 km’yi geçen enerji nakil hatlarında ise hat gerilimi olarak yüksek gerilimler kullanılmaktadır.

3.1.3. Yüksek gerilim şebekeleri

Yüksek gerilim şebekeleri, çalışma gerilimi 35kV ile 154kV arasındaki gerilimlere sahip şebekelere denilmektedir. Yüksek gerilimler dağıtım için uygun olmayıp, genellikle yüksek gerilimde dağıtım yapılmamaktadır. Alçak gerilimlerde güç kaybı ve gerilim düşümünün fazla olmasından dolayı, uzak mesafelere enerji iletiminin yapılabilmesi için güç kaybı ve gerilim düşümünün daha az olduğu yüksek gerilimler kullanılmaktadır. Dolayısıyla yüksek gerilimler iletim için uygun gerilimlerdir.

Türkiye’de yüksek gerilim değeri olarak 66 kV ve 154 kV gerilimleri kullanılır. Örneğin, Kuzey – Batı Anadolu Şebekesi 154 kV’lik gerilimle beslenirken Güney Anadolu Şebekesi 66 kV’lik gerilimle beslenmektedir.

Enerji nakil hattı uzunluğuna göre yüksek gerilim şebekelerinde hat gerilimi aşağıdaki gibidir:

- 70-150 km arasındaki enerji nakil hattı uzunluklarında hat gerilimi olarak 60-100 kV,
- 150-230 km arasındaki enerji nakil hattı uzunluklarında hat gerilimi olarak 100-154 kV ve
- 230 km’den uzun arasındaki enerji nakil hattı uzunluklarında hat gerilimi olarak çok yüksek gerilimler kullanılır.

3.1.4. Çok yüksek gerilim şebekeleri

Çok yüksek gerilim şebekeleri 154 kV’nin üzerindeki gerilimlere sahip şebekelerdir. Türkiye’de çok yüksek gerilim olarak 380 kV kullanılırken, yabancı ülkelerde 500 ve 750 kV’ye kadar gerilimler kullanılmaktadır. Çok yüksek gerilim şebekeleri şehirlerarası ve santraller arası bağlantı için tesis edilmektedir.

3.2. Dağıtım Şekillerine Göre Şebeke Çeşitleri

Elektrik enerjisinin üretildiği santraller genellikle yerleşim birimlerine uzak olduğu için üretilen elektrik enerjisini taşımak için gereklidir. Elektrik enerjisinin tüketicilere ulaştırılması amacı ile tesis edilen iletim ve dağıtım şebekeleri, iletimin ve dağıtımın yapılacağı yerleşim yerlerinin özelliklerine göre; en uygun, güvenli ve kesintisiz enerji verebilecek özellikte olmalıdır.

Yerleşim yerlerinde döşenen hat parçalarının birbirine eklenmesinden kollar ve kolların birbirine eklenmesi ile dağıtım şebekeleri meydana gelmektedir.

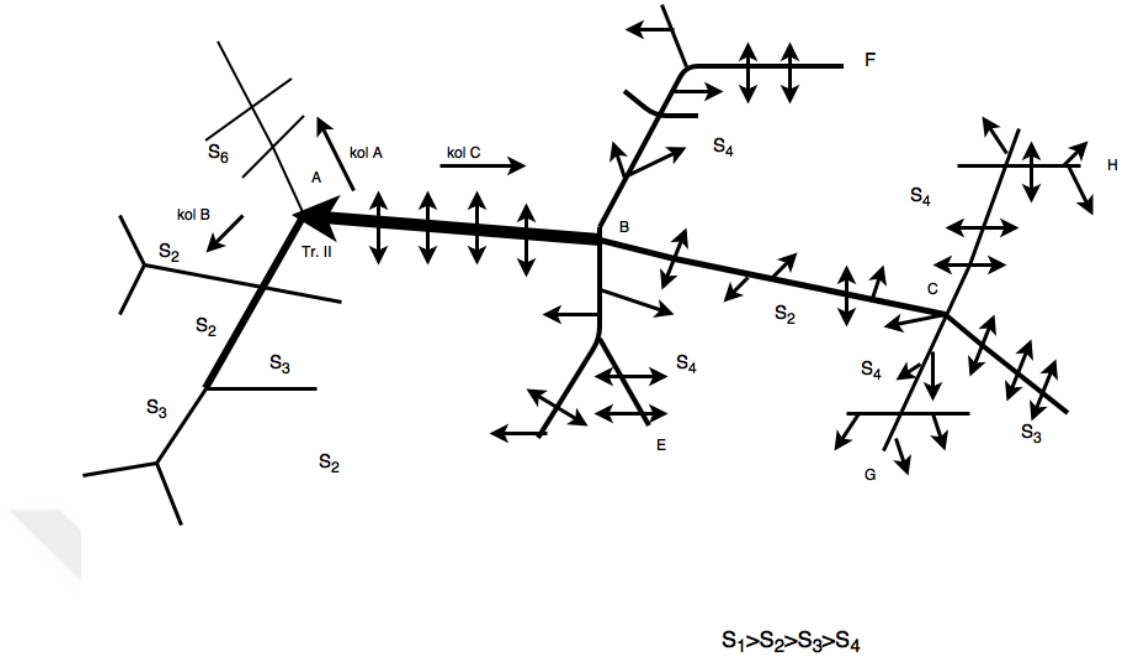
Dağıtım şekillerine göre en çok kullanılan şebekeler aşağıdaki gibidir:

- Dallı Şebekeler
- Ring Şebekeler
- Ağ Şebekeler
- Enterkonnekte Şebekeler

3.2.1. Dallı (radyal) şebekeler

Sanayi merkezleri, şehir, kasaba, köy gibi yerleşim merkezlerinde, beslemenin genellikle tek kaynaktan yapıldığı şebeke çeşidine dallı şebekeler denilmektedir.

Dallı şebekelerde dağıtım trafoları, elektrik enerjisinin dağıtılacağı yerin yük bakımından ağırlık merkezine yerleştirilir. Bu trafodaki elektrik önce kalın kollara daha sonra ince kollara ve dallara ayrılarak son kullanıcıya ulaşmaktadır.



Şekil 3.1. Dalli şebekedeki ana hatlar ve branşmanlar (Ceylan 2012)

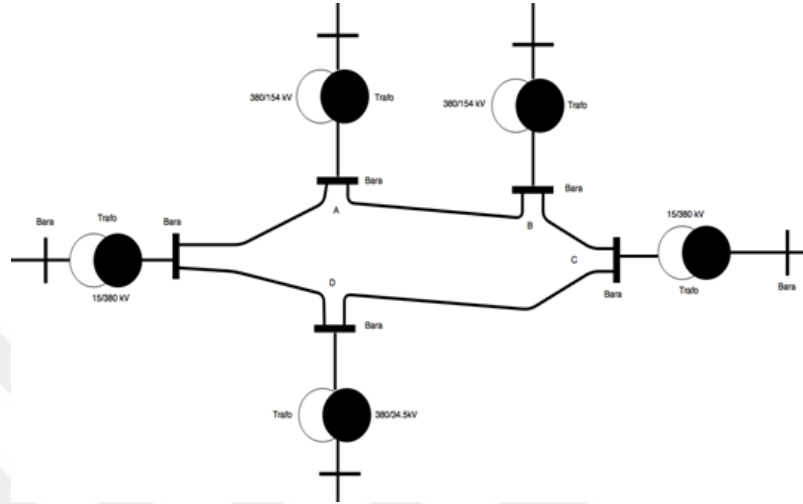
Bu çeşit şebekelerde dağıtım trafosuna yakın kısımlarda kullanılmakta olan ve kalın kesitli hatlara ana hat denir. Trafodan uzaklaştıkça incelen ve son kullanıcıya kadar uzanan hatlara ise branşman hatları denir. Şekil 3.1’de A, B ve C kollarındaki kalın kesitli hatlar ana hatları ve E, F, G ve H gibi ince kesitli hatlar ise branşman hatları oluşturur.

Dalli şebekelerde güvenliğin az olması sebebi ile arıza durumunda çok sayıda kullanıcı enerjisiz kalabilir. Buna rağmen tesis maliyetinin ucuz olması, işletme ve bakım kolaylığı, arıza tespiti kolaylığı gibi avantajları sebebi ile tercih edilirler.

3.2.2. Ring (halka) şebekeler

Yerleşim merkezlerine uygulanan beslemenin birden çok trafo ile yapıldığı ve tüm trafoların birbirine paralel olarak kapalı bir sistem oluşturduğu şebeke çeşidine ring şebeke denir ve temel şebeke yapısı Şekil 3.2’de verilmiştir. Ring şebekelerde ring içerisinde arıza olduğunda; sadece arızalı olan kısım devre dışı bırakılarak çok sayıda abonenin enerjisiz kalması engellenir. Ring içerisindeki elektrik hatlarının kesitleri her

noktada aynı olduğu için tesis maliyeti yüksektir. Ring şebekeler dallı şebekelere göre daha güvenlidir.

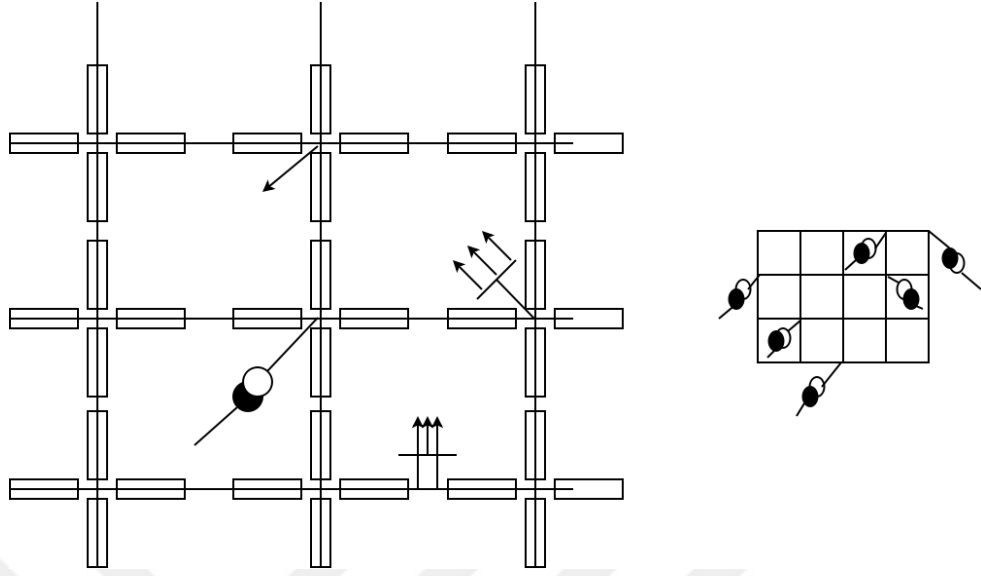


Şekil 3.2. Ring şebeke çalışması (Ceylan 2012)

3.2.3. Ağ (gözlü) şebekeler

Yerleşim yerlerinde kullanılan, beslemenin birden fazla trafo ile yapıldığı ve alıcıları besleyen hatların ağ şeklinde örülerek gözlerin oluşturulduğu şebeke çeşidine ağ şebekeler denir ve temel şebeke yapısı Şekil 3.3'te verilmiştir.

Ağ şebekelerde enerji beslemesi ring şebekelerdeki gibi sürekli yapılabilir. Arıza durumunda arızalı kısım sigortalar veya özel koruma elemanları ile devre dışı bırakılırken diğer kısımlarda enerji kesintisi olmaz. Beslemenin tek yerden yapıldığı ağ şebekeler de yine kesintisiz enerji sağlayabilir, ancak trafo arıza yaptığında tüm şebekenin enerjisi kesilir.



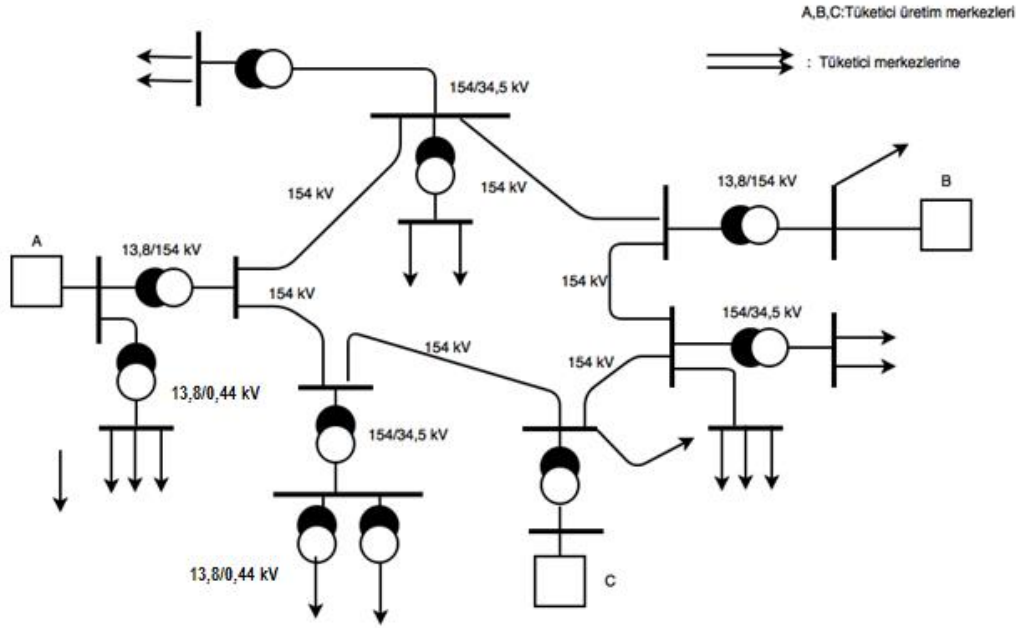
Şekil 3.3. Bir ve birden fazla yerden beslenen ağ şebekeler (Ceylan 2012)

Ağ şebekelerin kesintisiz enerji, çok az gerilim düşümü, güçlü alıcıların sisteme bağlanabilmesi gibi avantajları varken kurulumları, işletimleri ve bakımları zordur. Kısa devre akımı etkisi fazladır.

