

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**

**MİKROŞEBEKELER İÇİN HİYERARŞİK ENERJİ YÖNETİM
SİSTEMİ TASARIMI VE UYGULAMASI**

DOKTORA TEZİ

AHMET KAYSAL

DENİZLİ, HAZİRAN - 2023

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**



**MİKROŞEBEKELER İÇİN HİYERARŞİK ENERJİ YÖNETİM
SİSTEMİ TASARIMI VE UYGULAMASI**

DOKTORA TEZİ

AHMET KAYSAL

DENİZLİ, HAZİRAN - 2023

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Birimi tarafından 2022FEBE001 nolu proje ile desteklenmiştir.**

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

AHMET KAYSAL

ÖZET

MİKROŞEBEKELER İÇİN HİYERARŞİK ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI VE UYGULAMASI

DOKTORA TEZİ

AHMET KAYSAL

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. SELİM KÖROĞLU)

(EŞ DANIŞMAN:PROF. DR. YÜKSEL OĞUZ)

DENİZLİ, HAZİRAN - 2023

Mikroşebekeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerine entegre edilmesine olanak sağlayarak yerel enerji kaynaklarının doğrudan tüketimi, depolanması ve dağıtımı için bir çözüm sunar. Bu tez çalışmasında, fotovoltaik, rüzgâr türbini, dizel generatör ve enerji depolamalı adalanmış DC mikroşebeke sistemi için hiyerarşik üç seviyeli kontrol yaklaşımına sahip bir enerji yönetim sistemi önerilmiş ve benzetim çalışmaları yapılmıştır. Hiyerarşik üç seviyeli kontrolde birincil kontrol seviyesi, dönüştürücülerin kontrolünü sağlar. İkincil kontrol seviyesi, bara gerilim restorasyonunun sağlanması ve akım paylaşım doğruluğunun eşzamanlı olarak artırılması için kullanılır. Üçüncül kontrol seviyesinde ise optimum yük paylaşımı gerçekleştirilerek üretim maliyetlerinin en aza indirilmesi amaçlanır. Bu kontrol yapısının işletilmesinde, hibrit sistemin enerji talebini değişken yük koşulları altında otonom ve optimum şekilde yönetecek bir strateji önerilmiştir. Enerji yönetim sisteminde Mod-I, Mod-II ve Mod-III olmak üzere üç çalışma stratejisi belirlenmiştir. Mod-I'de yenilenebilir kaynakların maksimum güç noktası takibi sağlanır. Mod-II'de dizel generatörün yakıt tüketimi ve karbon salınımının en aza indirilmesi için enerji tüketim minimizasyon stratejisi tabanlı doğrusal programlama, genetik algoritma ve örüntü arama algoritmaları kullanılır. Mod-III'te ise dizel generatöre ihtiyaç duyulmayıp dağıtık kaynaklar arasındaki güç akışı, bulanık mantık kontrolör ve durum makine kontrol stratejisi kullanılarak optimize edilir.

Mikroşebeke uygulamalarında güç dönüştürücüleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının yönetiminde önemli bir rol oynamaktadır. Bu amaçla güç faktörü düzeltilmeli, yüksek verimli yükselten tip bir dönüştürücü tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan DC-DC dönüştürücü, deneysel çalışmalarda kullanılıp test edilmiştir. Deney test düzeneği için üç özdeş dağıtık enerji kaynağı, yük ve kontrol bloğundan oluşan bir DC mikroşebeke yapısı oluşturulmuştur. Dağıtık enerji kaynakları arasındaki güç paylaşımında iki seviyeli hiyerarşik enerji yönetimi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda; geleneksel eğim kontrolü, uyarlanabilir eğim kontrolü, farklı akım paylaşım oranlarına göre güç paylaşımı, sistemin referans gerilimin değişimine gösterdiği tepki ve sistemin tak-çalıştır performansının incelenmesi sistematik olarak ele alınmış ve değerlendirmeler yapılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, önerilen uyarlanabilir eğim kontrol yöntemi, DC bara gerilim restorasyonu ve akım paylaşım doğruluğu açısından daha iyi sonuçlar vermiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Mikroşebeke, Hiyerarşik enerji yönetimi, Optimizasyon, Enerji tüketim minimizasyon stratejisi, DC-DC dönüştürücü

ABSTRACT

HIERARCHICAL ENERGY MANAGEMENT SYSTEM DESIGN AND IMPLEMENTATION FOR MICROGRIDS

PH.D THESIS

AHMET KAYSAL

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

(SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. SELİM KÖROĞLU)

(CO-SUPERVISOR:PROF. DR. YÜKSEL OĞUZ)

DENİZLİ, JUNE 2023

Microgrids provide a solution for the direct consumption, storage and distribution of local energy sources by allowing renewable energy sources to be integrated into power systems. In this thesis study, an energy management system with a hierarchical three-level control approach is proposed, and simulation studies are carried out for an islanded DC microgrid system with photovoltaic, wind turbine, diesel generator, and energy storage. In the hierarchical three-level control, the primary control layer ensures the control of the converter. The secondary control layer is used to restore DC bus voltage and increase current-sharing accuracy simultaneously. In the tertiary control layer, it is aimed to minimize the production cost by performing optimum load-sharing. For the operation of this control structure, a strategy is proposed to autonomously and optimally manage the energy demand of the hybrid system under variable load conditions. Three operating methods, namely Mode-I, Mode-II, and Mode-III, are defined in the energy management system. In Mode-I, maximum power point tracking of renewable resources is provided. In Mode-II, energy consumption minimization strategy-based linear programming, genetic algorithm and pattern search algorithms are used to minimize the diesel generator's fuel consumption and carbon emissions. In Mode-III, the diesel generator is not needed, and the power flow between the distributed resources is optimized using the fuzzy logic controller and state machine control strategy.

Power converters play a significant role in managing renewable energy sources in microgrid applications. In this regard, a power factor corrected and highly efficient boost-type converter design and implementation have been carried out. The designed DC-DC converter has been utilized and tested in experimental studies. A DC microgrid structure consisting of three identical distributed energy sources, load, and control blocks has been created for the experimental test setup. Two-level hierarchical energy management approach has been employed for power-sharing among distributed energy sources. In experimental studies, conventional droop control, adaptive droop control, power sharing according to different current sharing ratios, the system's response to the change of reference voltage and the plug-and-play performance of the system are systematically discussed and evaluated. The results showed that the proposed adaptive droop control improved DC bus voltage restoration and current-sharing accuracy.

KEYWORDS: Microgrid, Hierarchical energy management, Optimization, Energy consumption minimization strategy, DC-DC converter

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
KISALTMALAR LİSTESİ.....	xii
ÖNSÖZ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı	7
1.3 Tezin Literatüre Katkısı ve Organizasyonu.....	9
2. MİKROŞEBEKE.....	12
2.1 Mikroşebekenin Tanımı.....	13
2.2 Mikroşebeke Yapısı.....	14
2.3 Mikroşebeke Kontrolü.....	16
3. DC MİKROŞEBEKEDE HİYERARŞİK KONTROL	17
3.1 Fotovoltaik Dizi.....	18
3.2 Rüzgâr Türbini.....	22
3.3 Dizel Generatör	25
3.4 Enerji Depolama Sistemi.....	27
3.5 Yük Modeli.....	30
3.6 Hiyerarşik Kontrol.....	33
3.6.1 Birincil Kontrol Seviyesi	36
3.6.2 İkincil Kontrol Seviyesi	39
3.6.3 Üçüncül Kontrol Seviyesi	43
4. DC MİKROŞEBEKEDE ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ	45
4.1 Enerji Yönetim Sistemlerine Genel Bakış.....	45
4.2 Önerilen Enerji Yönetim Sistemi	46
4.3 Eşdeğer Tüketim Minimizasyonu Stratejisi	49
4.3.1 Doğrusal Optimizasyon	50
4.3.2 Genetik Algoritma	53
4.3.3 Örüntü Arama Algoritması	54
4.4 Bulanık Mantık Kontrolör	56
4.5 Durum Makine Kontrol Stratejisi.....	62
4.6 Önerilen Hiyerarşik Kontrollü EYS'nin Benzetim Modeli.....	64
4.6.1 Mod-I İşletme	67
4.6.2 Mod-II İşletme	68
4.6.3 Mod-III İşletme.....	69
4.7 Benzetim Sonuçları	70
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	78
5.1 DeneySEL Mikroşebeke Mimarisi ve Test Düzenegi.....	78
5.2 DC-DC Dönüştürücü Tasarımı ve Uygulaması.....	80
5.2.1 Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi	81

5.2.2	Yarı İletken Malzemelerin Seçimi ve Verimlilik Hesapları	86
5.2.3	Tasarlanan Dönüştürücü Donanımı ve Kontrolü	91
5.2.4	DC-DC Dönüştürücü Deneysel Sonuçları	98
5.3	Eğim Kontrol Yöntemi	102
5.3.1	Geleneksel Eğim Kontrol Yöntemi.....	102
5.3.2	Uyarlanabilir Eğim Kontrolü	106
5.3.3	Kontrolörlerin Karşılaştırılması ve Değerlendirmeler	108
5.4	Farklı Akım Paylaşım Oranlarına Göre Güç Paylaşımı	109
5.5	Referans Gerilim Değişiminin İncelenmesi	112
5.6	Tak-Çalıştır Performansının İncelenmesi.....	113
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER	115
7.	KAYNAKLAR.....	119
8.	EKLER.....	129
9.	ÖZGEÇMİŞ	133



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Önerilen DC mikroşebeke güç sistemi ve hiyerarşik kontrol yapısı. .8	
Şekil 2.1: Mikroşebekenin sınıflandırılması. 12	12
Şekil 2.2: Tipik bir hibrit mikroşebeke enerji sistemi yapısı. 15	15
Şekil 3.1: Önerilen DC mikroşebekenin güç akışını kontrol eden hiyerarşik enerji yönetim sistemi blok diyagramı. 18	18
Şekil 3.2: FV hücrenin tekli diyot modeli. 19	19
Şekil 3.3: FV dizi modeli ve DC-DC dönüştürücü yapısı. 20	20
Şekil 3.4: FV dizinin akım-gerilim ve güç-gerilim grafiklerine ilişkin elektriksel karakteristiği. 20	20
Şekil 3.5: Solar ışımanın zamana bağlı değişimi. 21	21
Şekil 3.6: Rüzgâr türbini modeli ve DC-DC dönüştürücü yapısı. 23	23
Şekil 3.7: Rüzgâr türbin gücünün rotor hızına bağlı değişim karakteristiği. 24	24
Şekil 3.8: Rüzgar hızının zamana bağlı değişimi. 24	24
Şekil 3.9: Dizel generatör modeli ve DC-DC dönüştürücü yapısı. 26	26
Şekil 3.10: Lityum iyon batarya modeli ve DC-DC dönüştürücü yapısı. 28	28
Şekil 3.11: Lityum iyon batarya modelinin deşarj karakteristiği. 29	29
Şekil 3.12: Mikroşebeke benzetim çalışmasında kullanılan yük modeli. 31	31
Şekil 3.13: Mikroşebeke benzetim çalışmasında kullanılan değişken ve kritik yük profili. 32	32
Şekil 3.14: Boşaltım yükü histerezis kontrol modeli. 32	32
Şekil 3.15: Mikroşebekede hiyerarşik kontrol seviyeleri. 34	34
Şekil 3.16: Mikroşebeke fonksiyonları için farklı zaman ölçekleri. 35	35
Şekil 3.17: Önerilen hiyerarşik enerji yönetim sisteminin kontrol yapısı (a) Dağıtık üretim birimleri (b) Birincil kontrol seviyesi (c) İkincil kontrol seviyesi (d) Üçüncül kontrol seviyesi. 36	36
Şekil 3.18: Birincil kontrol seviyesi blok diyagramı. 37	37
Şekil 3.19: İki düğümlü DC mikroşebeke yapısının basitleştirilmiş eşdeğer devre modeli. 38	38
Şekil 3.20: Uyarlanabilir eğim kontrol yöntemi için iki düğümlü DC mikroşebeke yapısının eşdeğer devre modeli. 41	41
Şekil 4.1: Mikroşebeke yapılarında kullanılan enerji yönetim sistemi teknikleri. 46	46
Şekil 4.2: Önerilen DC mikroşebekenin EYS yapısı (a) Dağıtık üretim birimleri (b) Birincil kontrol seviyesi (c) İkincil kontrol seviyesi (d) Üçüncül kontrol seviyesi. 47	47
Şekil 4.3: Enerji yönetim stratejisinin akış diyagramı. 48	48
Şekil 4.4: Doğrusal optimizasyona dayalı ECMS'nin akış diyagramı. 52	52
Şekil 4.5: Genetik algoritmaya dayalı ECMS'nin akış diyagramı. 53	53
Şekil 4.6: Örüntü arama algoritmasına dayalı ECMS'nin akış diyagramı. 55	55
Şekil 4.7: Bulanık mantık blok diyagramı. 57	57
Şekil 4.8: Bulanık mantık çıkarım sistemi blok diyagramı. 57	57
Şekil 4.9: EYS için bulanık mantık tasarım arayüzü. 59	59
Şekil 4.10: Bulanık mantık girişlerinin üyelik fonksiyonları (a) Batarya doluluk oranı, (b) Talep edilen güç. 60	60
Şekil 4.11: Bulanık mantık çıkış üyelik fonksiyonları. 60	60

Şekil 4.12: Bulanık mantık kurallarının yüzey görünümü.	61
Şekil 4.13: EDS'nin SOC seviyeleri için histerezis döngüsü.	62
Şekil 4.14: Durum makine kontrol stratejisinin durum diyagramı.	63
Şekil 4.15: Kontrol stratejilerinin uygulanması için belirlenen her bir dağıtık üretim biriminin işleyiş yapısı.....	65
Şekil 4.16: Mod geçişlerinin işletilmesini ifade eden çift histerezis kontrol şeması.	66
Şekil 4.17: Histerezis kontrol benzetim modeli (a) Mod-II operasyonun işletilmesi, (b) Mod-III operasyonun işletilmesi.	67
Şekil 4.18: ECMS benzetim modeli.....	68
Şekil 4.19: Bulanık mantık tabanlı EYS'nin benzetim modeli.	69
Şekil 4.20: DMKS tabanlı EYS'nin benzetim modeli.	70
Şekil 4.21: Önerilen EYS'ye dayalı DC mikroşebekenin güç akışı (a) Senaryo I (b) Senaryo II (c) Senaryo III (d) Senaryo IV.	72
Şekil 4.22: Mod-II işletmede ECMS'ye dayalı akım paylaşım oranının değişimi.	74
Şekil 4.23: Mod-II işletme koşulunda dizel generatörün yakıt maliyeti performans karşılaştırması.	74
Şekil 4.24: Mod-III işletmede akım paylaşım oranının değişimi.....	75
Şekil 4.25: EDS'nin SOC seviyelerindeki değişim grafiği.....	75
Şekil 4.26: Mikroşebekenin DC bara çıkış gerilimi değişim grafiği.	77
Şekil 5.1: Deneysel çalışması gerçekleştirilen DC mikroşebekenin blok şeması (a) DEK, (b) Birincil kontrol seviyesi, (c) İkincil kontrol seviyesi.	79
Şekil 5.2: DC mikroşebeke sisteminin deneysel test düzeneği.	80
Şekil 5.3: Dönüştürücünün prensip devre şeması.	82
Şekil 5.4: (a) DC-DC yükselten dönüştürücü devre şeması, (c) Anahtar kapalı durumda, (b) Anahtar açık durumda, (d) PWM kontrol sinyali, (e) İndüktör gerilimi, (f) İndüktör akımı dalga formları....	83
Şekil 5.5: Epcos Ferrites Ltd. firmasının ETD44/22/15 kodlu E tipindeki ferrit nüve fiziksel ölçüleri.	85
Şekil 5.6: Transformatör sargılarının sarım düzeni.....	85
Şekil 5.7: MOSFET'in iletim ve kesim anındaki basitleştirilmiş dalga formları (a) Anahtarın iletim durumu, (b) Anahtarın kesim durumu	88
Şekil 5.8: Dönüştürücüye ait komponentlerde harcanan teorik güç kayıpları. .	91
Şekil 5.9: Dönüştürücünün prensip devre şeması (a) EMG filtre, (b) PFC yükselten dönüştürücü, (c) Geri besleme devresi, (d) UCC28180D dahili kontrolör, (e) NMOS sürücü, (f) 8bit dijital potansiyometre, (g) STM32F407VGT6 mikrodenetleyici.....	92
Şekil 5.10: Kontrol modülünün 3 boyutlu gösterimi.	93
Şekil 5.11: Güç modülünün 3 boyutlu gösterimi.	93
Şekil 5.12: Kapalı çevrim transfer fonksiyonuna ait Bode genlik ve faz eğrileri.	96
Şekil 5.13: Tasarlanan dönüştürücünün kapalı çevrim kontrol modeli.....	96
Şekil 5.14: PI, PD ve PID denetleyicilerin birim basamak cevaba olan tepkileri.	97
Şekil 5.15: Avrupa standartlarına göre farklı yük koşullarında hesaplanan ve ölçülen verimlilik.	99