3.2.4. Enterkonnekte şebekeler

Çeşitli iletim hatlarının birbirine bağlanması ile oluşan yüksek gerilimli şebekelere enterkonnekte şebekeler denir. Bu şebeke özellikle kayda değer miktardaki enerji alışverişi için şebekeler arası, bölgeler arası veya uluslararası bağlantıyı sağlayan elektriksel sistemlerdir. Basit bir enterkonnekte sistem yapısı Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Enterkonnekte şebeke kesintisiz elektrik enerjisi sağlayabilirken yüksek verimli ve ekonomiktir. Ancak bu şebekelerde kısa devre akımının yüksek olması ve sistemin kararlı kalamaması gibi sorunlar mevcuttur. Enterkonnekte şebekede arıza olduğunda, sadece arıza olan yerin enerjisi kesilir. Diğer kısımlarda enerji sürekliliği devam eder.



Şekil 3.4. Enterkonnekte şebeke çalışması (Ceylan 2012)

Üretim ve iletim tesisleri ile kontrol sistemlerinden meydana gelen büyük enterkonnekte elektrik sistemine doğrudan bağlanmayan elektrik güç kaynakları dağıtık üretim kaynaklarını (DÜK) oluşturmaktadır. Dağıtık üretim kaynakları, hem jeneratörleri hem de enerji depolama teknolojilerini bünyesinde barındırmaktadırlar. Dağıtım sistemi, iletim üzerindeki dönüşüm noktasından ya da güç sisteminden elektrik enerjisini tüketiciye dağıtmakta ve böylece elektrik sisteminin bir parçasını oluşturmaktadır.

Bir veya birden fazla dağıtık enerji üretim sistemi ile beslenen yük grubunu ve orta gerilim veya alçak gerilim dağıtım sisteminin bir kısmını içerisinde bulundurabilen şebekelere mikro şebekeler denir.

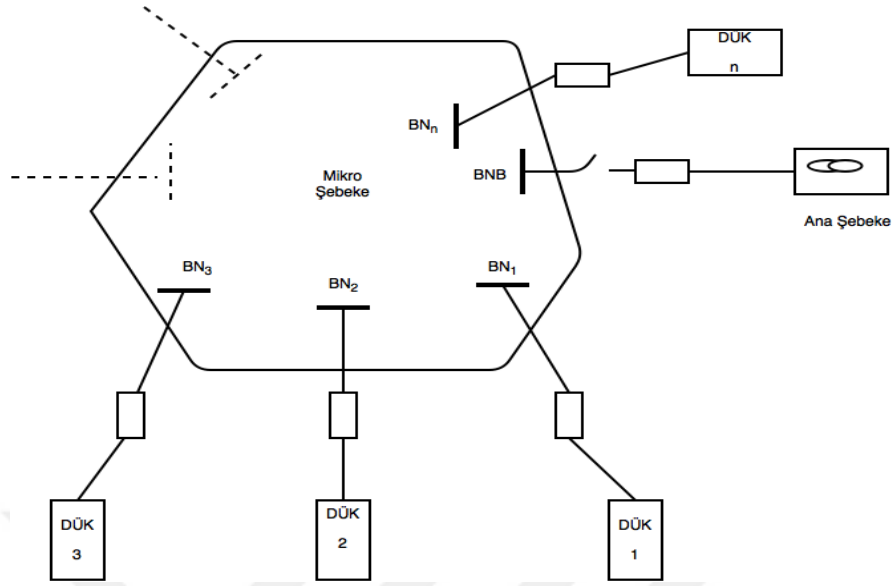
Mikro şebekelerin genel yapısında genellikle gücü 100 kW'den küçük olan mikro türbinler, güneş pilleri, yakıt hücreleri ve rüzgâr türbinleri gibi enerji üretim kaynakları ve bu kaynaklarda üretilen enerjiyi kullanmak amacıyla oluşturulan depolama, doğrultma devreleri, eviriciler ve denetleyiciler gibi birimler bulunmaktadır.

Mikro şebekeler, bir dağıtım sistemi tarafından kullanıma sunulan dağıtık üretim kaynağı birimleri ve yükleri kümesi olarak da tanımlanabilmektedir. Mikro şebekelerin çalışma diyagramı Şekil 3.5'deki gibi gösterilmektedir.

Mikro şebekeler bağlantı modunda, otonom modda ve bu ikisi arasında geçiş modunda çalışabilmektedirler. Güç yönetim sistemi, gerilim / açı kararlılığı, güç kalitesi ve tüketicilere hizmetin kullanılabilirliği açısından sistemin işletimsel davranışı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir.

Lehn ve arkadaşlarının çalışmasına göre şebeke bağlantılı modda, dağıtık üretim birimlerinin güç gereksiniminin arttığı saatlerde gücü en aza indirmek amacıyla yerel güneş paneli sistemleri devreye alınarak önceden belirlenmiş gücün sağlanması beklenmektedir. Şebeke bağlantılı modda, klasik tedarik sistemine benzer şekilde, her dağıtık üretim birimi, önceden belirlenmiş gerçek ve reaktif güç bileşenlerini (P-Q bara) üretmek için ya da kendi terminal gerilimini (P-V bara) düzenlemek için kontrol edilebilmektedir. Tedarik şebekesinin, farklı gerçek-reaktif güç gereksinimlerini karşılamada ve frekans sürekliliğini sağlamada destek olması beklenmektedir (Lehn *et al.* 2005).

Katiraei ve Iravani, jeneratörlerden ve yüklerden oluşan mikro şebeke mimarisinin yeterince güvenli ve işlevsel bir elektrik sistemi olarak ekonomik olmasının, mikro şebeke oluşumunu destekleyen fikir olduğunu belirtmişlerdir (Katiraei and Iravani 2006).



Şekil 3.5. Çoklu dağıtık enerji üretim kaynaklı mikro şebeke çalışması (Iravani and Mehrizi-Sani 2010)

Güç yönetim stratejisi, özellikle otonom modda çalışan ikiden fazla dağıtık üretim birimine sahip mikro şebekelerin çalışması için gereklidir. Büyük enterkonnekte şebeke güç yönetim stratejisinin hızlı cevabı ile karşılaştırıldığında mikro şebekelerde;

- Önemli derecede farklı güç kapasiteleri ve üretim karakteristikleri ile çoklu küçük dağıtık üretim kaynağı birimleri,
- Otonom mod çalışma durumunda enerji üretiminin baskın kaynak olmadığı,
- Şebekenin tesis edildiği yerde uygun şartlar mevcut değilse gerilim/açı kararlılığını etkileyebilen elektronik olarak birbirine bağlanmış dağıtık üretim birimlerinin oldukça hızlı çalıştığı

görülmektedir. (Katiraei and Iravani 2006).

Talep tarafı yönetimi, mikro şebekelerle yerel enerji kullanarak depolama ve üretim sistemlerini karşılayabilmektedir. Mikro şebekeler tüm bunları karşılarken güç elektroniği de önemli bir rol oynamaktadır.

Mikro şebekelere olan eğilim gittikçe artmaktadır ve bu nedenle enerji üretim ve tüketim sistemleri birbirinden bağımsız olarak düşünülememektedir. Günümüzde elektrik ve enerji mühendislerinin, küçük dağıtık enerji jeneratörlerini ve dağıtılan enerji depolama cihazlarını şebekelerde birlikte entegre etme zorunlulukları olduğu için yeni bir sistem geliştirmeleri gerekmektedir. SG (Smart Grid) olarak da isimlendirilen bu yeni elektrik şebekesi, tüketicinin evindeki cihazlarda güç tasarrufu sağlayarak, faturayı azaltarak ve güvenilir bir şekilde enerjiyi kaynaktan tüketicilere aktarmaktadır. Bu bağlamda beklenen tüm enerji sistemi daha interaktif, akıllı ve dağıtık olacaktır. Dağıtık enerji üretiminin (DG) yapılması, enerji dengelerini karşılamak için kullanılan dağıtık depolama (DS) sistemleri olmadan sistemin çalışmasını olanaksız kılmaktadır.

Minik şebeke olarak da adlandırılan mikro şebekeler DG ve SG sistemlerini entegre etmek için önemli bir kavram haline gelmiştir. Bu kavram; yenilenebilir enerji sisteminin etkin kullanımı için gereklidir. Ancak bu kavramın uygulanabilir olması için son kullanıcının tüketeceği enerjinin bir bölümünü üretebilmesi, depolayabilmesi ve denetleyebilecek durumda olması gerekmektedir. Bu durum, son kullanıcının sadece bir tüketici olmasının yanı sıra şebekenin bir parçası olmasına da izin vermektedir.

Otonom mikro şebekeler havacılık elektronik sistemlerinde, otomotiv, deniz ve kırsal alanlar gibi uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Güç üreteçleri ile mikro şebekeler arasındaki arabirimler çoğunlukla gerilim kaynağı gibi çalışan güç elektroniği dönüştürücülerinden (AC mikro şebekeler durumunda gerilim kaynaklı evirici-VSI) oluşmaktadır. Bu dönüştürücüler arasında bir haberleşme yaklaşımı olmaksızın çeviriciler arasındaki devridaim akımlarından kaçınmak amacı ile DROOP kontrol yöntemi kullanılmaktadır.

DROOP kontrol yöntemi, eviricilerin paralel bağlı olması durumunda, her bir modülün genliğine ve frekansına sanal eylemsizlik momentinin eklenmesi için, ortalama aktif ve reaktif güç çıkışlarının oransal kısımlara ayrılmasından oluşmaktadır. Bu yöntemle kaliteli güç paylaşımı elde edilirken, P-f ve Q-E olarak da adlandırılan bu kontrol çevrimi karşılıklı kontrol kablolarından kaçınmak amacı ile paralel bağlı kesintisiz güç

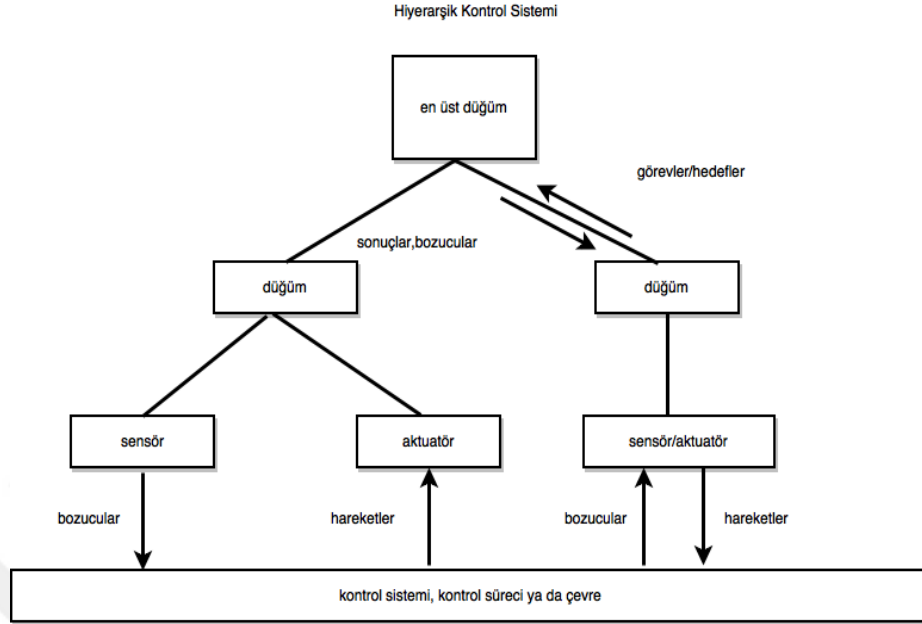
sistemlerine (UPS) uygulanmaktadır. Bu teknik yüksek dayanıklılık ve esneklik sağlarken uygulamada bu tekniğin bazı dezavantajları bulunmaktadır.

Paralel bağlı sistemlerde, doğrusal olmayan yük paylaşımı gerektiğinden klasik DROOP denetimi yönteminin kullanılması uygun değildir. Çünkü kontrol birimi harmonik akımları dikkate almakta ve aynı zamanda aktif ve reaktif gücü dengelemektedir. Bu yüzden doğrusal olmayan yük paylaşımı olduğunda devridaim bozulma gücünden kaçınmak amacı ile harmonik akım paylaşımı tekniği önerilmektedir. Harmonik akım paylaşım tekniklerinin hepsi, harmonik akım paylaşımı doğruluğunu artırmak için, bir değiş tokuşa (trade off) sebep olan bozulma gerilimine dayanmaktadırlar. Son zamanlarda harmonik akım içeriğini düzgün bir şekilde paylaşmak amacı ile çıkış sanal reaktörleri veya dirençleri eklenerek çıkış empedans kısmını düzenleyen kontrol çevrimleri DROOP kontrol yöntemine dahil edilmiştir. Ayrıca DROOP tabanlı güç paylaşımı yönteminde, hat empedansları ile birimlerin çıkış empedanslarından etkilenmektedir. Dolayısı ile bu sanal çıkış empedans çevrimleri, bu problemi çözebilmektedir. Bu bağlamda sanal çıkış empedansı başka bir kontrol değişkeni olarak görülmektedir.