Şekil 5.16: Önerilen dönüştürücünün Avrupa verimlilik standartlarına göre test sonuçları (a) Çıkış gerilimi, (b) Çıkış gücü.	99
Şekil 5.17: Önerilen dönüştürücünün farklı giriş gerilimlerindeki performansı (CH1 giriş, CH2 çıkış) (a) DC giriş, (b) AC giriş....	100
Şekil 5.18: Dönüştürücünün tam yükte giriş akımı (CH1) ve giriş gerilimi (CH2) grafikleri (a) PFC pasif (b) PFC aktif.....	101
Şekil 5.19: Dönüştürücü tam yükte çıkış gerilimi (CH1) ve çıkış akımı (CH2) grafikleri.....	101
Şekil 5.20: MOSFET'in gate ve drain terminallerindeki PWM sinyalleri; Vgs gerilimi (CH1) ve Vds gerilimi (CH2).	102
Şekil 5.21: Geleneksel eğim kontrol yönteminde eşit hat dirençleri kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı.	103
Şekil 5.22: Geleneksel eğim kontrol yönteminde eşit hat dirençlerine göre deneysel sonuçlar (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı. ...	104
Şekil 5.23: Geleneksel eğim kontrol yönteminde farklı hat dirençlerinin kullanılmasıyla elde edilen deneysel sonuçlar (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı.....	105
Şekil 5.24: Uyarlanabilir eğim kontrol yönteminde eşit hat dirençleri kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı.	107
Şekil 5.25: Uyarlanabilir eğim kontrol yönteminde farklı hat dirençlerinin kullanılmasıyla elde edilen deneysel sonuçlar (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı.....	108
Şekil 5.26: Geleneksel ve uyarlanabilir eğim kontrolörlerin performans karşılaştırması (a) Çıkış gücü, (b) DC bara gerilimi.	109
Şekil 5.27: DC baraya bağlı dönüştürücüler arasındaki farklı akım paylaşım oranlarına göre benzetim sonuçları (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı, (d) Akım paylaşım oranları.	110
Şekil 5.28: DC baraya bağlı dönüştürücüler arasındaki farklı akım paylaşım oranlarına göre deneysel sonuçlar (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı ve (d) Akım paylaşım oranı grafikleri. .	111
Şekil 5.29: DC bara referans geriliminin değişimine göre elde edilen deneysel sonuçlar (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı. ...	112
Şekil 5.30: DEK 3 biriminin bağlantısının kesilmesi ve yeniden bağlanması durumlarında (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı grafikleri.	113
Şekil B.1: Kontrol modülü üzerindeki mikrodenetleyicinin giriş çıkış pinleri.	130
Şekil B.2: Kontrol modülü üzerindeki izole akım-gerilim devreleri.	130
Şekil B.3: Kontrol modülü üzerindeki izole haberleşme devreleri.	131
Şekil B.4: Dönüştürücü güç kartı devre yapısı.....	132

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: FV sisteminin teknik özellikleri.	21
Tablo 3.2: RT sisteminin teknik özellikleri.....	24
Tablo 3.3: DG sisteminin teknik özellikleri.	27
Tablo 3.4: EDS sisteminin teknik özellikleri.	30
Tablo 3.5: DC bara ve yüklere ait teknik özellikler.	31
Tablo 4.1: Önerilen mikroşebekede bulanık mantık için optimal kural kümeleri.....	61
Tablo 4.2: Mikroşebeke yapısına ait performans karşılaştırması.....	76
Tablo 5.1: Dönüştürücüye ait tasarım parametreleri.....	82
Tablo 5.2: ETD44 ferrit nüvenin teknik özellikleri.	85
Tablo 5.3: EICSEmi Ltd. firmasının D25XB60 köprü tipi doğrultucu teknik özellikleri.....	87
Tablo 5.4: Infineon Ltd. firmasının IPW65R190C6 MOSFET teknik özellikleri.....	87
Tablo 5.5: Littelfuse Ltd. firmasının LSIC2SD065A10A SiC Schottky diyotunun teknik özellikleri.	90
Tablo 5.6: Kontrol metotlarının performans analizi.	97
Tablo 5.7: Dönüştürücünün deneysel test sonuçları.	98
Tablo 5.8: Hat dirençlerinin eşit olduğu durum için geleneksel kontrolün değişken yük talebinde benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin karşılaştırılması.	105
Tablo 5.9: Geleneksel eğim kontrol yönteminde farklı hat dirençlerine bağlı deneysel sonuçlar.	106
Tablo 5.10: Uyarlanabilir eğim kontrol yönteminde eşit hat dirençlerine bağlı deneysel sonuçlar.	107
Tablo 5.11: Uyarlanabilir eğim kontrol yönteminde farklı hat dirençlerine bağlı deneysel sonuçlar.	108
Tablo 5.12: Farklı akım paylaşım oranlarına göre benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar.....	111
Tablo A.1: Bulanık mantık tabanlı EYS kurallarının ifadesi.....	129

SEMBOL LİSTESİ

v_{oi}	:	i düğümündeki her bir dönüştürücünün çıkış gerilimi
v_{ref}	:	DC bara geriliminin referans değeri
i_{oi}	:	i düğümündeki her bir dönüştürücünün çıkış akımı
R_{di}	:	Her bir dönüştürücünün sanal direnç değeri
v_{bus}	:	DC bara gerilimi
R_l	:	Her bir dönüştürücünün hat direnç değeri
Δv_{oi}	:	i düğümündeki her bir dönüştürücünün gerilim sapması
k_i	:	Her bir dönüştürücünün akım paylaşım oranı
k_{pi}	:	Her bir dönüştürücünün PI kontrolör oransal kazancı
k_{ii}	:	Her bir dönüştürücünün PI kontrolör integral kazancı
G_{vc}	:	Gerilim döngüsü transfer fonksiyonu
G_c	:	PI kontrolörün yerel akım transfer fonksiyonu
G_v	:	PI kontrolörün yerel gerilim transfer fonksiyonu
G_{lpf}	:	Alçak geçiren filtre transfer fonksiyonu
ω_c	:	Alçak geçiren filtrenin kesim frekansı
δ_{v_i}	:	Her bir dönüştürücünün ortalama gerilim PI parametresi
δ_{i_i}	:	Her bir dönüştürücünün ortalama akım PI parametresi
i^*	:	Dağıtık enerji kaynaklarının referans akımları
$y'_{j,n}$	:	k_i 'nin normalize edilmiş değerleri (0,35-3)
V_{mpp}	:	FV modülün maksimum güç noktasındaki gerilimi
I_{mpp}	:	FV modülün maksimum güç noktasındaki akımı
P_{pv}	:	FV modül gücü
V_{oc}	:	FV modül açık devre gerilimi
I_{sc}	:	FV modül kısa devre akımı
I_s	:	FV modül diyot satürasyon akımı
R_p	:	FV hücre matematiksel modeldeki paralel direnç değeri
R_s	:	FV hücre matematiksel modeldeki seri direnç değeri
n_s	:	Rüzgâr türbini nominal rotor hızı
T_m	:	Rüzgâr türbini mekanik tork değeri
R_w	:	Daimî mıknatıslı senkron generatör stator faz direnci
L_w	:	Daimî mıknatıslı senkron generatör stator faz indüktansı
J_w	:	Daimî mıknatıslı senkron generatör atalet sabiti
F_w	:	Daimî mıknatıslı senkron generatör viskoz sönümlemesi
p	:	Daimî mıknatıslı senkron generatör kutup çifti sayısı
P_d	:	Dizel generatör nominal gücü
V_d	:	Dizel generatör nominal gerilimi
f_d	:	Dizel generatör nominal frekansı
SOC_{min}^d	:	ECMS'nin işletilmesi sırasındaki minimum şarj seviyesi
SOC_{max}^d	:	ECMS'nin işletilmesi sırasındaki maksimum şarj seviyesi
V_b	:	Batarya paketinin nominal gerilimi
Q	:	Batarya paketinin kapasitesi
P_b^{max}	:	Batarya paketinin maksimum deşarj gücü
P_b^{opt}	:	DMKS için batarya paketinin optimum gücü
P_b^{min}	:	Batarya paketinin maksimum şarj gücü
I_{dis}	:	Batarya paketinin nominal deşarj akımı

R_b	:	Batarya paketinin iç direnci
SOC_{min}	:	EDS'nin minimum şarj seviyesi
SOC_{max}	:	EDS'nin maksimum şarj seviyesi
P_l	:	Talep yük gücü
P_l^{dyn}	:	Değişken yük gücü
P_l^{crt}	:	Kritik yük gücü
P_l^{dmp}	:	Boşaltım (dump) yük gücü
I_{pv}	:	FV hücrede güneş radyasyonuna bağlı üretilen akım değeri
I_o	:	FV hücre çıkış akımı
V_o	:	FV hücre çıkış gerilimi
T	:	FV hücre sıcaklığı
k	:	Boltzmann sabiti
q	:	Elektron yükü
A	:	Doğrusallık faktörü
P_w	:	Rüzgâr türbini nominal gücü
A_w	:	Rüzgâr türbini kanat süpürme alanı
V_w	:	Rüzgâr hızı
C_p	:	Rüzgâr türbini güç katsayısı
β	:	Kanat eğim açısı
ρ	:	Hava yoğunluğu
λ	:	Çevresel hız oranı
T_e	:	Daimî mıknatıslı senkron generatörün elektromanyetik torku
λ_r	:	Daimî mıknatıslı senkron generatörün rotor akısı
i_{ds}	:	Daimî mıknatıslı senkron generatörün d-ekseni stator akımı
i_{qs}	:	Daimî mıknatıslı senkron generatörün q-ekseni stator akımı
L_d	:	Daimî mıknatıslı senkron generatörün stator indüktansı (d)
L_q	:	Daimî mıknatıslı senkron generatörün stator indüktansı (q)
C_f	:	Yakıt maliyeti
$CF(P_d)$	:	Dizel generatörün toplam yakıt maliyeti
V_{oc}^b	:	Batarya paketinin açık devre gerilimi
I_b	:	Batarya paketinin nominal akımı
K	:	Batarya polarizasyon sabiti
η_b	:	Batarya verimi
SOC_{ini}	:	Batarya başlangıç şarj durumu
A	:	Lineer eşitsizlik kısıtlarını ifade eden matris
A_{eq}	:	Lineer eşitlik kısıtlarını ifade eden matris
b	:	Eşitsizlik kısıtlarını ifade eden vektör
b_{eq}	:	Eşitlik kısıtlarını ifade eden vektör
u_b	:	Optimizasyon algoritmasının üst sınır değeri
l_b	:	Optimizasyon algoritmasının alt sınır değeri
c^T	:	Maliyet fonksiyonu katsayısı
P_d^{min}	:	Dizel generatörün minimum işletme gücü
P_d^{max}	:	Dizel generatörün maksimum işletme gücü
ΔT	:	Örnekleme zamanı
α	:	ECMS için lineer ceza katsayısı
μ	:	ECMS için denge katsayısı
B	:	Örüntü arama algoritması için temel matris
C_k	:	Örüntü arama algoritması için üretim matrisi

x_k	:	Örüntü arama algoritması için deneme adımı
s_k^i	:	Örüntü arama algoritması için deneme adımı uzunluğu
μ_m	:	Bulanıklık derecesi
V_{in}	:	Dönüştürücü giriş gerilimi
V_{out}	:	Dönüştürücü çıkış gerilimi
I_L	:	İndüktör akımı
ΔI_L	:	İndüktör dalgalanma akımı
ΔV_{in}	:	Giriş gerilimindeki dalgalanma miktarı
D	:	Görev oranı
A_L	:	Ferrit çekirdeğin indüktans faktörü
I_e	:	Ferrit çekirdeğin manyetik yol uzunluğu
A_e	:	Ferrit çekirdeğin etkin manyetik kesiti
V_e	:	Ferrit çekirdeğin etkin manyetik hacmi
P_{out}	:	Dönüştürücü çıkış gücü
f_s	:	Anahtarlama frekansı
f_{line}	:	Dağıtık üretim biriminin çalışma frekansı
C_{in}	:	Dönüştürücü giriş kapasitörü
L_1	:	Dönüştürücü indüktörü
C_{out}	:	Dönüştürücü çıkış kapasitörü
P_{D1}	:	Köprü diyot güç kaybı
V_f	:	Diyot ileri yön gerilimi
V_{ds}	:	Anahtarın drain-source gerilimi
I_{ds}	:	Anahtarın drain-source akımı
$R_{ds(on)}$	:	Anahtarın iletim durumundaki iç direnci
C_{rss}	:	Anahtarın gate-drain kapasite değeri
C_{iss}	:	Anahtarın giriş kapasite değeri
Q_g	:	Anahtarın toplam gate şarj değeri
E_{oss}	:	Çıkış kapasitansını şarj etmek için gereken enerji miktarı
V_{th}	:	Anahtarlama elemanının eşik gerilimi
V_{pl}	:	Anahtarlama elemanının gate plato gerilimi
$P_{s(cond)}$	:	Anahtarlama elemanının dinamik güç kaybı
$P_{s(on)}$	:	Anahtarlama elemanının iletim süresindeki güç kaybı
$P_{s(off)}$	:	Anahtarlama elemanının kesim süresindeki güç kaybı
$P_{s(gate)}$	:	Anahtarlama elemanının gate sürme güç kaybı
$P_{s(oss)}$	:	Anahtarlama elemanının çıkış kapasite güç kaybı
P_S	:	Anahtarlama elemanının toplam güç kaybı
P_{D2}	:	Yükselten dönüştürücü diyeti güç kaybı
P_{core}	:	İndüktörün çekirdek güç kaybı
P_{copper}	:	İndüktörün bakır güç kaybı
P_L	:	İndüktörün toplam güç kaybı
η	:	Dönüştürücü verimi
P_{loss}	:	Dönüştürücünün toplam güç kaybı
G_{PWM}	:	Darbe genişlik modülatörü transfer fonksiyonu
f_{PWM}	:	Darbe genişlik modülasyon sinyalinin karakteristik frekansı
G_{EA}	:	Gerilim hata yükselteci transfer fonksiyonu
G_{FB}	:	Gerilim geri besleme devresi transfer fonksiyonu
G_{VL}	:	Kontrolörün kapalı çevrim transfer fonksiyonu

KISALTMALAR LİSTESİ

YEK	:	Yenilenebilir enerji kaynağı
FV	:	Fotovoltaik
RT	:	Rüzgâr türbini
EDS	:	Enerji depolama sistemi
DEK	:	Dağıtık enerji kaynağı
DG	:	Dizel generatör
AC	:	Alternatif akım
DC	:	Doğru akım
EYS	:	Enerji yönetim sistemi
PI	:	Oransal integral
DP	:	Doğrusal programlama
PSO	:	Parçacık sürü optimizasyonu
GA	:	Genetik algoritma
MF	:	Üyelik fonksiyonu
BMK	:	Bulanık mantık kontrolör
YP	:	Yakıt pili
MPPT	:	Maksimum güç noktası takibi
ECMS	:	Enerji tüketim minimizasyon stratejisi
UC	:	Ultra kapasitör
DMKS	:	Durum makine kontrol stratejisi
MPC	:	Model öngörülü kontrol
SOC	:	Şarj durumu
PS	:	Örüntü arama algoritması
PCC	:	Ortak bağlantı noktası
YK	:	Yerel kontrolör
DMSG	:	Daimî mıknatıslı senkron generatör
P&O	:	Değiştir ve gözlemlerle algoritması
D	:	Düşük
O	:	Orta
Y	:	Yüksek
ÇY	:	Çok yüksek
PFC	:	Güç faktörü düzeltme
MOSFET	:	Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör
ARM	:	Acorn RISC Mimarisi
CANBus	:	Denetleyici alan ağı veri yolu
UART	:	Evrensel asenkron alıcı verici
EMG	:	Elektromanyetik girişim
PWM	:	Darbe genişlik modülasyonu
ESR	:	Eşdeğer seri direnç
DCR	:	Doğru akım direnci
I²C	:	Ara birimli tüm devre
PID	:	Oransal integral türev
PD	:	Oransal türev
THD	:	Toplam harmonik bozunum
PF	:	Güç faktörü
PFC	:	Güç faktörü düzeltmesi

ÖNSÖZ

Tez çalışmamı tamamlamama ve akademik hayatımda bu noktaya gelmeme büyük destek olan sevgili eşim ve kızıma sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Sizlerle her zorluğun üstesinden gelmek daha kolay ve anlamlı oldu. Sizlerin desteği, sabrı ve anlayışı olmadan bu çalışmayı tamamlamam mümkün olmazdı. Sizlerin varlığı benim için her şeyden önce gelir ve hayatımdaki en büyük motivasyon kaynağım olduğunuzu bilmenizi isterim.

Bu tez çalışmasının tamamlanmasında, yönlendirmeleri ve destekleriyle beni her zaman cesaretlendiren, bu yolda benimle birlikte emek harcayan, bilgeliği ve tecrübesiyle yol gösteren ve kendisinden öğrendiğim tecrübeleri hayatımın ilerleyen dönemlerinde de kullanacağıma inandığım değerli danışman hocam Doç. Dr. Selim KÖROĞLU'na şükranlarımı sunarım. Tez çalışmam süresince her zaman yanımda olan, desteğiyle beni ileriye taşıyan, gösterdiği özen ve ilgiyle akademik hayatımda öncü olan değerli hocam Prof. Dr. Yüksel OĞUZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesinde yer alan ve tez çalışmam boyunca yaptığım sunumlar sırasında bana verimli geri bildirimlerde bulunan, kıymetli görüşleri ve deneyimleriyle tezimdaki araştırmalarımı geliştirmeme yardımcı olan değerli hocalarım Doç. Dr. Selami KESLER ve Doç. Dr. Ahmet YÖNETKEN'e en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım. Çalışmalarında bana değerli fikirleriyle yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Akif DEMİRÇALI ve Öğr. Gör. Arda KILIÇ'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımın her aşamasında yanımda olan ve bu zorlu süreçte başarılı olmanın gururunu yaşattığı sevgili aileme ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen dostlarıma minnettarım.

1. GİRİŞ

Geleneksel elektrik güç sistemleri, enerji üretimi, iletimi ve dağıtımını olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır. Enerji üretim santralleri, iletim hatları vasıtasıyla dağıtım sistemine bağlanarak tüketicilerin elektrik enerji ihtiyacını karşılamaktadır. Geleneksel güç sistemleri enterkonnekte şebeke yapısına sahip olup tüm üretim, iletim ve dağıtım sistemleri bir ağ üzerinden birbirleriyle bağlantılıdır.

Küresel nüfus artışı, dijitalleşme ve sanayi devrimi, büyüyen elektrik talebinin temel nedenleridir. Küresel elektrik arzı, 2020'de 27 PWh/yıl seviyesinden 2050'ye gelindiğinde 62 PWh/yıl seviyesine çıkması öngörülmektedir (Eriksen 2022). Bu durum elektrik üretiminde yıllık ortalama %2,7'lik bir büyümeyi göstermektedir. Günümüzde, küresel ölçekte %35'lik bir oran ile en büyük elektrik üretim payı kömür yakıtlı güç santrallerine aittir. Bu oran, kömür yakıtlı elektrik santrallerinin finansman baskısı ve yenilenebilir elektrik üretiminin maliyetlerinin düşmesi nedeniyle 2050'de %4'e kadar azalacağı tahmin edilir. Gaz yakıtlı güç santralleri günümüzde dünyanın ikinci büyük elektrik üreticisi rolündedir ve %24'lük bir paya sahiptir. Ancak, 2030'dan itibaren bu payın istikrarlı bir şekilde azalarak 2050 yılına gelindiğinde %8'e kadar düşmesi beklenmektedir.

Dünya çapında tüketilen enerjinin önemli bir bölümü fosil yakıtlara dayalı elektrik santrallerinden elde edilmektedir. Ancak bu durum, sera gazı emisyonlarına bağlı küresel iklim değişikliği, fosil yakıt kaynaklarının tükenmesi, petrol ve gaz fiyatlarındaki dalgalanmalar gibi çevresel, sosyal ve ekonomik riskleri beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, dünya genelinde sürdürülebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarına doğru bir dönüşüm gereklidir. Rüzgâr, güneş, biokütle, jeotermal ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) fosil yakıtlara dayalı enerji üretimine karşı alternatif olarak gösterilmektedir. Son yıllarda YEK'e olan talebin artması, temiz enerjinin üretimi ve bu üretim birimlerinin çevreye olan olumlu etkileri sayesinde 2050 yılına kadar elektrikten üretilen karbon emisyonlarında %90 oranında azalması beklenmektedir (International Renewable Energy Agency 2017). Geleneksel enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin sürdürülebilirliği, hızla tükenen rezervlerin

ve giderek artan maliyetler ek olarak büyük bir endişe kaynağıdır. Bu nedenle, dünya çapında çoğu ülke YEK'lerin kullanımını yaygınlaştırmayı hedeflemektedir.

Günümüzde YEK'lerin bir araya gelmesiyle oluşan modern şebeke yapıları üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen mikroşebeke konsepti, fotovoltaik (FV) paneller, rüzgâr türbini (RT), geleneksel generatörler ve enerji depolama sistemlerini (EDS) içeren dağıtık enerji kaynaklarından (DEK) oluşan küçük ölçekli bir güç sistemi olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemler, küçük ölçekte elektrik enerjisi üretimi ve tüketimi sağlayan, yerel olarak yönetilen, çevre dostu ve sürdürülebilir yapılardır. Hem ana şebekeye bağlı hem de şebekeden bağımsız olarak çalışabilme yeteneğine sahip mikroşebekelerin, hava ve ortam şartlarına bağlı olarak kesikli enerji üretiminin olumsuz etkilerini gidermede verimli oldukları kanıtlanmıştır (Aguera-Perez ve diğ. 2018). Mikroşebekeler, özellikle YEK'lerin kullanımının artmasıyla birlikte daha fazla önem kazanmışlardır. Bu sistemler, YEK'lerin yerel ölçekte kullanımını kolaylaştırmakta, enerji verimliliğini arttırarak enerji maliyetlerini düşürmektedir. Benzer şekilde bu yapılar enerji arzı ve talebi arasındaki dengesizlikleri azaltarak, enerji güvenliğini arttırmaktadır (Aghdam ve diğ. 2020).

1.1 Literatür Özeti

Mikroşebeke konsepti, özellikle yetersiz şebeke altyapısına ve/veya ana şebekesi kesikli bir güce sahip, enerji talebini sağlamak için dizel generatöre (DG) bağımlı olan bölgeler için umut vericidir. Güç talebinde yetersiz altyapıya sahip olan Orta Doğu, Afrika ve Hindistan'da bu tür yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır (Hijjo ve diğ. 2017). Böylelikle, YEK kullanımının uzun vadede geleneksel yöntemlere iyi bir alternatif olması beklenir. Ayrıca DG'lerin YEK'e olan katkısı, kesinti durumunda sadece dizel yakıtı bağlı sistemlere kıyasla önemli ölçüde maliyeti iyileştirir (Kusakana 2015). Öyle ki, bu tür hibrit sistemlerde optimizasyon algoritmalarının işletilmesi verimliliği arttıracaktır. Şebekeden bağımsız olarak kullanılan hibrit konfigürasyonda DG, yük talebinin yüksek olması durumunda diğer DEK'lerden karşılanamayan enerji açığını dengelemek için kullanılır.

Mikroşebekeler, dağıtık üretim sistemleri ve farklı yüklerin bir arada bulunması nedeniyle aktif dağıtım şebekeleri olarak tanımlanır. Generatörler veya

mikrokaynaklar, mikroşebekelerde genellikle dağıtım geriliminde güç üretmek için geleneksel olmayan yenilenebilir DEK'lerin entegrasyonu olarak birlikte çalışırlar. Operasyonel açıdan bakıldığında ise mikrokaynakların koordinasyonlu bir şekilde çalışması, güç kalitesinin korunması ve enerji üretiminin tutarlılığı için, mikroşebekenin güç elektroniği arayüzleri ve kontrolcülerıyla donatılmış olması gerekir (Kabalcı ve diğ. 2021).

Mikroşebeke entegrasyonu, AC, DC veya her ikisinin karması kullanılarak gerçekleştirilebilir (Ortiz ve diğ. 2020; Pourbehzadi ve diğ. 2019). DC mikroşebekeler, senkronizasyon gereksinimlerinin olmaması, DC'deki kablo direnç kayıplarının AC'ye göre daha az olması, daha az AC-DC-AC dönüşümü nedeniyle genel verimliliğin yüksek olması, reaktif güç kayıplarının olmaması gibi AC mikroşebekelerde yaygın olan güç kalitesi sorunlarından etkilenmezler (Mosa ve Ali 2021; Tabatabaei ve diğ. 2018). Bu durum önemli ölçüde daha az karmaşık bir kontrol sistemi ile sonuçlanır. Ayrıca DC mikroşebekeler yüksek güvenilirlik ve verimlilik avantajına sahiptir. Çeşitli DEK ve EDS'lerin entegrasyonuna imkan sağlar (Shuai ve diğ. 2018). Günümüzde DC mikroşebeke, hibrit ulaşım araçları, bina ve iletişim istasyonları gibi birçok küçük ölçekli güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Han ve diğ. 2019b).

Mikroşebekeler, enerji üretimindeki çeşitliliği yanında enerji tüketimindeki verimliliği de artırarak düşük karbon salınımına katkıda bulunur. Bu sistemlerde, enerji yönetimi, enerji arzının talebe göre ayarlanması, enerjinin verimli bir şekilde kullanılması ve güç kalitesinin korunması gibi önemli konular ele alınır. Bu nedenle, mikroşebekelerde etkili bir enerji yönetimi, sistemin güvenilirliği, sürdürülebilirliği ve ekonomikliği açısından son derece önemlidir.

Enerji yönetim sistemleri (EYS), mikroşebekenin ekonomik, sürdürülebilir ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamak için sistem kısıtlamalarını karşılarken hem arz hem de talep tarafı yönetimini kapsar (Hatziaargyriou 2014). Bir EYS, YEK'lerden maksimum kullanılabilir gücün elde edilmesi (Laxman ve diğ. 2021), DEK'ler tarafından üretilen güç miktarına karar verilmesi (Lenhart ve Araújo 2021), EDS'de batarya gruplarının şarj/deşarj işlemleri için en uygun stratejinin belirlenmesi (Choi ve diğ. 2018; Sinha ve Bajpai 2020), işletme maliyetlerini en aza indirerek mümkün olan en yüksek ekonomik ve çevresel faydanın sağlanması (Arefifar ve diğ. 2016; El-

Bidairi ve diğ. 2020) gibi çeşitli işlevleri yerine getirir. Mikroşebekelerde DEK'ler arasındaki koordinasyonun sağlanması amacıyla çeşitli çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir. Literatürde gerilim, akım ve frekans restorasyonunun sağlanmasında kolay uygulanabilir algoritma ve kontrolcüler için deterministik yöntemler ön plana çıkmaktadır. PID kontrolör ve model öngörülü kontrol (MPC) en yaygın kullanılan deterministik yaklaşımlar arasındadır (Dong ve diğ. 2021; Suresh ve diğ. 2021). Benzer şekilde, kural tabanlı metotlara dayanan yaklaşımlarda karar vericiler, herhangi bir gelecek verisi gerektirmedikinden gerçek zamanlı uygulamalar için avantaj sağlar (Bukar ve diğ. 2020; Peng ve diğ. 2020). Yapılan bir çalışmada, mikroşebekeyi mümkün olan en düşük işletme maliyetiyle çalıştırmak için karma mod EYS önerilmiştir. Güç paylaşım modu, sürekli çalışma modu ve açık/kapalı modu olarak hazırlanan işletme stratejileri için amaç fonksiyonu, doğrusal programlama (DP) ve karma tamsayı doğrusal programlama optimizasyon yöntemleri kullanılarak ekonomik dağıtım sorununun çözülmesi amacıyla kullanılmıştır. Böylece, karma mod stratejisi altında çalışan mikroşebeke için optimal batarya boyutunun belirlenmesi parçacık sürü optimizasyon (PSO) tekniği kullanılarak çözülmüştür. Bu problemi çözerken batarya maliyeti, enerji ve güç kısıtlamaları ve kaynakların işletme limitleri dikkate alınmıştır (Sukumar ve diğ. 2017). Yapılan bir diğer çalışmada, FV, DG ve bataryadan oluşan hibrit mikroşebekenin sürekli mod ve açık/kapalı mod olarak işletilmesini sağlayan bir kontrol stratejisi önerilmiştir. Mikroşebekenin işletme maliyetini en aza indirmek amacıyla sürekli çalışma modunda doğrusal olmayan programlama ve açık/kapalı modunda ise karma tamsayı doğrusal programlama yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma, değişken yük talebi, kesikli güneş enerjisi ve doğrusal olmayan dizel yakıt tüketim eğrisi gibi faktörleri ele almıştır. Buna göre DG'nin sürekli işletme kontrol stratejisi altında FV, DG ve EDS hibrit sisteminin önemli bir işletme maliyeti tasarrufu sağlayabileceğini göstermektedir (Kusakana 2015).