Yüke bağlı olarak genlik ve frekans değerlerindeki sapmalar, DROOP yönteminin diğer dezavantajlarını oluşturmaktadır. Bu problemleri çözmek amacı ile mikro şebekeleri kontrol eden merkezden uygulanan ikinci bir kontrol birimi ile mikro şebekelerdeki frekans ve genlik sapmaları düzeltilmektedir.

3.3. Mikro Şebekelerde Hiyerarşik Kontrol Sistemi

Hiyerarşik kontrol sistemi, cihazların kurulduğu ve yazılım yönetimlerinin bir hiyerarşik ağaç yapısında düzenlendiği kontrol sistemlerinden biridir. Ağaç yapısındaki bağlantıların bilgisayar ağı tarafından çalıştırılması, aynı zamanda hiyerarşik kontrol sisteminde şebekeleşmiş bir kontrol sisteminin oluşmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.6. Hiyerarşik kontrol çalışması (Anonymous 2017)

Hiyerarşik bir kontrol sistemi, sistemin en üst düğümünden çalışmaya başlayarak, sistemin alt düğümlerine kadar sistem çalışmasını kumanda etmektedir. Bu kontrol sistemi, sistemin en üst düğümüne bozucu etkiler gönderen ve sistemin alt düğümlerinden bozucu etkiler alan her bir düğümün bağımsız bir şekilde çalıştığı bir ağaç yapısından oluşmaktadır. Sensörler ve aktuatörler ise, yaprak düğümleri temsil etmektedir.

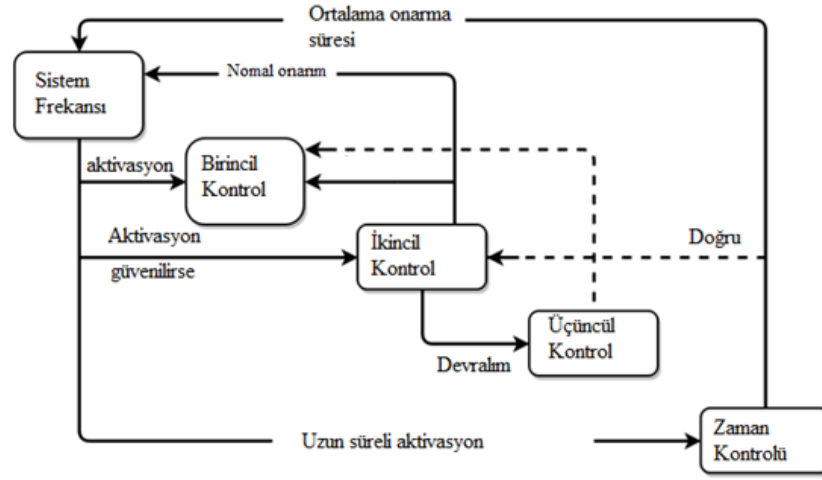
Hiyerarşik kontrol sistemi, genellikle karmaşık çalışma özelliğine sahip sistemlerde kullanılmaktadır. Bu karmaşık kontrol, üstler ve altlardan oluşan hiyerarşik bir çizelgenin önemli özelliklerini içermekte ve hiyerarşik haberleşme alt yapısını oluşturmaktadır.

Hiyerarşinin her bir ögesi ağaçtaki bir düğümü temsil etmektedir. Komutlar, görevler ve hedefler, ağacın en üst düğümlerinden alt düğümlerine doğru ilerlerken bozucu etkiler ve komut sonuçları ağacın alt düğümlerinden üst düğümlerine doğru akmaktadırlar.

Hiyerarşik kontrol sistemi katmanlarının ayırt edici özellikleri aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- Ağacın her bir üst katmanı hemen altındaki katmana göre daha uzun süren planlama ve çalışma zamanı aralığı ile çalışmaktadır.
- Alt katmanlar yerel görevlere, hedeflere ve bozucu etkilere sahiptir. Ayrıca alt katman, üst katmanlar tarafından planlanmakta ve koordine edilmektedir. Bu katmanlar en düşük reaktif katmanların alt sembolü olan bir hibrit akıllı sistemi oluşturmaktadır. Üst katmanlar, esnek zaman sınırlamalarına sahip olduğu için, soyut dünya modelinden çıkarım yapabilmekte ve planlamayı yürütebilmektedir. Hiyerarşik görev ağı, hiyerarşik kontrol sistemlerinde planlama yapmak için uygun görülmektedir.

Lasseter yaptığı çalışmada, mikro şebekelerin bilimsel araştırma açısından dönüm noktasında olduğunu belirtmiştir (Lasseter 2002). Ancak mikro şebekelerin kontrol ve yönetim sistemlerinin geliştirilmesi konusunda ileri araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Guerrero ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, mikro şebekelerin otonom ve şebeke bağlantılı çalışma modlarının geçmişte ayrı yaklaşımlar olarak düşünüldüğünü belirtmişlerdir (Guerrero *et al.* 2009). Ancak son zamanlarda hem otonom modda hem de şebeke bağlantılı modda çalışabilen esnek mikro şebekeler tasarlanmaktadır. Güç elektroniği ve telekomünikasyonun farklı teknolojilerle birleştirilmesi ve birimler arasında üretim ve enerji depolama sistemlerinin kullanılması gerekliliği mikro şebekelere yönelik topoloji, mimari, planlama ve yapılandırma ile ilgili çalışmaların geliştirilmesine öncülük etmiştir. Ayrıca, şebeke bağlantılı ve otonom mod arasında düzgün geçişin sağlanabilmesi için, otonom mod saptama algoritması gerekmektedir. Bundan başka hata izleme, kestirimci bakım veya koruma gibi güvenlik konuları mikro şebekelerin uygulanabilirliği açısından oldukça önemlidir.



Şekil 3.7. Güç sistemi için UCTE tarafından tanımlanan çok seviyeli kontrol çalışması (Guerrero *et al.* 2013)

Bu bölümde, mikro şebekeler için 3 kontrol seviyesinden oluşan hiyerarşik kontrol incelenecektir. UCTE; İsviçre, Fransa ve Almanya'daki elektrik iletim şirketlerinin 1951 yılında kurduğu bir birliktir. Bu birliğe diğer Avrupa ülkelerinde faaliyet gösteren elektrik iletim şirketleri de katılmıştır. UCTE, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi hiyerarşik kontrolü büyük güç sistemleri için tanımlamaktadır. Bu tarz büyük güç sistemlerinde, yüksek eylemsizlik momentine sahip ve empedansı indüktif olan büyük senkron jeneratörleri çalıştırmak için, hiyerarşik kontrol yaklaşımı önerilmektedir. Ancak güç elektroniği tabanlı mikro şebekelerde eylemsizlik momenti bulunmamaktadır ve empedans omiktir. Bu iki sistem arasında önemli farklar olması sebebiyle, mikro şebekeler için hiyerarşik kontrolün sistem tasarımı yapılırken bu farklar dikkate alınmalıdır. Hiyerarşik kontrol birincil, ikincil ve üçüncül kontrol seviyelerinden oluşmaktadır. Birincil kontrolde, çıkışa sanal eylemsizlik momenti eklendiği ve dağıtık üretim (DG) birimlerinin çıkış empedansı kontrol edildiği için birincil kontrol DG birimlerinin iç kontrolü ile ilgilidir. İkincil kontrol, sanal eylemsizlik momenti ve çıkış sanal empedanslarının sebep olduğu frekans ve genlik sapmalarını onarmak için tasarlanmaktadır. Üçüncül kontrol, ortak bağlantı noktasında (PCC) şebeke ve mikro şebeke arasında enerji akışını düzenlemektedir.

3.3.1. İç kontrol çevrimi

Guerrero ve arkadaşları çalışmalarında, elektrik üretim kaynakları ve mikro şebekeler arasında akıllı güç ara birimlerinin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu ara birimlerin son kısmı, DC/AC eviricilerden oluşmaktadır. Bu eviriciler gerilim kaynaklı evirici (VSI) ve akım kaynaklı evirici (CSI) olarak sınıflandırılmaktadırlar. VSI birimleri iç akım çevriminden, dış gerilim çevriminden ve şebeke ile senkronize çalışmak için faz kilitleme çevriminden (PLL) oluşmaktadır. CSI birimleri, akımı şebekeye dahil etmek amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. VSI birimleri ise, otonom çalışma durumunda gerilimi sabit tutmak amacıyla kullanılmaktadır (Guerrero *et al.* 2013).

VSI birimleri senkronizasyonu sağlamak için herhangi bir harici referansa gereksinim duymamaktadır. Ayrıca VSI birimleri güç kalitesini iyileştirebildikleri ve dağıtık enerji üretim sistemlerinin çalışma performanslarını artırabildikleri için tercih edilmektedirler. VSI birimleri şebeke bağlantılı modda çalışmak için gerektiği zaman şebekenin çalışmasını gerilim kaynağından akım kaynağına değiştirebilmektedirler. Mikro şebekelerin şebeke bağlantılı ve otonom mod çalışmaları arasında geçiş esnekliğine sahip olması gerekmektedir. Guerrero ve arkadaşları yaptıkları çalışmada mikro şebekenin esnek çalışabilmesi için, ana şebekeye alınan ya da ana şebekeden gönderilen gücün kontrol edilmesi ve mikro şebekenin kararlı tutulması gerektiğini belirtmişlerdir (Guerrero *et al.* 2009).

VSI ve CSI birimleri mikro şebekelerde birlikte çalışabilmektedirler. Mikro şebekedeki frekansı ve gerilimi sabitlemek için VSI birimleri genellikle enerji depolama elemanlarına bağlanmaktadır. DG eviricilerinin gerektiğinde, VSI birimleri gibi çalışmaları beklenmektedir. CSI birimleri maksimum güç noktası izleme algoritması için gereken gücü güneş panelinden ya da küçük rüzgar türbinlerinden elde etmektedirler. Böylece mikro şebekenin yapısında paralel bağlı çok sayıda CSI ve VSI birimleri ya da sadece VSI birimleri bulunmaktadır.

3.3.2. Birincil kontrol

Chandorkar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada VSI birimlerinin paralel bağlanması durumunda devridaim aktif ve reaktif güçlerinin ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Birincil kontrol seviyesi referans geriliminin frekans ve genliğini ayarlamaktadır. Birincil kontrol seviyesinin çalışma prensibi, senkron jeneratör çalışmasına benzemektedir. Senkron jeneratör, aktif güç arttığında frekans değerini azaltarak çalışmaktadır. Bu prensip, P/Q DROOP yöntemi kullanılarak VSI birimlerine entegre edilebilmektedir (Chandorkar *et al.* 1993).

$$f = f^* - G_P(s) \cdot (P - P^*) \quad (2)$$

$$E = E^* - G_Q(s) \cdot (Q - Q^*) \quad (3)$$

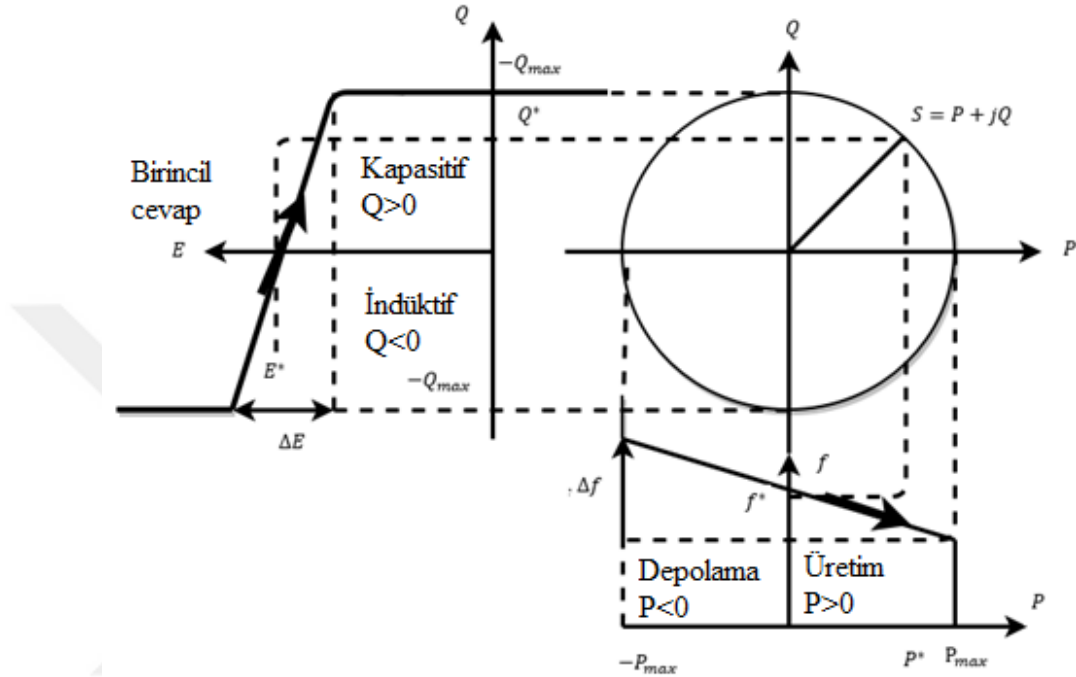
(2) ve (3) numaralı denklemlerde f ve E çıkış geriliminin frekans ve genliğini, f^* ve E^* ifadeleri de onların referanslarını göstermektedir. P ve Q aktif ve reaktif güçlerdir. P^* ve Q^* da aktif ve reaktif güçlerin referanslarını göstermektedir. $G_P(s)$ ve $G_Q(s)$ aktif ve reaktif güçlerin transfer fonksiyonlarıdır. Otonom mikro şebekelerde saf integratör kullanılamamaktadır. Çünkü toplam yük, toplam güç ile örtüşmemektedir. Ancak saf integratörler iyi doğrulukta P^* ve Q^* elde etmek için şebeke bağlantılı modda kullanışlı olabilmektedir.

$$G_P(s) = \frac{\Delta f}{P_{\max}} \quad (4)$$

$$G_Q(s) = \frac{\Delta V}{2Q_{\max}} \quad (5)$$

(4) ve (5) numaralı denklemlerde verilen $G_P(s)$ ve $G_Q(s)$, hattın eğimini veren parametrelerdir. $G_P(s)$ ve $G_Q(s)$, DC kazançta statik $\Delta P/\Delta f$ ve $\Delta Q/\Delta V$ sapmaları sağlamaktadırlar. Bu statik sapmalar, sistemi senkron tutmak ve gerilim kararlılık limiti için gerekmektedir. (4) ve (5) denklemlerinde Δf ve ΔV sırasıyla eviricinin müsaade

ettiği maksimum frekans ve gerilim, P_{max} ve Q_{max} ise evirici tarafından iletilen sırasıyla aktif ve reaktif güçler olarak verilmektedir.



Şekil 3.8. P-Q dairesi ile P-f ve Q-E DROOP için birincil kontrol ilişkisi (Guerrero *et al.* 2013)

Şekil 3.8’de dağıtık enerji üretim kaynağı biriminin P-Q dairesi ile P-f ve Q-E DROOP’ları arasındaki ilişki gösterilmektedir. Dağıtık enerji üretim kaynağı $P > 0$ olduğunda aktif güç üretmekte, $P < 0$ olduğunda ise enerji depolamaktadır. Aynı zamanda kondansatör gibi çalıştığında ($Q > 0$) reaktif güç sağlayabilmekte ya da Q, bobin gibi çalıştığında ($Q < 0$) reaktif gücü kendine katabilmektedir.

$$f = f^* - G_P(s)[(P - P^*)\sin\theta - (Q - Q^*)\cos\theta] \quad (6)$$

$$E = E^* - G_Q(s)[(P - P^*)\cos\theta + (Q - Q^*)\sin\theta] \quad (7)$$

Hat empedanslarına ek olarak senkron jeneratörlerinin çıkış empedansının temelde indüktif olması beklenmektedir. Fakat güç elektroniği kullanıldığında çıkış empedansı iç kontrol çevrimi tarafından kullanılan kontrol yöntemine bağlı olmaktadır. Ayrıca

düşük gerilim uygulamalarındaki hat empedansı neredeyse saf rezistif olarak görülmektedir. Bu nedenle Guerrero ve arkadaşları (2) ve (3) denklemlerindeki DROOP kontrollerini empedans açısı θ tarafından belirlenen dönüşümlere göre denklem (6) ve (7) 'deki gibi uyarlamışlardır (Guerrero *et al.* 2006).

$$v_o^* = v_{\text{ref}} - Z_D(s) \cdot i_o \quad (8)$$

Birincil kontrol seviyesi, çıkış geriliminin denklem (8)'deki gibi ifade edilebildiği sanal çıkış empedans çevrimini içermektedir.

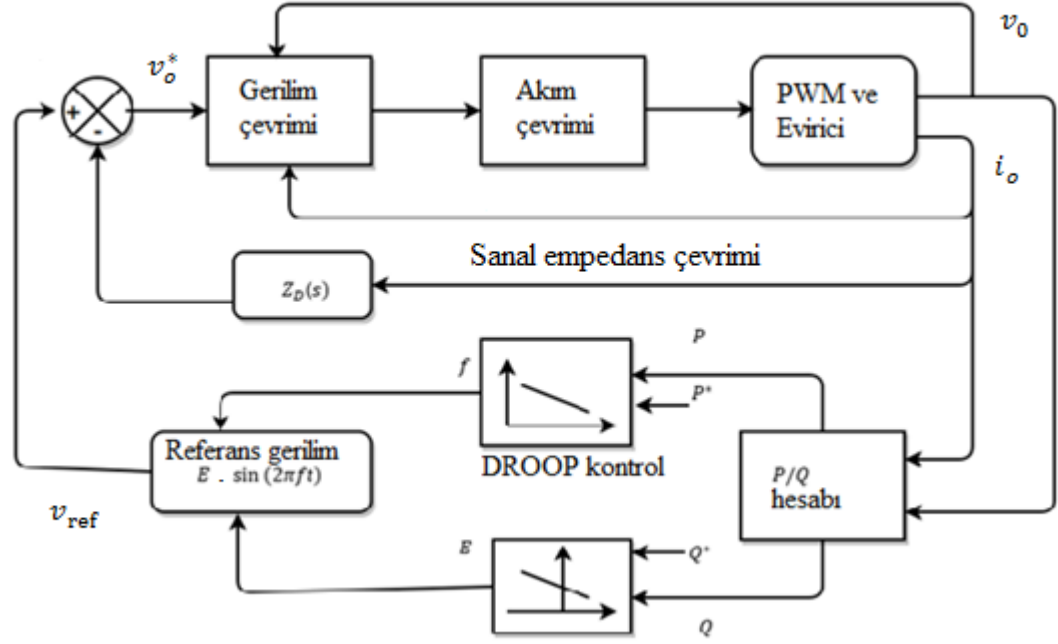
Burada v_{ref} , (6) ve (7) tarafından üretilen gerilim referansıdır ve $v_{\text{ref}} = E \sin(2\pi ft)$ denklemi ile verilmektedir. $Z_D(s)$, hat frekansındaki indüktif davranışı sergileyen sanal çıkış empedans transfer fonksiyonudur. Şekil 3.9'da sanal empedansın diğer kontrol çevrimleri ile ilişkisi gösterilmektedir. Burada bahsedilen diğer kontrol çevrimleri, iç akım çevrimi, dış akım çevrimi ve DROOP kontrolüdür.

Genellikle sanal çıkış empedansı Z_D , eviricinin çıkış empedansı ile hat empedansının toplamından daha büyük olacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu açıdan, toplam çıkış empedansı eşitliğinde Z_D baskın olmaktadır (Guerrero *et al.* 2006).

Sanal çıkış empedansı Z_D , senkron jeneratörün seri empedans değerine eşittir. Ancak, senkron jeneratörün seri empedansı genellikle indüktiftir. Buna rağmen buradaki sanal çıkış empedansı Z_D rastgele seçilebilmektedir. Fiziksel empedansın aksine bu sanal empedansta güç kayıpları olmamaktadır. Böylece verimde kayıp olmaksızın rezistans kullanmak mümkün olmaktadır.

Sanal empedans kontrol çevrimi kullanarak evirici çıkış empedansı yeni bir kontrol değişkeni haline gelmektedir. Böylece (6) ve (7) denklemlerindeki faz açısı θ ayarlanabilmektedir. Bu ayarlama, $\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R}$ denklemi ile, hat empedansının $\frac{X}{R}$ oranına göre ve hat frekansındaki çıkış empedansına göre yapılmaktadır. Guerrero ve

arkadaşlarının yaptıkları çalışmalara göre sanal çıkış empedansı, sistem çalışırken değiştirilebilme ve harmonik akımı paylaşma gibi ek özellikler sağlayabilmektedir. Bu kontrol çevrimi eviricinin paralel çalışmasına izin vermektedir (Guerrero *et al.* 2005; Guerrero *et al.* 2006).



Şekil 3.9. Birincil kontrol: Sanal empedanslı DROOP kontrol ilişkisi ve eviriciye uygulanan iç kontrol çevrimi (Guerrero *et al.* 2013)

3.3.3. İkincil kontrol

Frekans ve genlik sapmalarını kompanze etmek için ikincil kontrol kullanılmaktadır. İkincil kontrol, mikro şebekedeki yük ve üretimdeki her değişimden sonra meydana gelen frekans ve gerilim sapmalarını sıfıra indirgemeyi garanti etmektedir.

$$\delta f = k_{pf}(f_{MG}^* - f_{MG}) + k_{if} \int (f_{MG}^* - f_{MG})dt + \Delta f_s \quad (9)$$

$$\delta E = k_{pE}(E_{MG}^* - E_{MG}) + k_{iE} \int (E_{MG}^* - E_{MG})dt \quad (10)$$

(9) ve (10) numaralı denklemlerde gösterilen f_{MG} ve E_{MG} sırasıyla mikro şebekenin frekans ve genliğini ifade etmektedirler. İkincil kontrolde, f_{MG} frekans ve E_{MG} genlik seviyeleri ölçülüp, f_{MG}^* referans frekans ve E_{MG}^* referans genlik seviyeleri ile kıyaslanmaktadır. Kompansatörler tarafından işlenen hatalar (δf ve δE) çıkış gerilim frekansını ve genliğini iyileştirmek için tüm birimlere iletilmektedir.

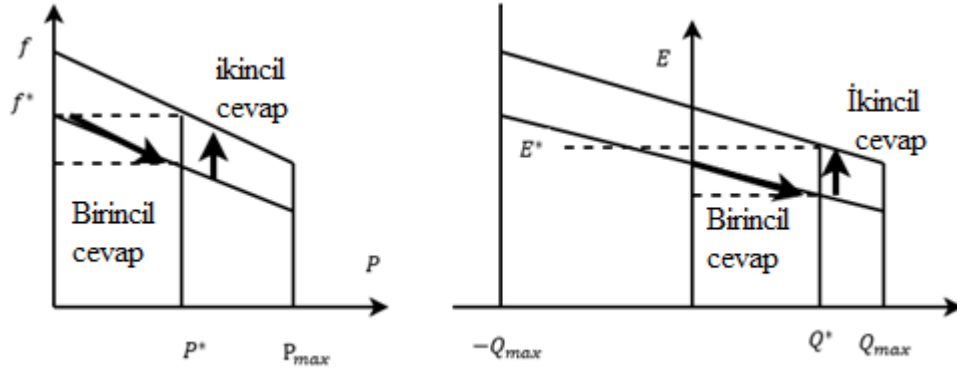
İkincil kontrol, güç sistemlerindeki şebeke frekansında meydana gelen sapmaları, izin verilen sınırdan tutmak için kullanılmaktadır. Örneğin bu sınırlar Nordel'de (Avrupa'nın Kuzeyi) $\pm 0.1 \text{ Hz}$, UCTE'de (Avrupa Kıtası) ise $\pm 0.2 \text{ Hz}$ 'dir. Bu denetleyici bir oransal integral (PI) tipi denetleyiciden oluşmaktadır. Ayrıca Avrupa'da yük frekans kontrolü ve Amerika'da otomatik kazanç denetleyicisi olarak adlandırılmaktadır. AC mikro şebekede, frekans ve genlik ayarlama denetleyicileri G_f ve G_E aşağıdaki denklemlerden elde edildiği görülmektedir.

$$\delta f = k_{pf}(f_{MG}^* - f_{MG}) + k_{if} \int (f_{MG}^* - f_{MG})dt + \Delta f_s \quad (9)$$

$$\delta E = k_{pE}(E_{MG}^* - E_{MG}) + k_{iE} \int (E_{MG}^* - E_{MG})dt \quad (10)$$

Burada k_{pf} , k_{if} , k_{pE} ve k_{iE} ikincil kontrol kompansatörünün kontrol parametreleridir ve Δf_s , şebeke mevcut olmadığında sıfıra eşit olan bir senkronizasyon terimidir. Bu durumda δf ve δE , izin verilen maksimum frekans ve gerilim sapma miktarlarını aşmamaları için sınırlandırılmalıdırlar.

Şekil 3.10'da $P - f$ ve $Q - E$ karakteristikleri kapsamında birincil ve ikincil kontrol çalışmaları gösterilmektedir. Frekans ve genlik düzenleme işlemi P ve Q talebi çoğaldığında DROOP kontrollü mikro şebekede ikincil kontrol tarafından yapılmaktadır.