Günümüzde araştırmacılar, mikroşebekelerin boyutlandırılması ve talep yükün optimum çalışma koşulları altında karşılanabilmesi amacıyla doğrusal ve doğrusal olmayan optimizasyon tekniklerinin yanı sıra genetik algoritma (GA) ve PSO gibi meta-sezgisel yaklaşımlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılan bir çalışmada, YEK ve EDS ile oluşturulmuş mikroşebeke modelinde, enerji ticaretinden elde edilen kazancı en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan bir EYS önerilmiştir. Üyelik fonksiyonları (MF) ve bulanık kural ağırlıkları gibi bulanık mantık kontrolör (BMK) parametreleri

GA tarafından optimize edilmiştir. Optimizasyon, FV, RT ve EDS gibi mikroşebeke kaynaklarının koordinasyonunu sağlamak amacıyla kullanılmıştır. GA, BMK'nın doğruluğunu ve performansını artırmada etkili olduğunu göstermiştir. Optimum çözümlerin uygulanmasıyla, mikroşebeke sistem verimliliğinin arttırılabileceği sonucuna varılmıştır (De Santis ve diğ. 2017).

Mikroşebekedeki belirsizliklerle başa çıkmanın bir diğer yöntemi, bozucu etkilere karşı uyum sağlayabilen yapay zekâ yaklaşımlarıdır. Olası gelecek senaryoların geçmiş deneyimlere göre güncellenebilir olması bu yöntemleri güçlü kılar (Liu ve diğ. 2018). Mikroşebekede yürütülen EYS'nin karşılaştığı zorlukların başında YEK'in enerji üretimindeki belirsizlikleri gelir. Böylelikle stokastik optimizasyona dayalı algoritmalar, bu belirsizlikleri kontrol modeline dâhil ederek daha verimli bir kontrol stratejisi oluşturur (Hasankhani ve Hakimi 2021). Gürbüz (robust) kontrol yaklaşımı, stokastik yaklaşımlardan farklı olarak belirlenen senaryoların dışında beklenmedik bir durumla karşılaşıldığında olası senaryolar yerine genellikle en kötü durumu ele alır (Han ve diğ. 2019a).

Hibrit elektrikli araçlarda sıkça kullanılan bir yöntem olan eşdeğer tüketim minimizasyon stratejisi (ECMS), eşdeğer yakıt tüketimini en aza indirmeyi hedefler. Bu yöntem, fosil yakıtların ve batarya enerjisinin eşdeğer maliyetini dikkate alarak çalışan bir algoritmadır. ECMS yaklaşımında, kontrol algoritmasının optimizasyonu için eşdeğer faktör parametresi belirlenir. Bu parametre, yakıt tüketimini en aza indirmek için kullanılır. Bu stratejiyi mikroşebeke yapılarına uyarlayan bir çalışmada, FV-yakıt pili (YP) ve bataryadan oluşan çok kaynaklı hibrit DC mikroşebekenin güç dengesi ve sistem kararlılığını sağlamak amacıyla iki seviyeli bir EYS önerilmiştir. Dönüştürücü kontrol seviyesinde maksimum güç noktası takibi (MPPT) ve eğim çift mod kontrol yöntemi, sistem kontrol seviyesinde ise mikroşebekenin net gücünü batarya paketi ve YP arasında dağıtmak için ECMS kullanılmıştır (Han ve diğ. 2019b). Bu strateji FV, YP ve EDS olmak üzere enerji talebinin karşılanması için üç farklı enerji kaynağının koordinasyonunu içerir. Bu araştırmanın sonuçlarına göre, önerilen iki seviyeli strateji, kaynaklar arasındaki enerji paylaşımını optimize ederek mikroşebeke sisteminin güvenilirliğini ve verimliliğini artırmaktadır. Önerilen strateji, sistemdeki güç dalgalanmalarını azaltmış ve enerji kalitesini iyileştirmiştir. Benzer bir çalışmada, YP-ultra kapasitör (UC) ve bataryadan oluşan hibrit uçak sistemin enerji

talebini, değişken yük koşulları altında optimum bir şekilde yönetmek amacıyla salp sürü algoritması ve maden patlatma optimizasyonuna dayalı bir strateji önerilmektedir. Bu stratejiler BMK, oransal integral (PI) kontrol, durum makinesi kontrol stratejisi (DMKS), eşdeğer yakıt tüketimi minimizasyonu ve maksimizasyonu, harici enerji maksimizasyonu ve eşdeğer tüketim minimizasyonu gibi yaygın olarak kullanılan stratejilerle karşılaştırılmıştır. Performans kriterleri olarak hidrojen yakıt maliyeti ve genel verimlilik parametreleri kullanılmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde salp sürü algoritması, hidrojen yakıt ekonomisi ve genel verimlilik açısından diğer stratejilere göre daha iyi bir performans göstermiştir. En az tüketilen hidrojen miktarı 19,4 gram ve maksimum verimlilik %85,61 olarak elde edilmiştir (Rezk ve diğ. 2021).

Son zamanlarda, DC mikroşebekelerin işletme kontrolü üzerine yapılan araştırmalar, birçok araştırmacının odak noktası haline gelmiştir. Bu kapsamda yapılan araştırmalarda dağıtık/merkezi otonom kontrol (Ortiz ve diğ. 2020), master/slave kontrol (Yang ve diğ. 2018), çoklu-ajan kontrol (Hamad ve El-Saadany 2016) gibi dönüştürücülere uygulanan farklı operasyonel kontrol yöntemleri önerilmiştir. Bu yöntemler arasından dağıtılmış otonom kontrolün iletişime olan ihtiyaının daha az olması, otonom kabiliyetinin daha yüksek olması, tak-alıştır yapıya daha uygun olması ve daha esnek kontrol konfigürasyonu gibi avantajlara sahiptir. Bu nedenle DC mikroşebekelerdeki dönüştürücüler için birincil kontrol yapısına en uygun yöntem olduğu sonucuna varılabilir (Nabi ve Seyedtabaii 2020).

Hiyerarşik mimarinin kademeli yapısı, birden fazla değişkenin bağımsız olarak işletilmesine izin verdiği için mikroşebekelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel olarak hiyerarşik kontrol mimarisi birincil, ikincil ve üçüncül kontrol seviyeleri olmak üzere üç kontrol seviyesine sahiptir (Yamashita ve diğ. 2020). Bu kontrol seviyelerinin kullanıldığı bir çalışmada, mikroşebekenin bara gerilimi ve akımı gerçek zamanlı kontrol edilmiştir. Değişken alışma koşulları altında sistemin optimum işletilmesi için hiyerarşik kontrol mimarisi tasarlanmıştır. Birincil kontrol seviyesinde i akım ve gerilim kontrol döngüleri için gerilim referansı sağlanmıştır. İkincil kontrol seviyesi ise akım veya gerilim salınımlarını restore etmek için kullanılmıştır (Babaiahgari ve diğ. 2019). Benzer bir çalışmada, birincil ve ikincil kontrol seviyelerinde elde edilen aktif güç referansını üçüncül kontrol seviyesinde optimize ederek DEK'lerin toplam üretim maliyetinin en aza indirilmesi hedeflenmiştir (Lu ve diğ. 2021). Bir diğer

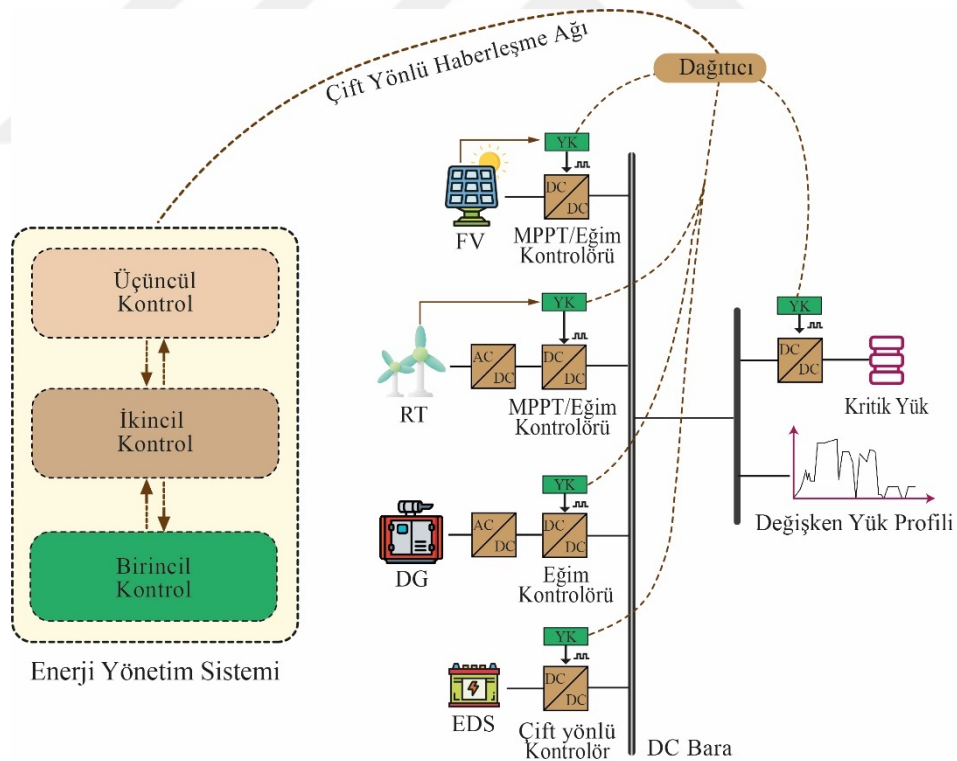
çalışmada, adalanmış AC mikroşebekede dağıtılmış hiyerarşik kontrol stratejisi önerilmiştir. Dağıtık uzlaşma temelli kaskat kontrolü, geleneksel ikincil ve üçüncül kontrol seviyelerini tek bir kontrol seviyesinde birleştirerek otomatik üretim ve gerilim kontrolünde kullanılmıştır (Li ve diğ. 2017).

Bazı araştırmacılar ikincil ve üçüncül kontrol seviyelerini tek bir kontrol seviyesi altında birleştirerek mikroşebekenin, DEK'ler arasındaki güç paylaşımı ve optimizasyon algoritmalarının kullanılmasıyla ekonomik işletilmesi üzerine çalışmalar yürütmüştür. YEK ve EDS'nin güç dağıtımı ele alındığında enerji verimini en üst düzeye çıkartan, güç şebekesine enerji satışı ve satın alımını yöneterek ekonomik optimizasyonu gerçekleştiren MPC güncel konular arasındadır. Bu strateji, kontrol kararlarını gelecekteki sistem davranışı da göz önünde bulundurduğundan dolayı daha iyi performans sağlar. Ayrıca bu kontrol, sistem davranışında meydana gelebilecek değişimleri önceden tahmin etmek ve buna göre kontrol kararları almak için kullanılabilir. Yapılan bir çalışmada, güç kalitesi ve dengesiz güç paylaşımı sorunlarının üstesinden gelmek için adalanmış AC mikroşebekede birincil ve ikincil kontrol seviyesine sahip merkezi olmayan MPC tabanlı hiyerarşik kontrol yöntemi ele alınmıştır. Birincil kontrol seviyesinde eğim kontrol yöntemi kullanılmış ve ikincil seviyede ise durum uzay öngörücüye dayalı kontrol yöntemi önerilmiştir (Jayachandran ve Ravi 2019).

1.2 Tezin Amacı

Mikroşebeke birden fazla DEK'in bulunduğu küçük ölçekli yerel güç sistemi olarak değerlendirilebilir. Mikroşebekenin DEK'ler arasında optimum güç paylaşımı, yüksek verimli enerji üretimi ve karbon salınımlarının azaltılmasını hedefleyen bir EYS'ye sahip olması gerekir. Ancak mikroşebekeyi oluşturan enerji kaynakları ve yükler arasındaki dengenin korunması ve enerji yönetiminin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi zordur. Mikroşebekelerde enerji yönetimi, farklı enerji kaynaklarının bir arada kullanılmasıyla oluşan karmaşık yapı, meteorolojik faktörlere bağlı olarak üretilen enerjinin kesikli olması, bu kesikli enerjinin neden olduğu güç dalgalanmaları, veri yönetimi ve iletişim sorunları, güç paylaşımı ve enerji optimizasyonu için çeşitli güç elektroniği ekipmanlarına ve kontrol devrelerine ihtiyaç

duyulması gibi zorluklarla karışılmaktadır. Ancak bu zorlukların etkin bir enerji yönetim sistemi ile aşılması mümkündür.



Şekil 1.1: Önerilen DC mikroşebeke güç sistemi ve hiyerarsik kontrol yapısı.

birimlerini içeren ve ada modunda işletilen bir şebekedir. Farklı kaynakları içeren bu DC mikroşebekenin optimum koşullarda çalışmasını sağlamak için kontrol stratejilerine ihtiyaç vardır. Amaçlanan bu optimum koşullar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Mikroşebekenin optimum boyutlandırması, en yüksek güvenilirlik ve en düşük emisyon ile çalışma koşullarının optimizasyonunu sağlayarak minimum maliyeti elde etmek,
- Ada modlu mikroşebekede, yakıt maliyeti ve emisyonun optimizasyonu hedeflenerek optimum güç paylaşımını gerçekleştirmek,
- Enerji üretimi ve tüketimi gibi değişkenlerin anlık olarak takip edilmesini ve yönetilmesini sağlayan gerçek zamanlı bir EYS tasarlayarak şebeke kararlılığı ve güvenilirliğini sağlamaktır.

1.3 Tezin Literatüre Katkısı ve Organizasyonu

FV, RT, DG ve EDS kaynaklarından beslenen adalanmış hibrit DC mikroşebeke için hiyerarşik üç seviyeli kontrol mimarisine sahip bir EYS önerilmiştir. DEK'lerin etkin, esnek ve güvenli bir şekilde yönetilebilmesi amacıyla sistemde dağıtık otonom kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Hiyerarşik kontrol sisteminde birincil kontrol seviyesi, DEK'ler arasında güç akışını düzenler. İkincil kontrol seviyesi, gerilim ve akım restorasyonunu gerçekleştirir. Üçüncül kontrol seviyesinde ise sistemin dinamik optimizasyonu gerçekleştirilir.

Mikroşebeke sistemi devreye alındığında ilk olarak EDS'nin şarj durumu (SOC) seviyesi değerlendirilir. EDS'nin SOC seviyesi güvenli çalışma aralığında ve talep edilen güç YEK'ler tarafından karşılanabilecek durumda ise YEK'ler MPPT modunda işletilir. Eğer EDS'nin SOC seviyesi kritik seviyenin altına düşerse gerekli yük talebini karşılayabilmek için DG devreye alınır. DG ve EDS arasında yakıt minimizasyonu ECMS tarafından sağlanmaktadır. ECMS'nin optimizasyonunda DP, GA ve örüntü arama (PS) algoritmaları kullanılır. EDS'nin SOC seviyesi eşik değerin üzerine çıktığında DG'ye ihtiyaç duyulmayıp DEK'ler arasındaki optimum yük paylaşımı BMK ve DMKS kullanılarak gerçekleştirilir. Böylelikle tak-çalıştır esnekliğine sahip otonom bir DC mikroşebeke yapısı önerilmiştir.