Şekil 3.10. P-f ve Q-E birincil ve ikincil kontrol çalışması (Guerrero *et al.* 2013)

3.3.4. Üçüncül kontrol

Guerrero ve arkadaşları çalışmalarında, şebeke bağlantılı modda çalışma durumunda, mikro şebeke geriliminin frekansını ve genliğini ayarlayarak, güç akışının kontrol edilebileceğini göstermişlerdir. Bu çalışmada frekans ayarı, kararlı durumdaki fazın değiştirilmesi ile yapılmaktadır. (Guerrero *et al.* 2009).

$$f_{MG}^* = k_{pP}(P_G^* - P_G) + k_{iP} \int (P_G^* - P_G) dt \quad (11)$$

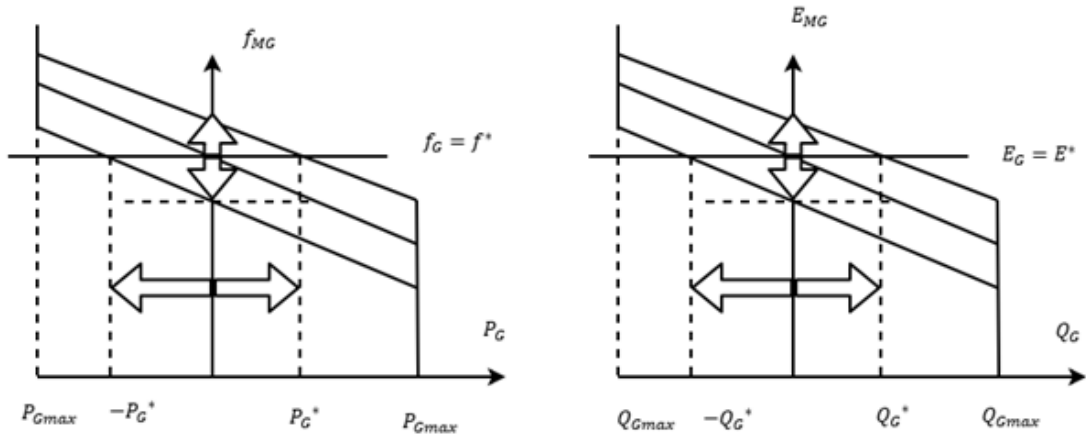
$$E_{MG}^* = k_{pQ}(Q_G^* - Q_G) + k_{iQ} \int (Q_G^* - Q_G) dt \quad (12)$$

Ortak bağlantı noktasında (PCC) P/Q oranı ölçülerek, P_G^* ve Q_G^* ile P_G ve Q_G kıyaslanabilmektedir. P_G ve Q_G (11) ve (12) denklemleri ile kontrol edilebilmektedir

(11) ve (12) numaralı denklemlerde gösterilen k_{pP}, k_{iP}, k_{pQ} ve k_{iQ} ifadeleri üçüncül kontrolün kontrol parametreleridir. Ayrıca bu denklemlerde f_{MG}^* ve E_{MG}^* , izin verilen limitin dışına çıkması durumuna karşı sınırlandırılmıştır. Bu değişkenler ($f_{MG}^* = f_G$ ve $E_{MG}^* = E_G$), otonom mod çalışmada ikincil denetleyici içerisinde üretilmektedirler. Şebeke aktif olduğu zaman, senkronizasyon işlemi başlayabilmekte ve f_{MG}^* ve E_{MG}^* şebekede ölçülen değerlere eşit olabilmektedir. Bu nedenle, mikro şebekenin referans

frekans ve genliği, ana şebekenin frekans ve genliği olacaktır. Senkronizasyon sonrasında, bu sinyaller (11) ve (12) numaralı denklemler ile verilmektedir.

P_G^* ve Q_G^* 'nin işaretine bağlı olarak, aktif ve reaktif güç bağımsız olarak çekilebilmekte ya da geri verilebilmektedir. Şekil 3.11'de üçüncül kontrolün temel çalışma prensibi gösterilmektedir. Şebeke $f_G = f^*$ ve $E_G = E^*$ durumunda sabit frekans ve genlik değerine sahip olmakta ve yatay hatlar şeklinde temsil edilmektedir. Bu nedenle, mikro şebeke ve ana şebeke (P_G ve Q_G) arasındaki güç değişimlerinin miktarı mikro şebekenin DROOP karakteristiklerinin ve şebekenin yatay hatlarının kesişimi ile belirlenmektedir. Ayrıca P_G mikro şebekenin referans frekansı f_{MG}^* ayarlanarak şu şekilde bulunabilmektedir. Eğer $f_{MG}^* > f_G$ ise, $P_G > 0$ olur ve P mikro şebekeye dahil edilir; diğer taraftan, eğer $f_{MG}^* < f_G$ ise, $P_G < 0$ olur. Böylece mikro şebeke, şebekeden aktif güç (P) çeker. Mikro şebekenin frekansı şebeke tarafından belirlenmekte ve bu olay güç açısından değişimi beraberinde getirmektedir. Benzer analiz reaktif güç Q_G için de aynı şekilde yapılabilir.



Şekil 3.11. P-f ve Q-E üçüncül kontrolün temel çalışma prensibi (Guerrero *et al.* 2013)

(11) ve (12) numaralı denklemlerde, k_{iP} ve k_{iQ} sıfıra eşitlendiğinde, üçüncül denetleyici mikro şebekenin birincil denetleyicisi gibi çalışmaktadır ve çoklu mikro şebekenin birbirleriyle etkileşimi ile kümelenme sağlanmaktadır. Bu kontrol döngüsü PCC'de güç kalitesinin geliştirilmesinde de kullanılabilir. Gerilim değerini doğru şekilde elde etmek için, mikro şebeke şebekeye reaktif güç enjekte etmelidir.

Böylece iç gerilimde kararlılık elde edilmektedir. Özellikle, eğer $k_{iQ} = 0$ alınacak olursa, gerilimde bir düşüş olduğunda mikro şebeke otomatik olarak reaktif güç Q enjekte etmekte ya da şebekede bir artma olduğunda reaktif güç çekmektedir.

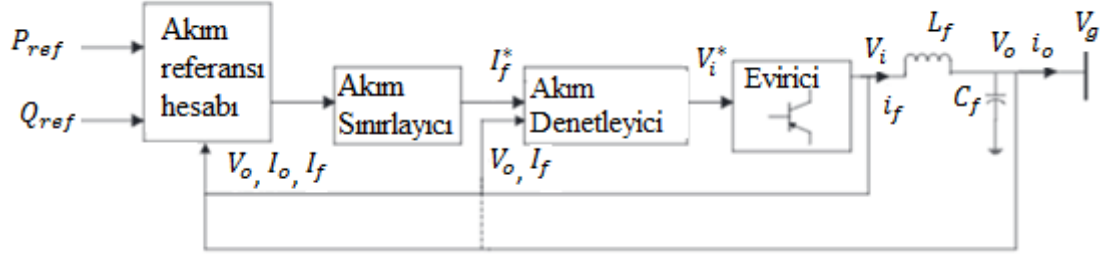
Otonom mod belirleme, mikro şebekeyi şebekeden ayırmak için gereklidir. Gerilim kararsızlığından kaçınmak için, hem üçüncül kontrol referansları hem de reaktif-güç PI denetleyicinin integral terimleri birbirinden ayrılmalıdır. Beklenmedik bir otonom çalışma meydana geldiğinde, üçüncül kontrol şebekeden P aktif güç çekmeye çalışır, şebeke mevcut olmadığı için, frekans azalmaya başlar. Frekans beklenen değeri geçtiğinde, mikro şebeke güvenlik için şebekeden ayrılır ve üçüncül kontrol devre dışı edilir.

3.4. Mikro Şebekelerde Kullanılan Diğer Kontrol Yöntemleri

3.4.1. PQ kontrol

Huang ve arkadaşları çalışmalarında PQ kontrolünün, dağıtık üretim kaynağının çıkış aktif ve reaktif güçlerini daima kendi referans güçlerine eşitlemeyi garanti ettiğini göstermişlerdir (Huang *et al.* 2011).

Dağ ve arkadaşları, çalışmalarında dağıtık üretimde kullanılan eviricilere uygulanan kontrol tekniklerini incelemişlerdir. Bu teknikler, gerilim referans kontrolü, belirli güçlü akım kontrolü ve belirsiz güçlü akım kontrolüdür. Bu tekniklerden belirli güçlü kaynak eviricileri şebeke modunda PQ tabanlı akım kontrol algoritmasıyla kontrol edilmektedirler. Ağ destek modunda çalışan bir evirici PQ aktif ve reaktif güç referanslarıyla denetlenmektedir. Şekil 3.12’de PQ tabanlı akım kontrol yönteminin blok şeması gösterilmektedir. Aktif ve reaktif güç referansları şebeke yöneticisi tarafından merkezi bir algoritma sonucuna göre ilgili eviricilere iletilmektedir (Dağ vd 2014).



Şekil 3.12. PQ akım kontrolü (Dağ vd 2014)

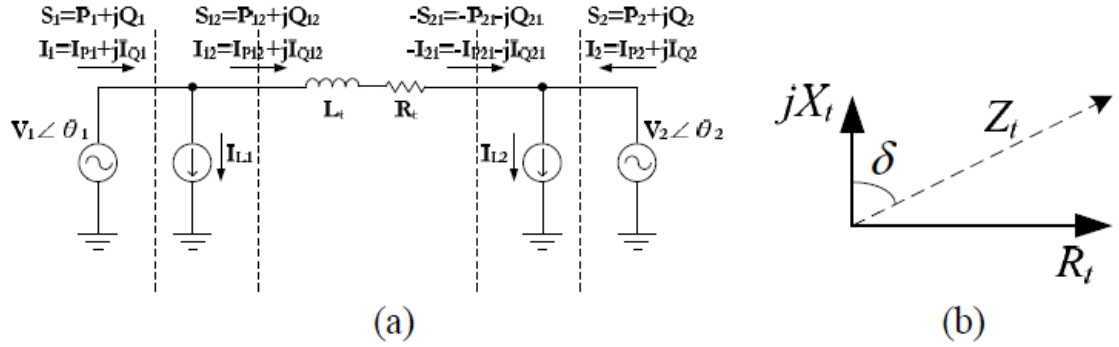
3.4.2. DROOP kontrol

Huang ve arkadaşları DROOP kontrolünün, klasik güç sisteminin birincil frekans düzenleme prensibine benzer bir şekilde çalıştığını göstermişlerdir. DROOP kontrol yönteminde, diğer dağıtık üretim kaynağı birimleri ile haberleşme bulunmamaktadır. Burada dağıtık üretim kaynağının çıkış reaktif gücü ile gerilimin genliği birbirleriyle doğrusal ilişkili iken çıkış aktif gücü ile frekansı da birbirleriyle doğrusal ilişkili olmaktadır. Ancak bu durum, regülasyonda sapmalara yol açmaktadır. Bu sapmalar, mikro şebeke frekansını elde etmeyi önlemektedirler (Huang *et al.* 2011).

Şekil 3.13(a) basitleştirilmiş güç hattı devresini göstermektedir ve bu devrenin empedans karakteristiği Şekil 3.13(b)'de verilmektedir. Hat boyunca güç akışı aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$P_{12} = \frac{X_t}{Z_t} \frac{V_1 V_2}{Z_t} \sin \theta_{12} + \frac{R_t}{Z_t} \frac{V_1 (V_1 - V_2 \cos \theta_{12})}{Z_t} \quad (13)$$

$$Q_{12} = -\frac{R_t}{Z_t} \frac{V_1 V_2}{Z_t} \sin \theta_{12} + \frac{X_t}{Z_t} \frac{V_1 (V_1 - V_2 \cos \theta_{12})}{Z_t} \quad (14)$$



Şekil 3.13. (a) Eş değer devre - (b) İletim hattı karakteristiği (Lee *et al.* 2009)

Güç hattı genellikle kayıpsız ve indüktif olarak modellenir ve bu $R_t = 0$ ($\delta = 0^\circ$) 'da (13) ve (14) denkleminin özel durumu olarak düşünülebilmektedir. Bu özel durum güç akışı sonucu (15) ve (16) denklemlerinde verilmektedir. Buradaki denklemler klasik P-f DROOP ve Q-V DROOP kontrolü temellini oluşturmaktadır.

$$P_{12,\delta=0^\circ} = \frac{X_t}{Z_t} \frac{V_1 V_2}{Z_t} \sin \theta_{12} \quad (15)$$

$$Q_{12,\delta=0^\circ} = \frac{X_t}{Z_t} \frac{V_1 (V_1 - V_2 \cos \theta_{12})}{Z_t} \quad (16)$$

Klasik P-f DROOP ve Q-V DROOP kontrolleri dağıtık kontrol çeviricileri için uygundur (Chandorkar *et al.* 1993; Piagi and Lasseter, 2006). R-L hattında güç akışını kontrol etmek için (13) ve (14) numaralı denklemler (17) numaralı denkleme dönüştürülmektedir (Brabandere *et al.* 2007).

$$\begin{bmatrix} P'_{12} \\ Q'_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_1 V_2}{Z_t} \sin \theta_{12} \\ \frac{V_1 (V_1 - V_2 \cos \theta_{12})}{Z_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_t}{Z_t} & -\frac{R_t}{Z_t} \\ \frac{R_t}{Z_t} & \frac{X_t}{Z_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{12} \\ Q_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{12} \\ Q_{12} \end{bmatrix} \quad (17)$$

(17) denkleminde uyarlanmış olan gerçek güç P'_{12} ve reaktif güç Q'_{12} , δ açısında döndürülerek türetilir. Burada δ açısı Şekil 3.13(b)'deki gibi hattın empedans üçgenine bağlıdır.

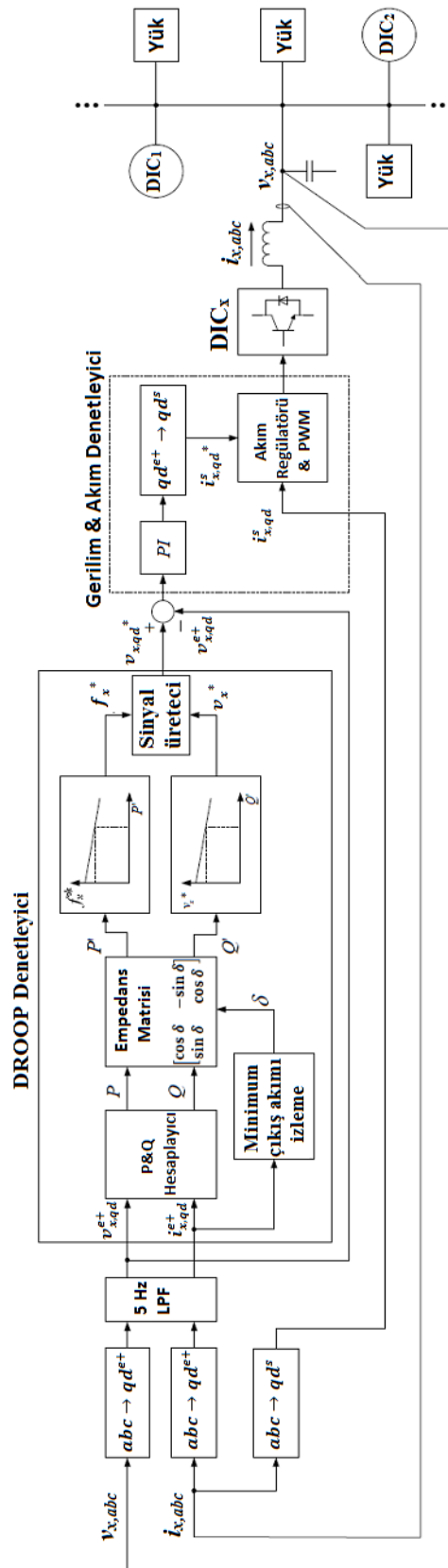
Uyarlanmış olan gerçek güç P'_{12} ve reaktif güç Q'_{12} , klasik P-f DROOP ve Q-V DROOP denetleyicilerin değişkenleri olarak kullanılmaktadır. (18) ve (19) numaralı denklemlerde, her dağıtık kaynak arabirim çeviricinin (DIC) çalışma frekansı f_x^* ve gerilim genliği V_x^* hesaplanmaktadır.

$$f_x^* = f_0 - m_x(P_{0x} - P'_x) \quad (18)$$

$$V_x^* = V_0 - n_x(Q_{0x} - Q'_x) \quad (19)$$

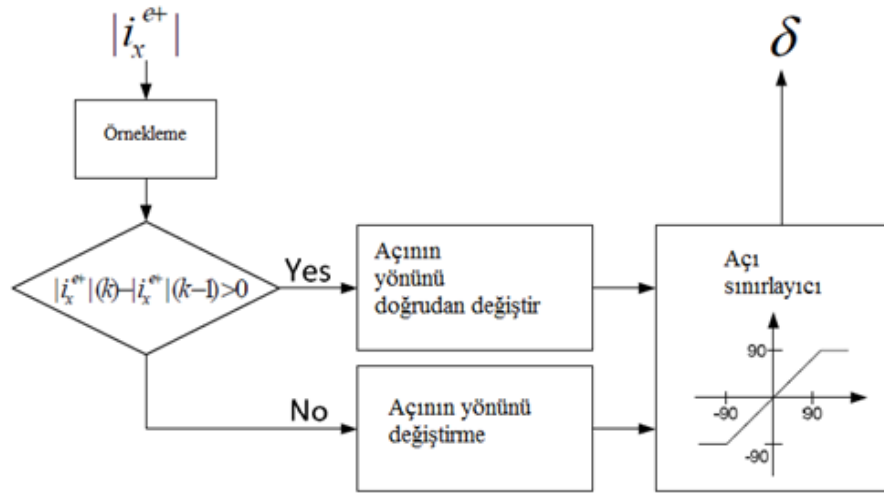
Burada m_x frekans DROOP katsayısı, n_x gerilim DROOP katsayısı, f_0 anma frekansı, V_0 anma faz gerilimi genliği, P_{0x} anma gerçek güç kapasitesi ve Q_{0x} de anma reaktif güç kapasitesidir.

Şekil 3.14'deki blok diyagram uyarlanmış P' -f DROOP ve Q' -V DROOP denetleyicilerinin çalışmasını göstermektedir. Geri besleme gerilim ve akımı, gerçek güç ve reaktif güç çıkışları hesaplanarak ölçülmektedir. Daha sonra (17) numaralı denkleme dayanan dönüşüm, güç hattının R-L yapısı hesaba katılarak, aktif ve reaktif güçlere uygulanmaktadır. P' ve Q' sonucu, denklem (18) ve (19)'den hesaplanmakta, P' -f DROOP ve Q' -V DROOP denetleyicilere uygulanmaktadır. Buradaki amaç, çalışma frekansı f_x^* ve gerilim büyüklüğü V_x^* değerlerini üretmektir. Sonra çalışma frekansı f_x^* ve gerilim büyüklüğü V_x^* tarafından, çeviricinin gerilim referansı $v_{x,qd}^*$, senkron referans çerçeve çalışmasında sentezlenmektedir. Senkron çerçeve gerilimi ve sabit çerçeve akımı denetleyicileri çeviricinin PWM komutlarını üretmek için kullanılmaktadır.

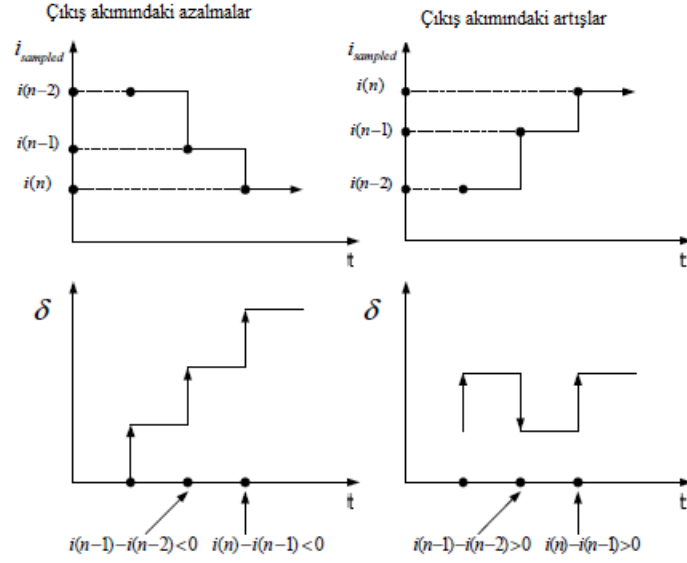


Şekil 3.14. DROOP denetleyici blok diyagramı (Lee *et al.* 2009)

Minimum çıkış akımı izleme yöntemi, gerçek güç paylaşım hatasını azaltmak için önerilmektedir. Bu yöntem dönüşüm (rotasyon) matrisinin δ açısını ayarlar. Böylece çıkış gücü sürekliliğini korurken çıkış gerilimi komutu $v_{x,qd}$, çeviricinin çıkış akımını azaltmak amacı ile değiştirilmektedir. Şekil 3.15 minimum çıkış akımı izleme kontrol yönteminin akış diyagramını göstermektedir. Çeviricinin çıkış akımı senkron referans çerçeve yöntemi ile dönüştürülmekte ve sonra akımın genlik değerini hesaplamak için alçak geçiren filtre tarafından filtrelenmektedir. Örneklenmiş akım büyüklüğü önceki örnek ile karşılaştırılmalı ve bu karşılaştırma ile δ açısının nasıl ayarlanması gerektiğini tanımlamalıdır. Eğer çıkış akımının değeri düşerse δ açısı değişmez. Şekil 3.16 bu örnek tekrarlama işlemini göstermektedir.



Şekil 3.15. Minimum çıkışlı akım izleme diyagramı (Lee *et al.* 2009)



Şekil 3.16. Açılı değişimleri (Lee et al. 2009)

$$I_{Px} = \frac{P_x}{V_x} ; \quad I_{Qx} = -\frac{Q_x}{V_x} \quad ; x = 1, \dots, n \quad (20)$$

$$I'_{Px} = \frac{P'_x}{V_x} ; \quad I'_{Qx} = -\frac{Q'_x}{V_x} \quad ; x = 1, \dots, n \quad (21)$$

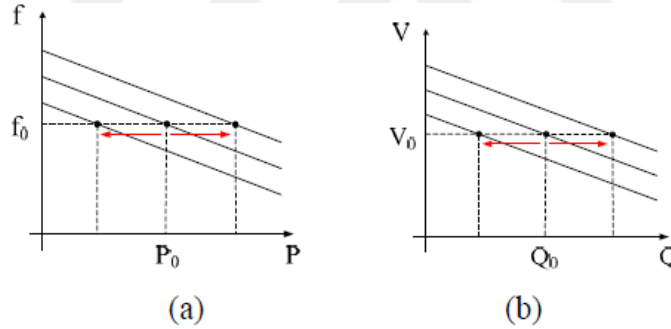
Her bir dağıtık üretim kaynağı arabirim çeviricisi (DIC), DROOP denetleyici tarafından üretilen frekans ve gerilim büyüklüğünü kontrol ettiği için, çıkış gerilimi her DIC biriminin yerel referansı olarak düşünülmektedir. Gerçek ve reaktif güçler DIC biriminin çıkış gerilimine bölündüğünde gerçek ve reaktif akımlar elde edilmektedir. (20) ve (21) numaralı denklemler ile verilen I_{Px} ve I_{Qx} sırasıyla gerçek ve reaktif akımlardır ve I'_{Px} ve I'_{Qx} ise sırasıyla uyarlanmış gerçek ve reaktif akım değerlerini göstermektedir.

DROOP kontrol kararlı duruma ulaştığı zaman DIC çıkış gerilimleri arasındaki faz farklarının neredeyse sıfır olduğu görülmektedir. Klasik DROOP yöntemi, eğer iletim hattı indüktifse DIC çıkış gerilimleri arasındaki faz farklarını ayarlayarak kararlı durumdaki gerçek güç paylaşımını yapabilmektedir. (20) ve (21) numaralı denklemleri tanımlanan çıkış akımları, çıkış güçlerine bağlı olduğu için kararlı durumdaki çıkış akımlarının büyüklüğü, önerilen minimum çıkış akımının girişine göre ayarlanmaktadır.

Burada bir karşılaştırma işlemi yapılmaktadır. Minimum çıkış akımı izleme yöntemi ile denetleyici, kendi dönüşüm açısına ince ayar yapmakta ve düzgün olmayan çıkış akımı dağıtımını azaltabilmektedir. Bu sebeple ek devridaim reaktif akımları olmaksızın DIC birimleri arasında düzgün çıkış akım paylaşımı sağlanabilmektedir.

3.4.3. V/f kontrol

Huang ve arkadaşlarının çalışmaları V/f kontrolünün, klasik güç sisteminin ikincil frekans düzenleme prensibine benzer bir şekilde çalıştığını göstermektedir. V/f kontrolü ile dağıtık üretim kaynağının çıkış gerilimi genliğini ve frekansını sabit tutmak amaçlanmaktadır. V/f kontrol teorisi, DROOP eğrisini enine bir şekilde ayarlamaktır. Şekil 3.17’de V/f kontrol teorisi için P-f ve Q-V grafikleri verilmektedir (Huang *et al.* 2011).



Şekil 3.17. V/f kontrol grafiği (a) Frekans DROOP karakteristiği (b) Gerilim DROOP karakteristiği (Huang *et al.* 2011)

V/f kontrolünün avantajları aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

- İyi çalışma performansı gösterir.
- Düşük başlangıç akımı ile çalışabilir.
- Diğer kontrol yöntemlerine göre daha geniş bir kararlı çalışma bölgesi vardır.
- Gerilim ve frekans değerleri, anma değerlerine sabitlenirler.
- Hızlanma, besleme frekansının değişim oranını ayarlayabilir.
- İyi bir hızla çalışır.
- Kolay kullanılabilir, maliyeti düşüktür.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde mikro şebeke mimarileri için önerilmiş kontrol yöntemleri incelenecektir.

Çizelge 4.1. Mikro şebekeler için kontrol stratejileri

Kontrol stratejileri	Uygulanma Yeri	Referans
3 fazlı PWM gerilim eviricileri için dijital kontrol stratejisi (gerilim ve akım kontrolü)	Dağıtık üretim sistemli mikro şebekeler	Marwali <i>et al.</i> (2004). (Part-I)
DROOP kontrol yöntemi ile ortalama güç kontrol yöntemlerinin birleştirilmesi (yük paylaşım kontrolü)	Dağıtık üretim sistemli mikro şebekeler	Marwali <i>et al.</i> (2004). (Part-II)
Hiyerarşik kontrol	Otonom ve şebeke bağlantılı çalışan dağıtık üretimli mikro şebekeler	Palizband and Kauhaniemi (2015).