Bu tezin ana katkıları şu şekilde özetlenebilir:

(1) FV, RT, DG ve EDS kaynaklarından beslenen adalanmış hibrit DC mikroşebeke sistemi için EDS'nin SOC seviyesine bağlı olarak uygun mod seçimi yapabilen ve modlar arasında otonom geçiş sağlayan yeni bir ECMS tabanlı EYS önerilmiştir (Kaysal ve diğ. 2022a).

(2) Önerilen hiyerarşik EYS'nin üretim sistemi verimliliğini artıran üçüncül kontrol seviyesinde eğim kontrol katsayılarının güncellenmesinde min-max ölçeklendirme kullanılarak akım paylaşım oranları normalize edilmiştir. Böylelikle kaynaklar arasında akım paylaşım oranlarının belirlenmesi daha etkili bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

(3) DEK'ler arasında yük paylaşımının kararlı bir şekilde yapılabilmesi için eğim kontrol katsayıları optimizasyon algoritmaları tarafından güncellenebilmektedir. Ayrıca DG ve EDS arasındaki güç akışı kontrolünde önerilen ECMS ile dizel yakıt minimizasyonu sağlanarak sistemin genel verimi arttırılmıştır.

(4) Önerilen hiyerarşik EYS'nin işletildiği mikroşebeke, ana şebekenin olmadığı kırsal bölgelerde DC bara gerilim kararlılığını ve güç dengesini koruyarak otonom mod geçişleri ile kendi kendine yetebilecek şekilde tasarlanmıştır.

(5) Mikroşebekelerde uygulanabilen bir hiyerarşik EYS tasarımı için, BMK ve DMKS gibi kontrolörlere ek olarak ECMS tabanlı DP, GA ve PS optimizasyon algoritmalarına dayalı hiyerarşik EYS benzetimleri gerçekleştirilmiş ve ayrıntılarıyla sunulmuştur.

(6) Mikroşebekelerde kullanılacak olan EYS tasarımlarının uygulanabilmesi için, yüksek verimli bir DC-DC dönüştürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kontrol devreleriyle donatılmış dönüştürücü DEK'lerin DC baraya bağlantısında ara yüz olarak kullanılmıştır. Tasarlanan yükselten dönüştürücünün tüm tasarım ve test sonuçları detaylı bir şekilde verilmiştir (Kaysal ve diğ. 2023a).

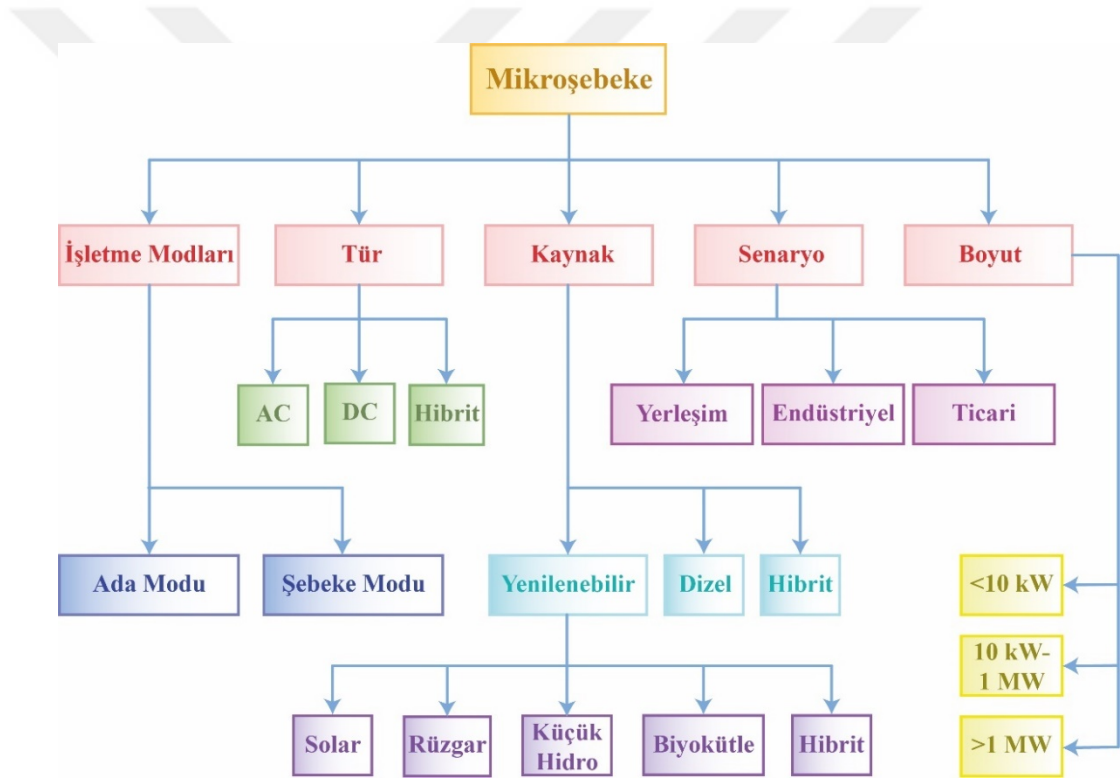
Bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. İlk olarak, DC mikroşebeke bileşenlerinin tanımı Bölüm 2'de sunulmaktadır. Ardından, önerilen DC mikroşebeke bileşenlerinin modeli ve hiyerarşik kontrol yapısı Bölüm 3'te verilmiştir. ECMS

tabanlı hiyerarşik EYS'ye ait eğim kontrol yöntemi, EYS'nin işletilmesini sağlayan kontrol stratejileri, optimizasyon algoritmaları ve benzetim çalışmaları Bölüm 4'te incelenmiştir. DC mikroşebekenin gerçek zamanlı uygulaması ve deneysel çalışmaları Bölüm 5'te gerçekleştirilmiştir. Son olarak, sonuçlar ve öneriler Bölüm 6'da sunulmuştur.



2. MİKROŞEBEKE

Son yıllarda, geleneksel merkezi üretim sistemleri yerine dağıtık üretim uygulamalarının sayısı her geçen gün artmaktadır. Dağıtık üretim, kullanıcı tarafında yerleşik olarak çalışan herhangi bir küçük ölçekli güç sistemini ifade etmektedir (Singh ve diğ. 2017). Mikroşebekeler, yenilenebilir FV, RT ve küçük ölçekli hidroelektrik türbin gibi kaynakları içermesi yanında ihtiyaç olması halinde dizel türbinler gibi yenilenebilir olmayan generatörleri de içermektedir (Zia ve diğ. 2018). Mikroşebeke yapıları, dağıtık üretimin sunduğu avantajlardan yararlanmak için bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır. Mikroşebekelerin tipik sınıflandırılması Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1: Mikroşebekenin sınıflandırılması.

Mikroşebeke yapısı, beş temel kategoriye ayrılarak incelenmektedir. Bu kategoriler işletme modları, tür, kaynak, senaryo ve boyut olarak adlandırılmaktadır. İşletme modları, ada ve şebeke bağlantılı olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Yenilenebilir, dizel ve hibrit DEK birimleri ise kaynak kategorisinde sınıflandırılmaktadır. Mikroşebekeler, tür bakımından AC, DC ve her iki bağlantı türünü içeren hibrit yapılar şeklinde çeşitlilik göstermektedir. Ayrıca mikroşebekeler, senaryo ve boyut bakımından da kategorize edilmektedir.

2.1 Mikroşebekenin Tanımı

Mikroşebeke, gelişmiş otomasyon ve bilgi teknolojileri entegrasyonu ile oluşan bir elektrik ve iletişim altyapısı olarak tariflenen küçük ölçekli bir şebekedir. Bu altyapı, elektrik şirketleri, politikacılar, tüketiciler ve diğer endüstriyel katılımcıların elektrik tedarikinde ve ilgili hizmetlerdeki köklü değişimleri tanımlamaktadır. Dünya genelinde araştırma kuruluşları tarafından hazırlanan çeşitli raporlarda birçok mikroşebeke tanımı bulunmaktadır. Mikroşebekelere ilişkin bazı tanımlar aşağıdaki gibi verilmiştir.

ABD Enerji Bakanlığı raporunda, mikroşebekeler için şu tanımı sunmuştur (US Energy Office 2003):

"Mikroşebeke, DEK ve yerel yüklerin entegrasyonunu sağlayan yerel bir enerji şebekesidir. Mikroşebekeler, şebekeye paralel veya ada modda çalışarak, elektrik şebekesindeki bozuculara karşı yüksek bir güvenilirlik ve dayanıklılık düzeyi sağlamak üzere özelleştirilmiş yapılardır. Bu gelişmiş entegre dağıtım sistemi, elektrik tedarik kısıtlarının olduğu yerlerde, uzak bölgelerde ve kritik yüklerin korunması ve ekonomik olarak kalkınmanın gerektiği yerlerde kullanım ihtiyacını karşılamaktadır."

Ayrıca Avrupa Birliği tarafından fonlanan ENK5-CT-2002-00610 nolu projedeki tanıma göre (Hatziargyriou ve diğ. 2004):

"Mikroşebekeler, volanlar, enerji kapasitörleri ve bataryalar gibi depolama sistemleri ve esnek yüklerle birlikte mikro türbinler, yakıt hücreleri, FV gibi DEK'lere sahip alçak gerilim dağıtım sistemlerini içermektedir. Bu tür sistemler şebekeye bağlıysa ada modda, ana şebekeden ayrılmış ise otonom olarak çalıştırılabilir. Şebekedeki mikrokaynakların çalışması, verimli bir şekilde yönetilir ve koordine edilirse genel sistem performansına fayda sağlayabilir."

Bu tanımlardan anlaşıldığı üzere, bir mikroşebeke şu özellikleri içerir:

- Mikroşebeke, yerel bir dağıtım şebekesinde bulunan mikrokaynakların, depolama birimlerinin ve kontrol edilebilir yüklerin entegrasyonunu sağlar.

- Mikroşebeke, şebekeye bağlı olarak çalışabileceği gibi adalanmış modda da işletilebilir.
- Mikroşebeke, kaynaklar arasında enerji yönetimi ve koordinasyon sağlar.

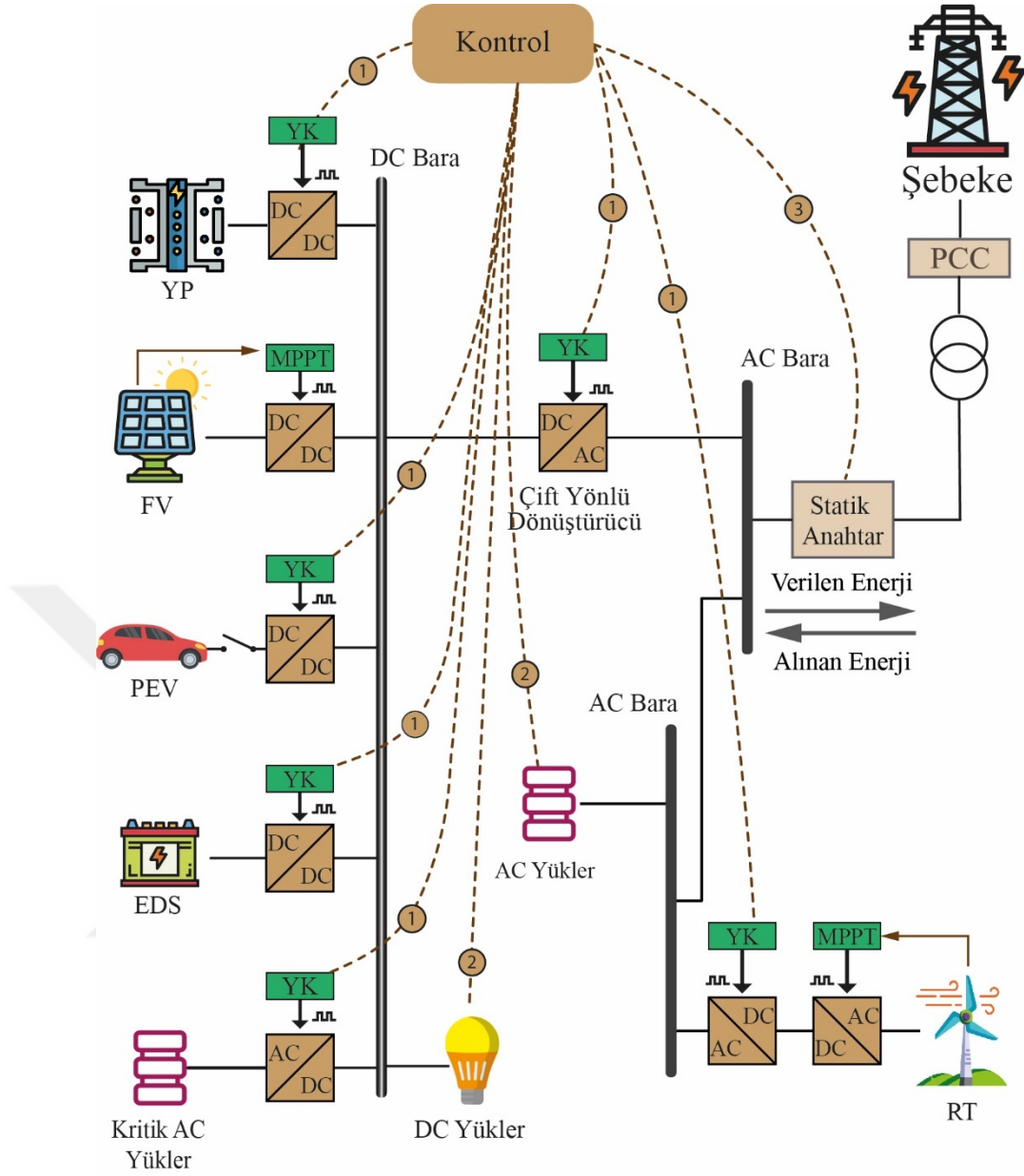
2.2 Mikroşebeke Yapısı

Bir mikroşebeke FV, RT, YP, DG ve mikrotürbinler gibi DEK birimleri, süperiletken indüktörler, volanlar, bataryalar gibi EDS ve yükleri içerir. DEK'ler iki ana gruba ayrılabilir:

- Sabit hızlı RT tarafından tahrik edilen bir indüksiyon generatörü gibi geleneksel döner makinelerle doğrudan bağlantılı olan DEK'ler,
- FV diziler, YP'ler gibi invertör ile şebekeye bağlanmış olan DEK'ler.

EDS'ler, şebekede enerji fazlalığı durumunda şarj edilirken şebekedeki güç açığını kapatmak için deşarj edilirler. Aynı zamanda EDS'ler hızlı tepki veren sistemlerdir. Geçici kararsızlığı önleyerek şebekede meydana gelen kısa süreli dengesizliğe enerji rezervi sağlayarak mikroşebekenin gerilimini ve frekansını kararlı bir şekilde kontrol eder. EDS'lerin bu avantajları mikroşebekelerin güvenilirliği ve kararlılığını arttırmaktadır. YEK'ler ve EDS'lerden oluşan tipik bir hibrit mikroşebeke güç sistemi yapısı Şekil 2.2'de gösterilmektedir.