Marwali ve arkadaşları çalışmalarında, tek bir bağımsız dağıtık enerji üretim sisteminde kullanılan 3 fazlı PWM gerilim eviricileri için dijital kontrol stratejisini ele almışlar ve dengesiz yük durumunda performans hızını artırmak için bir servo mekanizma kontrol teorisini uygulamışlardır. Bu çalışmada 3 fazlı PWM gerilim eviricileri için dijital kontrol stratejisi, doğrusal olmayan yük altında çıkış gerilimindeki istenmeyen gerilim harmoniklerinin ortadan kaldırılmasına olanak sağlamıştır. Bu teknik, aşırı yüklenme ya da kısa devre şartları altında gerekli hızlı akım sınırlama yeteneği sağlayan ayırık zamanlı kayma kipli akım denetleyici ile birleştirilmiştir (Marwali *et al.* 2004).

Marwalive ve arkadaşları, çalışmalarının ikinci kısmında, dağıtık üretim sistemlerinin paralel çalışması için kullanılan kontrol stratejisini ele almışlardır. Bu kontrol yönteminde, üretim sistemleri arasındaki düşük band genişlikli veri haberleşmesi sinyallerini ve buna ek olarak yerel bir şekilde ölçülebilen geri besleme sinyallerini kullanmışlardır. Bu yöntem, DROOP kontrol ve ortalama güç kontrol yöntemlerinin birleşiminden elde edilmiştir. Ortalama güç kontrol yöntemi, gerilim ve akım ölçüm

hatalarını daha hassas ölçmek için kullanılmıştır. Ayrıca, yük akımlarının harmonik akım paylaşımı için harmonik DROOP şeması, Marwali ve arkadaşlarının 2004 yılında yaptıkları çalışmanın birinci kısmında sunmuş oldukları gerilim ve akım kontrol algoritmasına dayanarak, önerilmiştir (Marwali *et al.* 2004).

Marwali ve arkadaşları DROOP kontrolü ile ortalama güç kontrol yönteminin birleştirilmesi için dağıtık üretim birimleri arasındaki gerçek gücün (P) ve reaktif gücün (Q) net yük paylaşımını belirlemek amacı ile klasik DROOP yönteminin yeni kontrol algoritmasına uyarlanması gerektiğini önermişlerdir. Bu uyarlamayı yapmak için, DROOP yöntemi, ortalama güç kontrol yöntemi ve harmonik paylaşımlı kontrol yöntemlerinden oluşan kombinasyonu paralel bağlı eviricilerin yük paylaşımı için sunmuşlardır. Bu çalışmada klasik DROOP yönteminde kontrol değişkeni olarak kullanılan frekans değişkeni yerine, faz açısı kontrol değişkeni olarak seçilmiştir. Burada, kararlı durumda gerçek güç sabit olduğu ve frekans 60 Hz anma frekansında kaldığı için faz açısının değişim özelliği olmaması bir avantaj olmuştur. Frekansı kontrol değişkeni olarak kullanan klasik DROOP yönteminde kararlı durumda frekans anma değerinden sapabilmektedir. Ayrıca her dağıtık üretim kaynağı biriminin aktif güçleri ile ortalama gerçek güçler arasındaki fark, kararlı durum anında, ayrık zamanlı integratör etkisiyle, sifıra eşittir. Sonuç olarak, dağıtık üretim kaynağı birimleri arasındaki aktif güç her dağıtık üretim kaynağı biriminin güç oranına göre düzgün bir şekilde paylaşılır (Marwali *et al.* 2004).

Palizband and Kauhaniemi yaptıkları çalışmada, otonom ve şebeke bağlantılı modda çalışan dağıtık üretim sistemli mikro şebekelerde hiyerarşik kontrol mimarileri için araştırma çalışması sunmuşlardır. Burada en önemli hedef, ikincil kontrol seviyesinde merkezi kontrol sistemi işlevinin azaltılmasıdır. Merkezi olmayan kontrol için bazı yöntemler vardır; ancak bu yöntemler sistemin tamamına değil yalnızca bir bölümüne uygulanmaktadır. İkinci önemli hedef olarak merkezi olmayan kontrol için enerji depolama sistemlerinin genişletilme gereksinimi vardır. Ayrıca beklenmedik enerji kesintilerine sebep olabilen mikro şebekelerdeki en üst birim için bu gereksinimin giderilmesi gerekir. Palizband and Kauhaniemi, araştırma çalışmalarına yönelik Çizelge 4.2'teki karşılaştırmayı yapmışlardır (Palizband and Kauhaniemi 2015).

Çizelge 4.2. Dağıtık üretim kaynakları için kontrol yaklaşımlarının karşılaştırılması (Palizban and Kauhaniemi,2015)

Kısa Bilgi	Yöntem	Avantaj	Şebeke oluşturma		Dezavantaj	Şebeke takibi
Bu güç dönüştürücüleri gerilim kontrolüne dayanır ve eşdeğer devre gerilim kaynağı ve düşük değerli seri empedanstan oluşur. Güç dönüştürücü otonom modda bağımsız olarak çalışabildiği için şebekenin referans gerilimini oluştururken bunlardan en az bir tanesi şebeke oluşturma yöntemine göre çalıştırılmalıdır. UPS sistemi, bu yöntemin pratik bir örneği olabilir, şebeke arızası sırasında bu güç dönüştürücü yüklere gereken gücü sağlar.	Haberleşme yöntemi var.	Gerilim ve güç paylaşımı regülasyonu iyidir. Kontrol parametrelerinin çıkış değerleri, referans değerlerine oldukça yakındır.	Doğru merkezi kontrol gerekli değildir. Sistemin uygulanması basit ve gelişime uygundur. Sistem güvenilirliği yüksektir ve haberleşme yöntemine dayalı sisteme kıyasla ekonomik nokta görüşünden de yararlanılabilir.		Ekonomik olarak pahalıdır. Sistemin güvenilirliği yüksek değildir. Sistem geliştirme imkânları kısıtlıdır.	Güç faktörü tam olarak kontrol edilemez.
	Haberleşme yöntemi yok.				Sistem kontrol koşulları hat empedansı ile orantılıdır. Harmonik akım paylaşımında dengesizlik oluşmaktadır. Haberleşme bağlantısına dayanan yöntemlerle karşılaştırıldığında, Geçiş değişimine tepki verme süresi uzundur.	
Bu güç dönüştürücüleri akım kontrolüne dayanır ve eşdeğer devre akım kaynağı ve yüksek değerli paralel empedanstan oluşur. Bu güç dönüştürücüleri, ana şebekeye, şebeke oluşturan güç dönüştürücüsüne veya frekans ve gerilim genliğini düzenlemek için yerel senkron jeneratöre hiçbir bağlantı olmadığında otonom modda çalışamaz. Gerilim referans değerinin yanı sıra aktif ve reaktif güç ayarlamak için maksimum güç noktası izleme (MPPT) veya santral denetleyicisi gibi bir üst seviye denetleyici gereklidir.	Doğal çerçeve				Aktarım işlevinin uygulanmasının karmaşıklığı yüksektir.	Gerilim besleme ileri ve çapraz kuplaj gereklidir. P1 denetleyicisinde, harmonik telafi kapasitesi çok düşüktür.
	Sabit referans çerçeve	Yapının uygulanması, PR kontrolörlerinin karşılaştırılması sırasında basitir Doğal ve senkron çerçeve kullanımı. PR kontrolörünü kullanırken kararlı durumda hata yoktur.				
	Senkron referans çerçeve	Kontrol değişkenleri sayısı azaltıldığı için sistemi kontrol etmek ve filtrelemek daha kolaydır				

Xuehua ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, klasik PID denetleyici yaklaşımının basit bir yapıya sahip olmasının önemli bir avantaj olduğunu savunmuşlardır. Bu yöntem doğrusal zamanla değişmez, tek giriş tek çıkış (SISO) sistemler için uygulanabilen karmaşık bölge yaklaşımı temeline dayanmıştır. Bu çalışmada Jury kararlılık kriterine dayanan kondansatör/akım geri besleme katsayısı ve akım düzeltme tabanlı PI parametrelerini seçmek için adım adım tasarım yöntemini önerilmiştir (Xuehua *et al.* 2012).

Hwang ve arkadaşları, Guoqiao ve arkadaşları ve Liserre ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda kararlı durum hatasından ve harmoniklerden kurtulma özelliği sebebi ile kontrol değişkenleri sinüzoidal olduğunda oransal salınım (PR) denetleyicilerinin yaygın olarak kullanıldığını göstermişlerdir (Hwang *et al.* 2010; Liserre *et al.* 2006; Guoqiao *et al.* 2010). İstenilen performansı göstermesi sebebi ile iç gerilim denetleyicisi olarak oransal salınım denetleyicisinin iyi bir seçim olduğunu savunmuşlardır. Oransal salınım denetleyicisi teoride doğal rezonans frekansı, ω civarında yüksek kazanç sağlamaktadır. Buradaki amaç, çalışmayı etkilemeksizin akım denetleyicisinin performansını iyileştirmektir.

Timbus ve arkadaşları, Heo ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda kestirimci aktif sönümleme yöntemini, şebeke bağlantısı esnasında rezonansı en aza indirmek amacıyla önermişlerdir. Bu yöntemde faz ve kazanç kompensatörleri eklenmiştir (Timus *et al.* 2006; Heo *et al.* 2010). Jiande ve arkadaşları kestirimci akım kontrol stratejisini iç çevrimde ve bulanık gerilim kontrol stratejisini dış çevrimde önermiştir. Böylece çıkış akımı ve referans akım arasındaki kararlı durum fazı hatasının ortadan kaldırılabileceğini savunmuşlardır (Jiande *et al.* 2008).

El-Saadany, çalışmasında gerilim kaynaklı PWM çeviricileri için sönümlü denetleyici (DB) kontrol yöntemini önermiştir. DB kontrolü kestirimci kontrol yapısına benzemektedir. Bu çalışmada DB kontrol, olası hatayı en aza indirmek için geliştirilmiştir. Böylece El-Saadany, hata olmaksızın referans akımını doğrudan izlemiştir (El-Saadany 2007).

Bouزيد ve arkadaşlarının çalışmaları mikro şebeke kontrol stratejilerine göre mikro şebeke kontrol yöntemlerinin geliştirildiğini göstermiştir. Bu çalışmalardan elde edilen verilerle Çizelge 4.3 oluşturulmuştur. Çizelgeden de görülebileceği üzere her bir kontrol yönteminin bir diğer yöntemle göre avantajları olduğu gibi farklı durumlar için de dezavantajları bulunmaktadır. Bir mikro şebeke sistemine uygulanabilecek en uygun kontrol yöntemi belirlenirken, denetleyicinin dengesiz sistemlerdeki performansı, sistemdeki parametre değişimine olan duyarlılığı, anahtarlama problemleri, sistemin cevap süresi vb. durumların göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Çizelge 4.3. Mikro şebekelerde kontrol yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları

Yöntem	Avantaj	Dezavantaj
Klasik PID Kontrol Yöntemi	Basit kontrol yapısı vardır.	Çalışma koşulları değiştiğinde sistemin performansında düşme meydana gelmektedir. Dengesiz sistemlerde iyi performans sağlamaz. Yüksek harmoniklerin sabit tutulması için çok iyi çözüm sağlamaz.
Sönümlü Denetleyici (DB)	Hızlı cevap sağlar. Akım denetleyici için uygundur. Düşük örnekleme frekansında çok hızlı geçiş cevabı verir.	İstenilen performansa ulaşmak için tam filtre modeli gerekir. Doğrusal olmayan yükler için kontrol edilen sistemin parametre değişkenlerinin ölçülmesi gerekir.
Kestirimci Kontrol Yöntemi	Doğrusal olmayan sistem oluşturma olasılığı vardır.	İstenilen performansa ulaşmak için tam filtre modeli gerekir.
Oransal Salınım (PR) Yöntemi	Bu yöntem, istenilen performansı elde etmek amacıyla düzgün iç akım denetleyici olarak kullanılabilir.	Büyük kazanç sağlayarak sıfır kararlı durum hatasını garanti eder ancak bunu denetleyicinin rezonans frekansı civarında yapar.
Doğrudan Güç Kontrol Yöntemi	Çok hızlı bir dinamik yanıtı olan basit denetleyicidir.	Kontrollü sistemin parametrik varyasyonlarına duyarlıdır. Sabit bir anahtarlama sıklığı olduğu için dönüştürücünün kayıplarını hesaplaması ve anahtarlama gürültü filtrelerinin tasarlanması zorlaşır.
Tahminsel Kontrol Yöntemi	Doğrusal olmayan sistemler için de uygulanabilir. Yüksek güçlü eviriciler için anahtarlama frekansını en aza indirmek ve olası hatayı belirli bir sınırdan tutmak için kullanılır.	İstenilen performansa ulaşmak için filtrenin kesin bir modelini gerektirir. Çok fazla hesaplama işlemleri gerektirir.