Mikroşebeke güç sistemini oluşturan DEK'ler, güç elektroniği dönüştürücüleri aracılığıyla ilgili baraya bağlantılıdır. Ortak bağlantı noktası (PCC) genellikle bir şebeke trafosu veya güç elektroniği arayüzü kullanılarak mikroşebekeye bağlanır. Mikroşebeke, şebekeye bağlı mod ve ada modu olmak üzere iki modda çalışır. PCC aracılığıyla ana şebekeden beslenebilir veya ana şebekeden ayrılarak izole bir sistem olarak çalışabilir (Kaysal ve diğ. 2022b). Ana şebekede bir bozulma meydana geldiğinde veya mikroşebeke optimum işletme durumunu elde ettiğinde, PCC'deki anahtar açılarak ana şebekeyle bağlantısı kesilir. Böylece ada modunda çalışmaya devam edebilir. Bu durumda mikroşebeke, DEK'lerin etkili yönetimi, yük atma ve talep cevabı ile kritik yüklerin kesintisiz tedarikini sağlar (Li ve Nejabatkhah 2014).



Şekil 2.2: Tipik bir hibrit mikroşebeke enerji sistemi yapısı.

Mikroşebeke yapılarında güç elektroniği dönüştürücülerinin kullanımı oldukça önemlidir. Bu sistemler, güç akışının yönetimi, gerilimin düzenlenmesi ve frekansın kontrolü gibi çeşitli işlevleri yerine getirir. Şekil 2.2’de verilen mikroşebeke yapısındaki DC-DC, DC-AC ve çift yönlü dönüştürücülerin kullanılmasıyla DEK’lerin etkin bir şekilde entegrasyonuna olanak sağlanır. Ayrıca şebeke gerilim ve frekans regülasyonunda bu dönüştürücülerden yararlanılır. Böylelikle enerji üretimindeki verimlilik artırılarak enerji kaynaklarının kullanımı optimize edilebilir. Aynı zamanda, şebekedeki dalgalanmalar ve bozulmalar azaltılarak güç kalitesi artırılır.

2.3 Mikroşebeke Kontrolü

Mikroşebekeler, dağıtık üretim altyapısının temel kavramlarından biridir ve YEK'lerin şebeke entegrasyonunu yönetmek için geliştirilmektedir. Son kullanıcıların enerji üretimi, depolama, kontrol ve yönetim süreçlerine dahil olmasını mümkün kılarak, son kullanıcının sadece tüketici değil aynı zamanda şebekenin bir parçası olmasını sağlar. Mikroşebekelerin kontrol stratejilerindeki iyileştirmelerin yanı sıra performans ve kararlılığın artırılması, kapalı döngü sistemlerde geçici durum tepkisinin iyileştirilmesi, dengesizlik ve harmoniklerin izlenmesi, hata durumunda çalışma karakteristiklerinin geliştirilmesi ve ada mod ile şebeke etkileşimli mod çalışma koşullarında yeni kontrol şemalarının geliştirilmesi gibi konulara yoğunlaşmaktadır (Kabalcı ve diğ. 2021).

Mikroşebeke kontrol yöntemleri Şekil 2.2'de gösterilen genel bir şema kullanılarak uygulanır. Bu sistemde, her bir mikroşebeke modeli, yerel olarak gerçekleştirilen bir yerel kontrolör (YK) tarafından kontrol edilir. Dağıtım şebekesi ile mikroşebeke arasında bir merkezi veya dağıtık kontrolcü bulunmaktadır. Bu kontrolcüler, birden fazla mikroşebekenin yer aldığı sistemlerde orta gerilim ve düşük gerilim kontrol işlemlerini yürütür. Mikroşebekeler, geleneksel güç şebekelerinde olduğu gibi çeşitli kontrol döngüleri ve kontrol katmanlarından oluşur.

YEK'lerin yaygınlaşan kullanımı ve mikroşebekeler aracılığıyla şebekeye dâhil edilmeleri, ana şebeke ve mikroşebeke açısından kararlılık ve kontrol konularında çeşitli zorluklar ve problemler ortaya çıkarmaktadır. Bu problemlerin üstesinden gelmek için mikroşebeke kontrolü konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar son 20 yılda kontrol ve koruma sistemleri üzerine yoğunlaşmıştır. Mikroşebeke kontrolünde elde edilen gelişmeler, mikroşebekelerin ana şebekeye daha yüksek kapasitelerde entegre edilmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca bu gelişmeler, dağıtım şebekelerinin işletilmesinde yaşanan zorlukları ortadan kaldırmayı ve şebekenin işlevselliğini arttırmayı amaçlamaktadır.

3. DC MİKROŞEBEKEDİ HİİYERARŞİK KONTROL

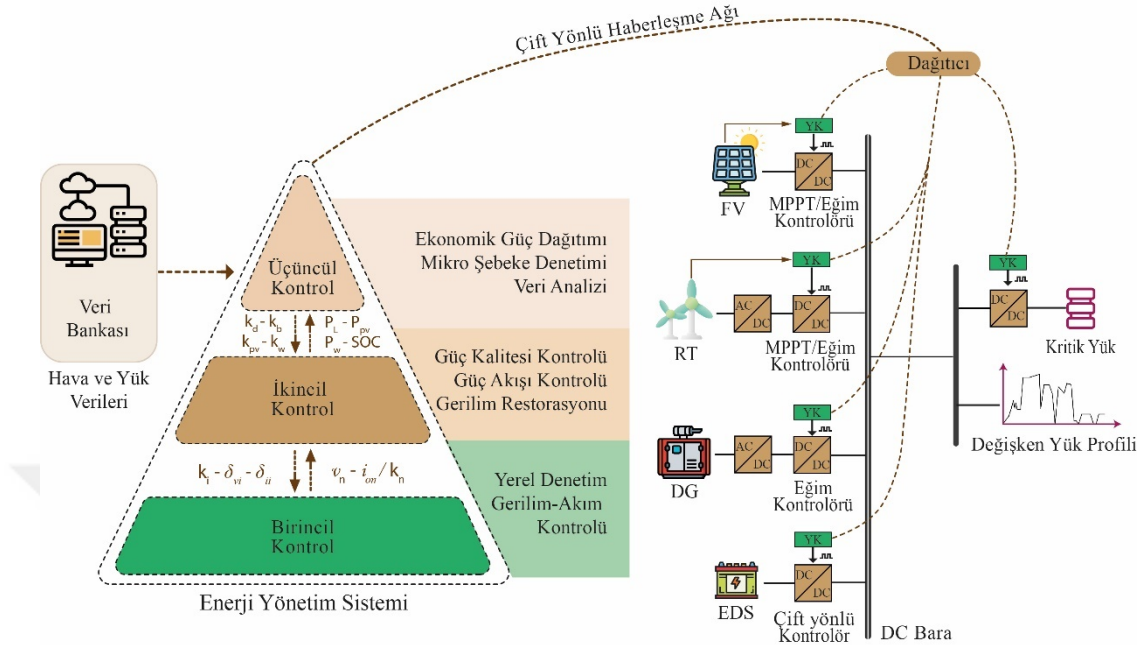
Mikroşebeke bileşenlerindeki dinamiklerin belirlenmesi, doğru planlanması, tasarlanması ve işletilmesi için mikroşebeke karakteristiklerini etkileyen tüm parametrelerin modellenmesi son derece önemlidir. Mikroşebekelerin modellemesi, elektrik şebekelerindeki sistem performansını optimize etmek, güç kalitesini ve olası sorunları belirlemek ve bunları çözmek için stratejiler geliştirmek için kullanılabilir.

Mikroşebeke modelleri oluşturulurken, birçok faktöre dikkat etmek gerekmektedir. Öncelikle, modele dahil edilecek bileşenlerin belirlenmesi önemlidir. Bu bileşenler arasında, güç kaynakları, şebeke elemanları, şebeke koruma ve kontrol sistemleri, yükler ve depolama cihazları yer alır. Bu bileşenlerin modellemesi, doğru parametrelerin seçilmesiyle gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlar. Ayrıca modellemelerde kullanılacak matematiksel algoritmaların belirlenmesi de önemlidir. Bu algoritmalar, modele uygun olan doğru çözüm yöntemiyle seçilmelidir. Bununla birlikte, modellerin gerçek zamanlı benzetimlere uygun olması için hızlı hesaplama tekniklerinin kullanılması gerekmektedir.

Önerilen DC mikroşebeke yapısı Şekil 3.1’de görülmektedir. Bu şebeke yapısında FV diziler, DMSG tabanlı RT, EDS ve DG’den oluşan DEK’ler kullanılmıştır. Yenilenebilir kaynaklardan FV’nin nominal gücü 1,5 kW, RT’nin nominal gücü 1,6 kW ve kaynakların yeterli olmadığı durumlarda kritik yükün enerji talebinin sürekliliği için devreye alınan bir DG kullanılmıştır. DG’nin nominal gücü 1,25 kVA’dır. Aynı zamanda DC bara gerilim kararlılığı, enerji arzı istikrarının sağlanması ve mikroşebeke sisteminde enerji taleplerinin karşılamasını desteklemek amacıyla EDS kullanılmıştır. EDS’nin güç kapasitesi 1,44 kWh’tir. DEK’lerin bara bağlantısında DC-DC dönüştürücüler, EDS’de ise çift yönlü DC-DC dönüştürücü kullanılmıştır. Mikroşebekeden talep edilen maksimum güç 1,8 kW olarak belirlenmiş olup bu yükün 0,5 kW’ı kritik yükü oluştururken geri kalanı değişken yük profili olarak modellenmiştir.

Bu mikroşebekede güç akışının kontrolü için hiyerarşik kontrol yapısı bulunmaktadır. Hiyerarşik EYS, geleneksel güç sistemlerinden farklı olarak EYS’de işletilen optimizasyon algoritmaları aracılığıyla ekonomik ve çevresel faktörler göz önünde bulundurularak mikroşebeke sistemini etkin bir şekilde yönetir. Hava

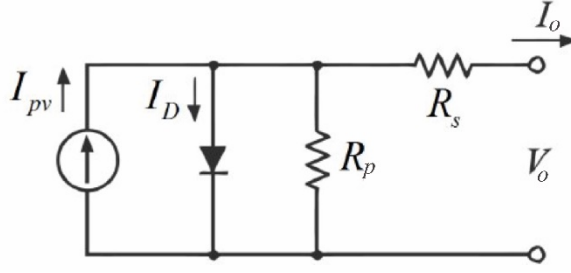
şartlarına bağlı değişkenler ve yük verileri ile yerel kontrolörler, EYS ile çift yönlü haberleşme ağı aracılığıyla bilgi alış-verişi yapmaktadır.



Şekil 3.1: Önerilen DC mikroşebekenin güç akışını kontrol eden hiyerarşik enerji yönetim sistemi blok diyagramı.

3.1 Fotovoltaik Dizi

FV hücreler, ışıma enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürler. MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan DC mikroşebeke modelinde, 38°49'02.7"N ve 30°31'56.7"E koordinatlarından 30 Ekim 2020 tarihinde elde edilen güneş ışıınım verileri kullanılmıştır. Koordinatları verilen bölge için ışıınım değerleri 0-862 W/m² arasında değişmektedir. FV dizilerin kurulu gücü 25 °C hücre sıcaklığı ve 1000 W/m² güneş ışıınımında 1,5 kW'tır. FV dizilerin çıkış gerilimi, DC-DC dönüştürücü kullanılarak 380 V'luk bara gerilim seviyesine yükseltilmiştir. Şekil 3.2'de gösterilen bir FV hücrenin eşdeğer devresi, Denklem (3.1)'deki tek bir üstel formül ile modellenebilir (Stornelli ve diğ. 2019).

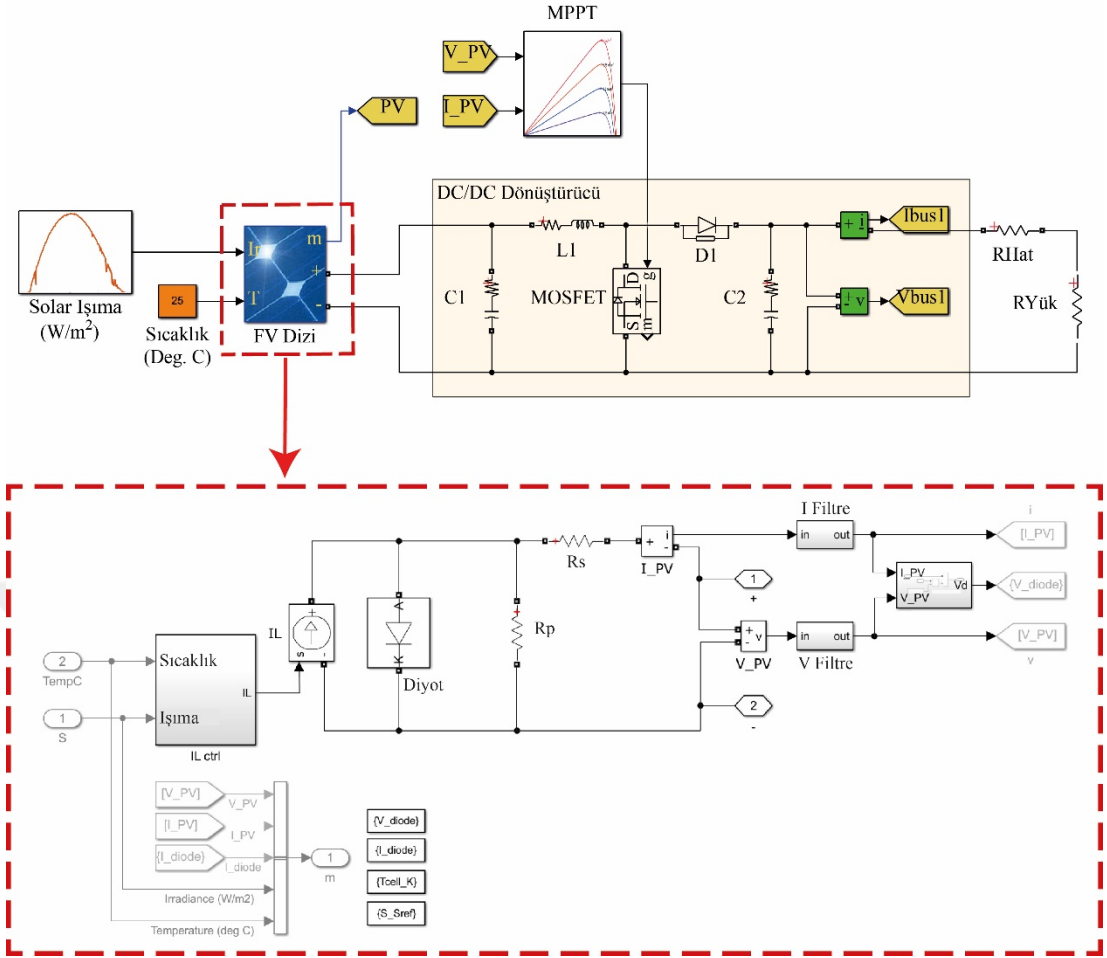


Şekil 3.2: FV hücrenin tekli diyot modeli.

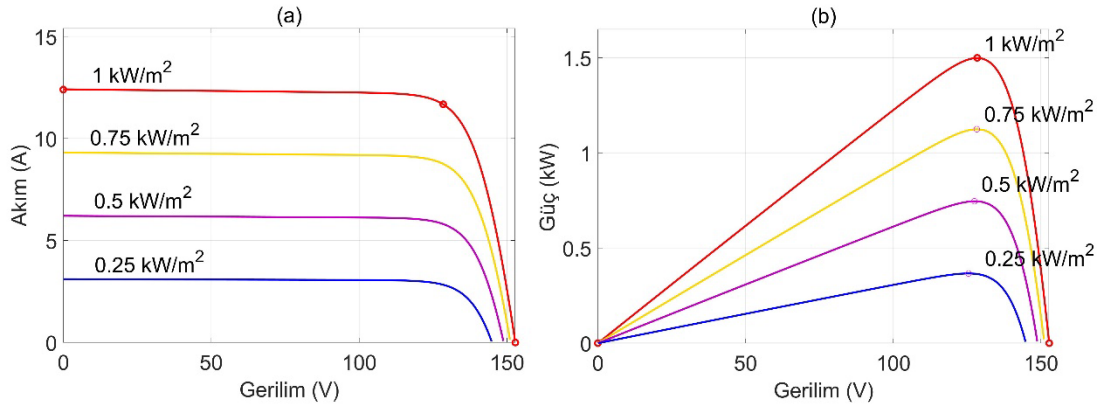
$$I_o = I_{pv} - I_s \left[\exp \left(\frac{q(V_o + I_o R_s)}{kAT} \right) - 1 \right] - \frac{(V_o + I_o R_s)}{R_p} \quad (3.1)$$

Denklemde, I_{pv} güneş radyasyonuna bağlı olarak üretilen akımı, I_s diyetun ters satürasyon akımını, R_s ve R_p hücrenin seri ve paralel direnç değerlerini, q elektron yükünü ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$), k Boltzmann sabitini ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$), A doğrusallık faktörünü, T hücre sıcaklığını ($^\circ\text{K}$), V_o ve I_o sırasıyla hücrenin çıkış terminallerinden elde edilen gerilim ve akım değerlerini temsil etmektedir. FV sistemin benzetim modeli ve DC-DC dönüştürücü yapısı Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Benzetim modelindeki FV diziler, güneş ışınlarından gelen enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren ve Şekil 3.2'de verilen eşdeğer devredeki tekli diyot modelini kullanan FV hücrelerinden oluşmaktadır. FV benzetim modelinde, kontrollü akım kaynağı bloğu, modülün hava şartlarına bağlı performansının gözlenmesine imkân tanıyan ışınlım ve sıcaklık bloğu, gerilim ve akım ölçüm blokları, diyot karakteristiğinin temsil edildiği blok, seri ve paralel bağlı direnç blokları yer alır.

Benzetim modelinde, belirtilen konumdan elde edilen güneş radyasyonu ve sıcaklık verileri girdi olarak kullanılmıştır. FV dizilerden elde edilen çıkış gerilimi DC bara gerilimine uygun hale getirmek ve mikroşebekede enerji yönetimini sağlayabilmek için DC-DC yükselten dönüştürücü modellenmiştir. FV dizinin akım-gerilim ve güç-gerilim grafiklerine ilişkin elektriksel karakteristiği Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



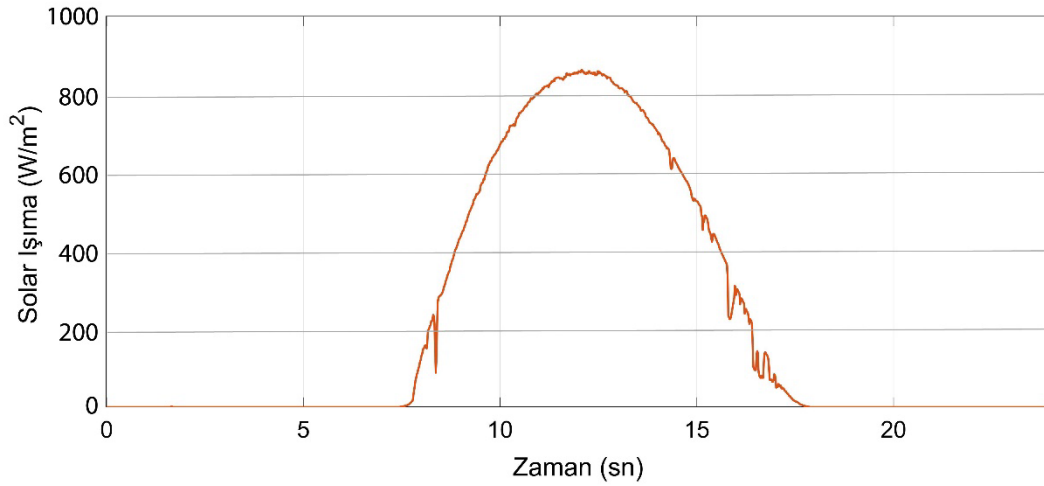
Şekil 3.3: FV dizi modeli ve DC-DC dönüştürücü yapısı.



Şekil 3.4: FV dizinin akım-gerilim ve güç-gerilim grafiklerine ilişkin elektriksel karakteristiği.

Şekil 3.4 (a)'da görülen akım-gerilim grafiği, dizinin belirli bir solar ışımadaki çalışma noktasını göstermektedir. Bu grafikte dizinin üretebileceği maksimum akım, kısa devre akımı ve maksimum gerilim ise açık devre gerilimi olarak adlandırılır. Şekil 3.4 (b)'de görülen güç-gerilim grafiği, modülün güneş enerjisini elektrik enerjisine

dönüştürme verimliliğini göstermektedir. Güç-gerilim grafiğinde MPP noktası, maksimum güç çıkışıdır ve modülün en yüksek verimlilik seviyesinde çalıştığı noktadır. Mikroşebeke benzetim çalışmalarında kullanılan FV dizilerin en yüksek verimlilik seviyesinde çalıştırılabilmesi için P&O MPP algoritması işletilmiştir. Bu durumda FV dizilerden 1,5 kW güç elde edilmektedir. Koordinatları verilen bölgenin bir günlük solar ışıma eğrisi Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Sistemde kullanılan FV modüllerinin teknik özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.5: Solar ışımanın zamana bağlı değişimi.

Tablo 3.1: FV sisteminin teknik özellikleri.

Ekipman	Tanım	Değer
FV dizi	Dizi gerilimi	$V_{mpp} = 128,4 \text{ V}$
	Dizi akımı	$I_{mpp} = 11,68 \text{ A}$
	1 kW/m ² solar ışımadaki maksimum güç	$P_{pv} = 1,5 \text{ kW}$
FV modül	Modüldeki hücre sayısı	$N_s = 72$
	Modül gerilimi	$V_{pv} = 42,8 \text{ V}$
	Modül akımı	$I_{pv} = 5,84 \text{ A}$
	Açık devre gerilimi	$V_{oc} = 50,93 \text{ V}$
	Kısa devre akımı	$I_{sc} = 6,2 \text{ A}$
	Diyot satürasyon akımı	$I_s = 1,3593e^{-11} \text{ A}$
	Paralel direnç	$R_p = 420,5449 \text{ } \Omega$
	Seri direnç	$R_s = 0,37748 \text{ } \Omega$

3.2 Rüzgâr Türbini

Dünya pazarındaki payı sürekli olarak artan RT'ler, son 20 yılda en hızlı büyüyen enerji üretim teknolojilerinden biri olmuştur. RT'de birçok generatör tipi kullanılmaktadır. Bunlardan birisi olan DMSG, dişli sistemine gerek duymaksızın doğrudan RT'de kullanılabilirler. Bu tip generatörlerde rotor manyetik akısı kalıcı mıknatıslar tarafından üretildiğinden fırçasızdır. Bu nedenle bu tip generatörlerin rotor sargı kayıpları yoktur ve yüksek bir güç yoğunluğu elde edilebilir. Ayrıca asenkron generatöre kıyasla daha yüksek verimlilik ve güvenilirlik sağlamaktadır (Wu ve diğ. 2011). DMSG'lerin daha küçük boyutlu ve kontrolünün kolay olması gibi avantajları nedeniyle rüzgâr türbini modelinde DMSG kullanılmıştır.

Rüzgâr santrallerinde hareketli hava kütlesi, kanat süpürme alanı A_w olan bir rüzgâr türbininin pervanesine dikey yönde çarptığında, rotora etki eden rüzgâr gücü P_w Denklem (3.2) ile ifade edilir (Yuan ve diğ. 2019).

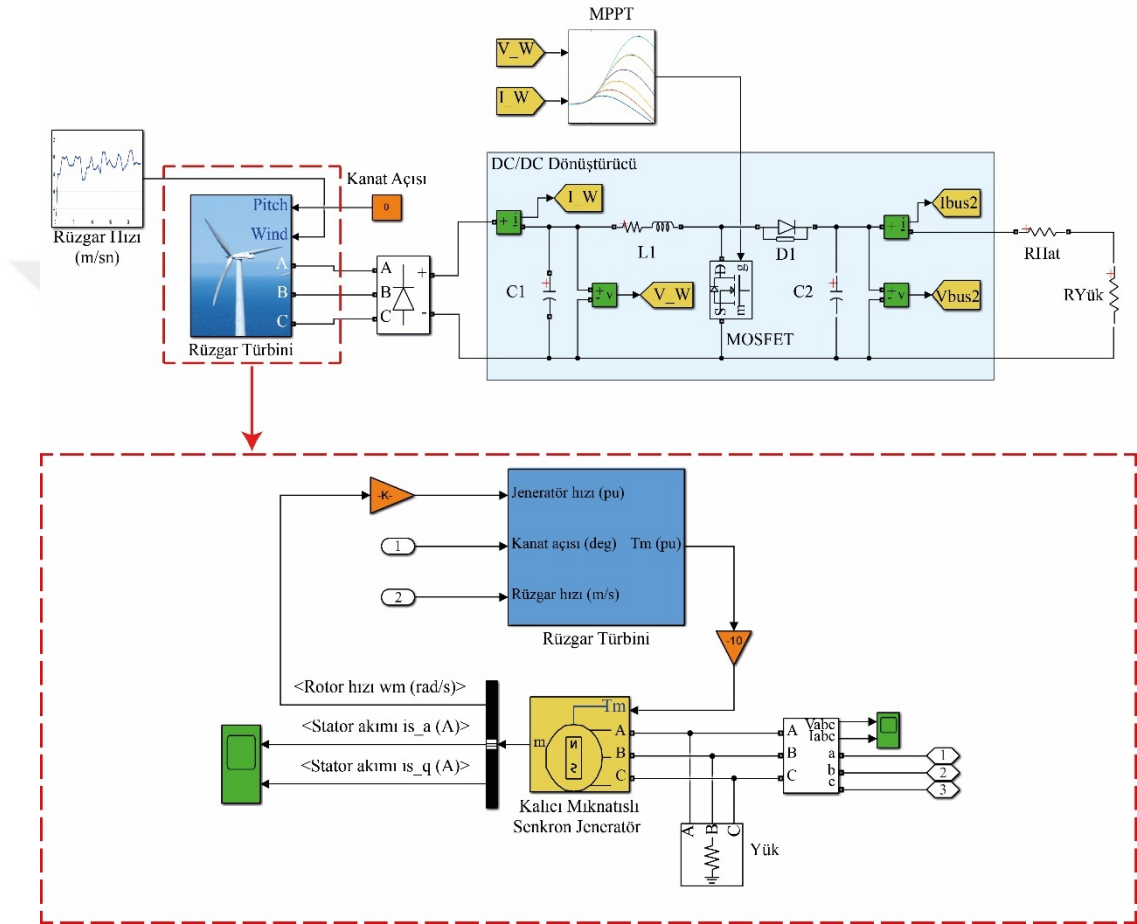
$$P_w = \frac{1}{2} \rho A_w v_w^3 C_p(\beta, \lambda) \quad (3.2)$$

Denklemde ρ hava yoğunluğu, v_w rüzgâr hızıdır. Rüzgâr türbinlerinin rotor performansı, C_p güç katsayısına bağlıdır. Bu katsayı, β kanat eğim açısı ve $\lambda = \omega R/V$ açısal hız oranı olmak üzere iki değişkenli bir fonksiyondur. ω rotor açısal hızı ve R rotor yarıçapıdır. DMSG'de alan sargısı yerine kullanılan kalıcı mıknatıs, eğer sabit bir büyüklükte ise eşdeğer bir akım kaynağı ile modellenebilir. DMSG'nin tasarımı için yapılan analizi basitleştirmek için koordinat dönüşümü yöntemi kullanılır. Bu yöntemde DMSG'nin tepkisini incelemek için gerekli olan parametreler ve denklemler, park dönüşümleri kullanılarak dönel eksen yapısından sabit d-q eksenine dönüştürülür. DMSG'nin matematiksel modeli ise d-q referans sistemi kullanılarak tanımlanır. Üretilen elektromanyetik tork Denklem (3.3) ile ifade edilir (Keyhani ve Marwali 2011).

$$T_e = \frac{3p}{2} [\lambda_r i_{qs} + (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}] \quad (3.3)$$

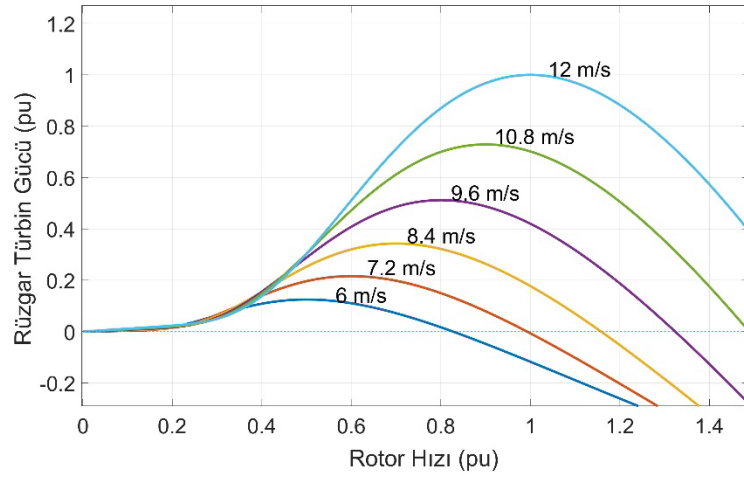
Denklemde i_{ds} ve i_{qs} dq-ekseni stator akımlarını, L_q ve L_d dq-ekseni stator indüktanslarını, λ_r rotor akısını, p kutup çifti sayısını temsil etmektedir. 30 Ekim 2020

tarihinde daha önce koordinatları belirlenen lokasyondaki rüzgâr hızı değişimi 7,35-10,81 m/sn aralığında olup DC mikroşebeke modelinde bu veriler kullanılmıştır. DMSG, nominal devir olan 2000 rpm hızda yaklaşık 1,6 kW güç üretmektedir. Rüzgâr enerji sisteminin benzetim modeli ve DC-DC dönüştürücü yapısı Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



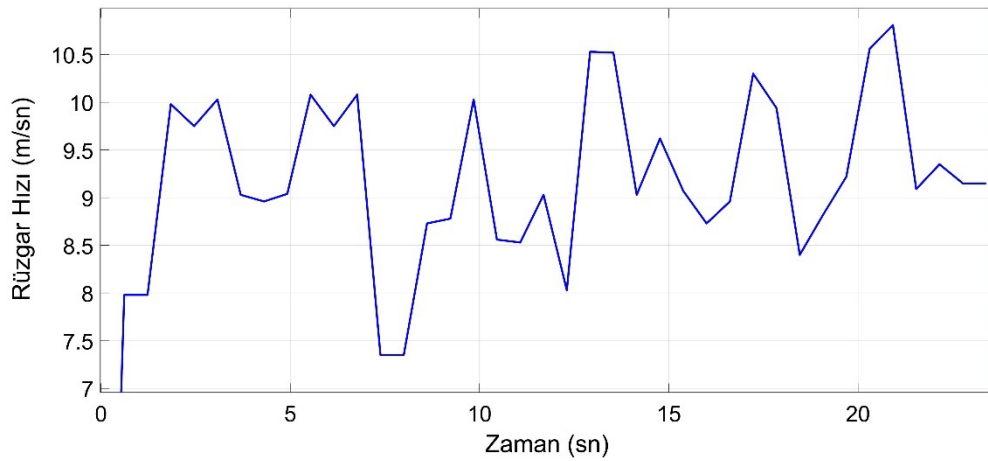
Şekil 3.6: Rüzgâr türbini modeli ve DC-DC dönüştürücü yapısı.