Çizelge 4.3. (devam)

Kayma Kipli Kontrol Yöntemi	Geçici durum boyunca güvenilir performans gösterir.	Ayrı zamanlarda kontrol için anahtarlama sorunu vardır.
Bulanık Kontrol Yöntemi	Parametrik varyasyonlara ve çalışma noktalarına duyarsızdır.	Yavaş bir kontrole olanak sağlar.
Tekrarlamalı Kontrol Yöntemi	Bu kontrolörler, harmonik kompensatörler ve akım kontrolörleri olarak uygulanmaktadır. Periyodik arızalar için sağlam performans gösterirler ve tüm harmonik frekanslarda olası hatayı belirli bir sınırdan tutmak için kullanılır.	Bilinmeyen yük dağılımlarının dengelenmesi kolay değildir. Dalgalandıran yüklerde çok hızlı tepki elde edilemez.
Sinirsel Ağlar Yöntemi	Akım denetleyicilerinde bu yöntemler çevrimdışı veya çevrim içi yaklaşımlarla geliştirilir ve kullanılırlar.	Yavaş bir dinamik tepkiye neden olabilir ve yalnızca statik modda uygulanır.
H- ∞ Yöntemi	Doğrusal olmayan, dengesiz yükler veya şebeke gerilimi bozulması durumunda bile iyi performans sağlar.	İleri düzeyde matematik bilgisi gerektirir. Kontrol sonuçları yüksek mertebededir. Sistem cevabı yavaştır.
Gecikmeli Akım Kontrol Yöntemi	Hızlı geçici yanıtları vardır. Bu tür denetleyiciler sağlam ve basittir, bunların uygulanması karmaşık devreler veya işlemciler gerektirmez.	Bu denetleyicinin en büyük dezavantajı, rezonans problemlerine neden olabilecek parametre yüklerinde ve çalışma koşullarındaki değişikliklerle değişen anahtarlama frekansıdır. Anahtarlama kayıpları, gecikmeli akım kontrolünün uygulanmasını daha düşük güç seviyelerine sınırlar. Fazlar arasındaki etkileşim nedeniyle mevcut hata kesin olarak gecikme bandının değeri ile sınırlı değildir.

5. SONUÇ

Bu tezde akıllı mikro şebekelerin hiyerarşik kontrolünün; birincil, ikincil ve üçüncül kontrol seviyelerinden oluşan hiyerarşik kontrol stratejisi olduğu belirlenmiş olup dağıtık üretim sistemlerinin farklı kontrol stratejileri üzerine literatürde yapılmış çalışmalar incelenmeye çalışılmıştır. Çizelge 4.1'de kontrol stratejileri; gerilim ve akım kontrolü, yük paylaşım kontrolü ve hiyerarşik kontrol parametreleri bakımından birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Mikro şebekelerdeki dağıtık üretim sistemlerini denetleyebilmek amacıyla daha önce literatürde yer almış kontrol yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları Çizelge 4.3'te verilmiştir. Bu çizelgede her bir kontrol sistemi, gürbüzlük, sistemin parametre değişimlerine karşı cevap hızı, sistemin kararlılığı, sistemdeki harmoniklerin ortadan kaldırılması ve sistemin doğrusal olmayan bir yapıya sahip olması gibi durumlar göz önünde bulundurularak değerlendirilmeye çalışılmıştır. Bu değerlendirmeler doğrultusunda mikro şebeke denetimleri yapılırken öncelikli kriter denetleyicinin basit bir yapıya sahip olması ise Klasik PID kontrol, Doğrudan Güç Kontrolü veya Gecikmeli Akım Kontrolü yöntemlerinden birinin kullanılması daha uygun olacaktır. Kontrol edilecek veriden hızlı cevap alınmasının öncelikli hedef olduğu durumlarda ise Sönümlü Denetleyici (DB) veya Gecikmeli Akım Kontrol yöntemlerinden biri tercih edilebilir. Doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde kullanılacak denetleyici yapısı oluşturulurken Kestirimci kontrol, Tahminsel kontrol veya $H-\infty$ kontrol yöntemlerinden herhangi birinden faydalanılabilir. Son olarak öncelikli amacın olası hatayı belirli bir sınırdan tutmak olduğu durumlarda ise Tekrarlamalı kontrol veya Tahminsel kontrol yöntemlerinden birinden faydalanılabilir.

KAYNAKLAR

- Anonymous, 2016. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/7/76/Hierarchical-control-system.svg>, 05.12.2016
- Bouzaïd, A.M., Guerrero, J.M., Cheriti, A., Bouhamida, M., Sicard, P., and Benghanem, M., 2015. A survey on control of electric power distributed generation systems for microgrid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44(2015), 751-766.
- Brabandere, K. D., Bolsen, B., Keybus, J. V. D., Woyte, A., Driesen, J. and Belmans, R., 2007. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters. *IEEE Trans. Power Electron*, C-22(4), 1107-1115.
- Ceylan, M., 2012. Elektrik Enerji Santralleri ve Elektrik Enerjisi İletimi ve Dağıtımı. Seçkin Yayınları No: 164, 439 s, Ankara.
- Chandorkar, M. C. and Divan, D. M., 1996. Decentralized operation of distributed UPS systems. *Proc. IEEE PEDES*, 565-571.
- Chandorkar, M. C., 2005. Distributed uninterruptible power supply systems. Ph.D. dissertation. Univ. Wisconsin-Madison, Madison, WI.
- Chandorkar, M., Divan, D. and Adapa, R., 1993. Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, C-29(1), 136-143.
- Dağ, B., Nadar, A., Boynueğri, A.R., Ateş, Y. ve Karakaş, A., 2014. Mikro ağlar: genelleştirme ve koruma üzerine çalışmalar. *ICSG İSTANBUL*, May, 217-221.
- El-Saadany EF., 2007. An improved deadbeat current control scheme with a novel adaptive self-tuning load model for a three-phase PWM voltage-source inverter. *Proc. IEEE Trans. Indust. Electron*, 54, 747-759.
- Geier, J. G., King, T. M., Kennedy, H. L., Thomas, R. D. and McNamara, B. R., 1995. Prediction of the time accuracy and integrity of GPS timing. *Proc. IEEE Int. Freq. Control Symp.*, 266-274. 94-100.
- Guerrero, J. M., Matas, J., de Vicuña, L. G., Castilla, M., and Miret, J., 2005. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control. *IEEE Trans. Ind. Electron*, C-52(4), 1126-1135.
- Guerrero, J. M., Matas, J., de Vicuña, L. G., Castilla, M. and Miret, J., 2006. Wireless-control strategy for parallel operation of distributed generation inverters. *IEEE Trans. Ind. Electron*, C-53(5), 1461-1470.
- Guerrero, J. M., Matas, J., de Vicuña, L., Castilla, M. and Miret, J., 2007. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance. *IEEE Trans. Ind. Electron*, C-54(2), 994-1004.
- Guerrero, J. M., Vásquez, J. C., Matas, J., Castilla, M. and de Vicuña, L. G., 2009. Control strategy for flexible microgrids based on parallel line-interactive UPS systems. *IEEE Trans. Ind. Electron*, C-56(3), 726-735.
- Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., de Vicuña, L. G. and Castilla, M., 2011. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization. *IEEE Trans. Ind. Electron*, C-58(1), 158-172.
- Guerrero, J.M., Chandorkar, M., Lee, T-L., and Loh, C., 2013. Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part I: Decentralized and Hierarchical Control. *IEEE Trans. on Indust. Elect.*, 60(4), 1254-1262.

- Guoqiao, S., Xuancai, Z., Jun, Z., and Dehong, X., 2010. A new feedback method for PR current control of LCL-filter-based grid-connected inverter. *IEEE Trans Indust Electron*, 57, 2033–2041.
- Heo, H.-S., Choe, G.-H., and Mok, H.-S., 2013. Robust predictive current control of a grid-connected inverter with harmonics compensation. In *Twenty-Eighth annual IEEE applied power electronics conference and exposition (APEC)*, 2212–2217.
- Huang, W., Lu, M. and Zhang, L., 2011. Survey on Microgrid Control Strategies. *Procedia*, 206-212
- Hwang, J.G., Lehn, P.W., and Winkelnkemper, M., 2010. A generalized class of stationary frame-current controllers for grid-connected AC–DC converters. *IEEE Trans Power Delivery*, 25, 2742–2751.
- Iyer, S. V., Belur, M. N. and Chandorkar, M. C., 2010. A generalized computational method to determine stability of a multi-inverter microgrid. *IEEE Trans. Power Electron.*, C-25(9), 2420-2432.
- Jeon, J. H., Kim, J. Y., Kim, H. M., Kim, S. K., Cho, C., Kim, J. M., Ahn, J. B. and Nam, K. Y., 2010. Development of hardware in-the-loop simulation for testing operation and control functions of microgrid. *IEEE Trans. Power Syst*, C-25(12), 2919-229.
- Katiraei, F. and Iravani, M. R., 2006. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units. *IEEE Trans. Power Syst.*, C-21(4), 1821-1831.
- Katiraei, F., Iravani, M. R. and Lehn, P. W., 2007. Small-signal dynamic model of a micro-grid including conventional and electronically interfaced distributed resources. *IET Gener. Transmiss. Distrib.*, C-1(3), 369-378.
- Lasseeter, R. H., 2002. Microgrids. *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meet*, 305-308.
- Lee, C. T., Chuang, C. C., Chu, C. C. and Cheng, T., 2009. Control strategies for distributed energy resources interface converters in low voltage microgrid. *Proc. ECCE*, 2022-2029.
- Lehn, P.W., Katiraei, F., and Iravani, M.R., 2005. Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process. *IEEE Trans. Power Del.*, C-20(1), 248-257.
- Li, Y. W. and Kao, C. N., 2009. An accurate power control strategy for power electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid. *IEEE Trans. Power Electron*, C-24(12), 2977-2988.
- Liserre, M., Teodorescu, R., and Blaabjerg, F., 2006. Multiple harmonics control for three-phase grid converter systems with the use of PI-RES current controller in a rotating frame. *IEEE Trans. Power Electron*, 21, 836–841.
- Majumder, A., Chaudhuri, B., Ghosh, A., Ledwich, G. and Zare F., 2010. Improvement of stability load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop. *IEEE Trans. Power Sys.* C-25(2) 796-808.
- Majumder, A., Ghosh, A., Ledwich, G. and Zare F., 2009. Angle droop versus frequency droop in a voltage converter based autonomous microgrids. *Proc. IEEE PES Gen. Meeting*, 1-8.
- Majumder, R., Ghosh, A., Ledwich, G. and Zare, F., 2009. Load sharing and power quality enhanced operation of a distributed microgrid. *IET Renewable Power Gener*, C-3(2), 109-119.

- Marwali, M. N., Jung, J. W. and Keyhani, A., 2004. Control of distributed generation systems - Part II: Load sharing control. *IEEE Trans. Power Electron*, C-19(6), 1551-1561.
- Marwali, M. N., Jung, J. W. and Keyhani, A., 2004. Control of distributed generation systems - Part I: Voltage and Currents control. *IEEE Trans. Power Electron*, C-19(6), 1541-1550.
- Mehrizi-Sani, A. and Iravani, R., 2010. Potential function based control of a microgrid in islanded and grid-connected modes. *IEEE Trans. Power Syst.*, C-25(4), 1883-1891.
- Mohamed, Y. and Saadany, E. F., 2008. Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids. *IEEE Trans. Power Electron*. C-23(6), 2806-2816.
- Palizban, O. and Kauhaniemi, K., 2015. Hierarchical control structure in microgrids with distributed generation: Island and grid-connected mode. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, C-44(2015), 797-813.
- Patrao, I., Figueres, E., Garcera, G. and Gonzalez-Medina, R., 2014. Microgrid architectures for low voltage distributed generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, C-43(2015), 415-424.
- Prodanovic, M. and Green, T. C., 2006. High-quality power generation through distributed control of a power park microgrid. *IEEE Trans. Ind. Electron*, C-53(5), 1471-1482.
- Timbus, A.V., Teodorescu, R., Blaabjerg, F., Liserre, M., Rodriguez, P., 2006. Linear and nonlinear control of distributed power generation systems, in *Industry applications conference, Forty-first IAS annual meeting conference record of the 2006 IEEE*, 1015–1023.
- Tuladhar, A., Jin, H., Unger, T. and Mauch, K., 1997. Operation of single phase inverter modules with no control interconnections. *Proc. IEEE APEC*, 94–100.
- Tuladhar, A., Jin, H., Unger, T. and Mauch, K., 2000. Control of parallel inverters in distributed ac power systems with consideration of line impedance effect. *IEEE Ind. Appl.*, 36(1), 131-138.
- Vasquez, J.C., Gurrero, J.M., Savaghebi, M., and Teodorescu, R., 2013. Modelling analysis and design of stationary-reference-frame droop-controlled paralleled three-phase voltage source inverters. *IEEE Trans. on Indust. Elec.* 60(4), 1271-1280.
- Xuehua, W., Xinbo, R., Chenlei, B., Donghua, P., and Lin, X., 2012. Design of the PI regulator and feedback coefficient of capacitor current for grid-connected inverter with a LCL filter in discrete-time domain in. *IEEE energy conversion congress and exposition (ECCE)*, 1657–1662.
- Yu, X., Khambadkone, A. M., Wang, H. and Terence, S. T. S., 2010. Control of parallel-connected power converters for low-voltage microgrid – Part I: A hybrid control architecture. *IEEE Trans. Power Electron*, C-25(12), 2962-2970.

ÖZGEÇMİŞ

1990’da Isparta’da doğdum. İlköğrenimimi ve ortaöğrenimimi Isparta’da tamamladım. 2008 yılında başladığım Süleyman Demirel Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünden 2012’de mezun oldum. 2014’de Süleyman Demirel Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Elektronik Bilim Dalında lisansüstü eğitim için hak kazandım. 2015 yılında Atatürk Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak atandım ve hâlen bu görevi sürdürmekteyim.