RT'nin mekanik güç-rotor hızı grafiği, türbinin performansının belirlenmesinde önemli bir araç olup verimliliklerini artırmak için MPP algoritmaları kullanılmaktadır. RT'nin mekanik gücü, türbinin rotor hızına bağlı olarak Şekil 3.7’de verilmiştir. Maksimum verim noktası, grafikte belirtilen türbin hızındaki en yüksek mekanik güç çıkışını ifade etmektedir. Mikroşebeke benzetim çalışmalarında kullanılan RT'nin en yüksek verimlilik seviyesinde çalıştırılabilmesi için eğim kontrol algoritmasının aktif olmadığı durumlarda P&O MPP algoritması işletilmiştir.



Şekil 3.7: Rüzgâr türbin gücünün rotor hızına bağlı değişim karakteristiği.

Koordinatları verilen bölgenin bir günlük rüzgâr hızı eğrisi Şekil 3.8’de, RT sistemine ait teknik özellikler Tablo 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.8: Rüzgar hızının zamana bağlı değişimi.

Tablo 3.2: RT sisteminin teknik özellikleri.

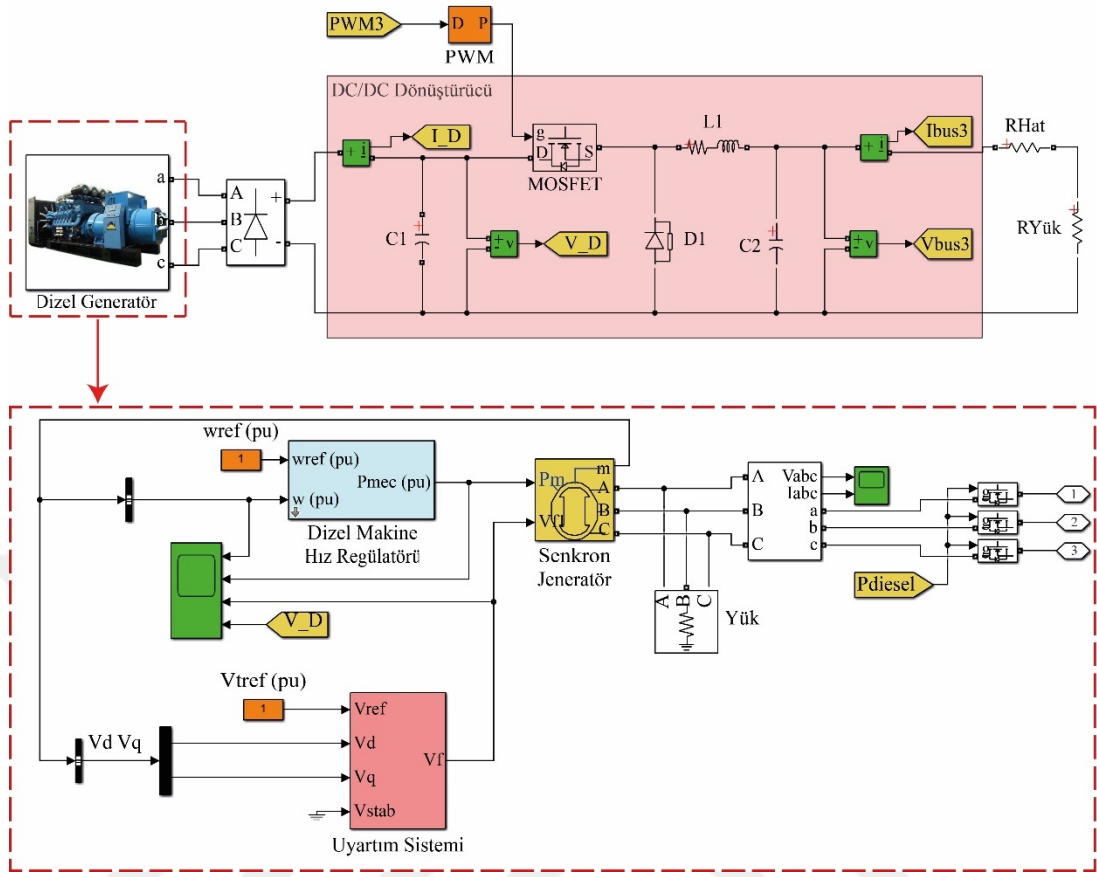
Ekipman	Tanım	Değer
Rüzgâr türbini	Üç faz DMSG	
	Nominal rotor hızı	$n_s = 2000 \text{ rpm}$
	Mekanik tork	$T_m = 8 \text{ N.m}$
	Stator faz direnci	$R_w = 0,9585 \Omega$
	Stator faz indüktansı	$L_w = 5,25 \text{ mH}$
	Atalet sabiti	$J_w = 0,0006329 \text{ kg.m}^2$
	Viskoz sönümleme	$F_w = 0,0003035 \text{ N.m.s}$
	Kutup çifti	$p = 4$

3.3 Dizel Generatör

DG, elektrik enerjisi üretmek için kullanılan bir elektrik jeneratörüne bağlı içten yanmalı motorlardır. DG'ler, özellikle enerji kesintileri veya şebekenin olmadığı durumlarda acil güç kaynakları olarak yaygın bir şekilde kullanılır (Hu ve Solana 2013). DG'nin ana parçaları arasında içten yanmalı motor, senkron generatör, mekanik kaplin, otomatik gerilim regülatörü, hız regülatörü, içten yanmalı motorun ilk çalıştırılması sırasında kullanılan batarya ve marş dinamosu, otomatik yakıt enjeksiyonu ve ateşleme sistemi, yakıt tankı ve kumanda paneli bulunmaktadır.

DG'ler, mikroşebeke sistemlerinde şebekenin güvenilirliğini artırmak ve enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesini sağlamak için kullanılmaktadır. Bu durum, güneş veya rüzgâr gibi YEK'lerden elde edilen enerji miktarının yetersiz kaldığı durumlarda özellikle bara gerilim ve frekans kararlılığının sürdürülmesi açısından önemlidir. Bu açıdan DG'ler, acil durumlarda şebekeye hızlı bir şekilde güç sağlanması amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak DG'ler, zararlı emisyonları nedeniyle çevre kirliliğine yol açmaktadır. Bu nedenle mikroşebeke yapılarında DG'lerin yakıt tüketimi optimizasyonu, son yıllarda enerji verimliliğini artırmak ve çevreye olan olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla yoğun bir şekilde araştırılan bir konudur. DG'lerde yakıt tüketiminin optimize edilmesi, karbon emisyonlarını ve hava kirliliğini azaltarak mikroşebeke yapılarının verimli ve sürdürülebilir işletmesinin sağlanması için hayati önem taşımaktadır.

DG modeli, 1,25 kVA güce sahip üç fazlı senkron generatör, hız regülatörü ve uyarım sisteminden oluşmaktadır. DG'nin hiyerarşik kontrol sistemi tarafından şebekeye bağlantısını sağlayan kesiciler ve DG çıkış geriliminin DC baraya uygunlaştırılmasında DC-DC dönüştürücü modele dahil edilmiştir. DG sisteminin benzetim modeli ve DC-DC dönüştürücü yapısı Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Dizel generatör modeli ve DC-DC dönüştürücü yapısı.

$CF(P_d)$, DG'nin giriş gücüne bağlı harcadığı toplam yakıt maliyeti olmak üzere Denklem (3.4)'te verilen ikinci dereceden doğrusal olmayan fonksiyon ile hesaplanır (Kusakana 2015).

$$CF(P_d) = C_f \cdot \sum_{j=1}^N (aP_{d(j)}^2 + bP_{d(j)} + c) \quad (3.4)$$

Denklemde N sistem çalışma süresindeki örnekleme aralıklarının sayısı, j örnekleme adımı, $P_{d(j)}$ DG'den j . örnekleme aralığındaki çıkış gücü, C_f yakıt ücreti (1,4 \$/L), $a = 0,246$, $b = 0,0815$, $c = 0,4333$ (L/kWh) olmak üzere yakıt maliyet katsayılarını temsil etmektedir. Mikroşebekenin işletilmesi sırasında, gerekli olduğu durumlarda, EYS tarafından DG devreye alınır ve bu süreçte optimizasyona dayalı ECMS kullanılarak Denklem (3.4)'teki yakıt maliyetinin en aza indirilmesi amaçlanır. DG sistemine ait teknik özellikler Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3: DG sisteminin teknik özellikleri.

Ekipman	Tanım	Değer
Dizel makine	Üç faz senkron generatör	
	Nominal güç	$P_d = 1,25 \text{ kVA}$
	Nominal gerilim	$V_d = 400 \text{ V}$
	Nominal frekans	$f_d = 50 \text{ Hz}$
	ECMS minimum SOC seviyesi	$SOC_{min}^d = 40\%$
	ECMS maksimum SOC seviyesi	$SOC_{max}^d = 60\%$

3.4 Enerji Depolama Sistemi

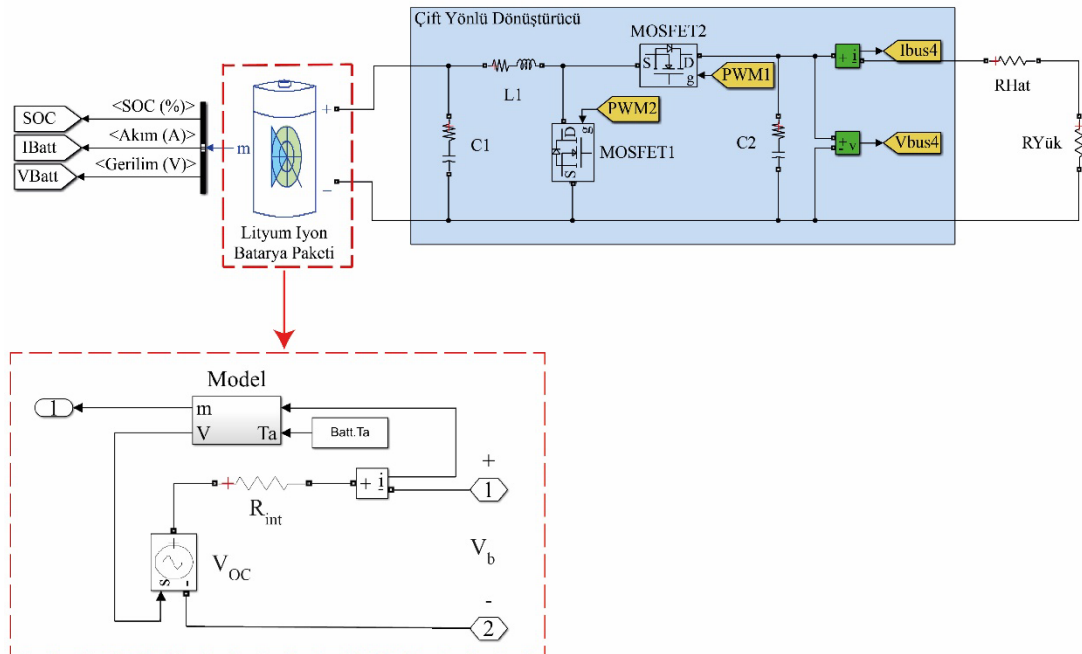
EDS, mikroşebekenin frekans ve gerilimini düzenleme, yedek güç kaynağı, enerji kalitesinin kontrolü, talep yanıtı ve YEK entegrasyonu gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu uygulamaların her biri, mikroşebekelerin verimliliğini artırmak ve kararlılığını sağlamak için önemlidir. Bu sistemlerinin kullanımı, enerji kaynaklarının arz ve talep dengesinin sağlanmasına yardımcı olur. Özellikle YEK'lerin giderek artan kullanımıyla birlikte enerji arzındaki dalgalanmaların azaltılmasında önem kazanmıştır (Hjalmarsson ve diğ. 2023).

Tipik bir EDS, batarya paketi, güç dönüştürme sistemi, soğutucu, fan, güvenlik ekipmanı ve ölçü birimleri gibi tamamlayıcı unsurları içeren bir sistemdir. Geleneksel bir batarya, pozitif ve negatif elektrotlar arasında katı, sıvı veya jel elektrolit içeren bir elektrokimyasal hücre olarak tanımlanabilir. Deşarj sırasında elektrotlarda elektrokimyasal reaksiyonlar meydana gelir ve dış devre boyunca bir akım akar. Ana reaksiyonlar geri dönüşümlüdür, ancak döngü sırasında katı bir elektrolit arayüz oluşumu gibi bazı geri dönüşü olmayan reaksiyonlar da meydana gelebilir (Das ve diğ. 2018).

Bataryalar, hızlı yanıt süreleri ve yüksek verimlilikleri nedeniyle şebekeye bağlı EDS için oldukça uygundur. Önemli batarya türleri arasında kurşun asit, lityum iyon, sodyum metal klorid, nikel metal hibrit, alüminyum ve çinko hava tabanlı bataryalar gösterilmektedir. Bunlar içerisinde lityum iyon bataryalar, büyüklüklerine oranla verebildikleri yüksek enerji ile en iyi batarya çeşitlerinden biridir ve gelişmiş teknolojisi göz önüne alındığında yaygın olarak kullanılmaktadır (Kaysal ve diğ.

2021). Bu çalışmada, hızlı şarj işlemine müsaade etmesi, hafıza etkisinin olmaması, kullanılmadıkları zamanlardaki enerji kayıplarının yavaş olması, düşük iç dirence, yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip olması, yüksek şarj-deşarj döngüsü, yüksek güvenilirlik ve düşük maliyet gibi avantajları nedeniyle lityum iyon bataryalar tercih edilmiştir. Ancak bu bataryalar yüksek akım, gerilim ve sıcaklık gibi parametrelerin kontrolsüz kullanılması halinde tehlikeli durumlara neden olabilirler. Aynı zamanda gerekli önlemler alınmazsa diğer batarya türlerine göre ömürleri daha kısa olabilir. Bu tür bataryalarda hücrelerin akım, gerilim, sıcaklık, doluluk oranı gibi parametrelerinin ölçülüp kontrol edildiği ve hücrelerin dengeli bir şekilde şarj vedeşarjına olanak tanıyan batarya enerji yönetim sistemi kullanılmalıdır.

EDS'nin benzetim modeli ve DC-DC çift yönlü dönüştürücü yapısı Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Benzetim çalışmasında lityum iyon batarya modeli bir direnç elemanına bağlı kontrollü bir gerilim kaynağı olarak basitleştiren RINT eşdeğer devre modeli kullanılmıştır. Mikroşebeke sisteminde kullanılan lityum iyon batarya paketi 150 V nominal çıkış gerilimine ve 9,6 Ah kapasiteye sahiptir.



Şekil 3.10: Lityum iyon batarya modeli ve DC-DC dönüştürücü yapısı.

Şekil 3.10'da verilen lityum iyon batarya modelinin çıkış terminallerindeki gerilim, Denklem (3.5) ile ifade edilir (Fodhil ve diğ. 2019).

$$V_b = V_{oc}^b - R_b I_b - K \frac{Q}{Q - \int_0^t I_b dt} + A \exp \left(-B \int_0^t I_b dt \right) \quad (3.5)$$

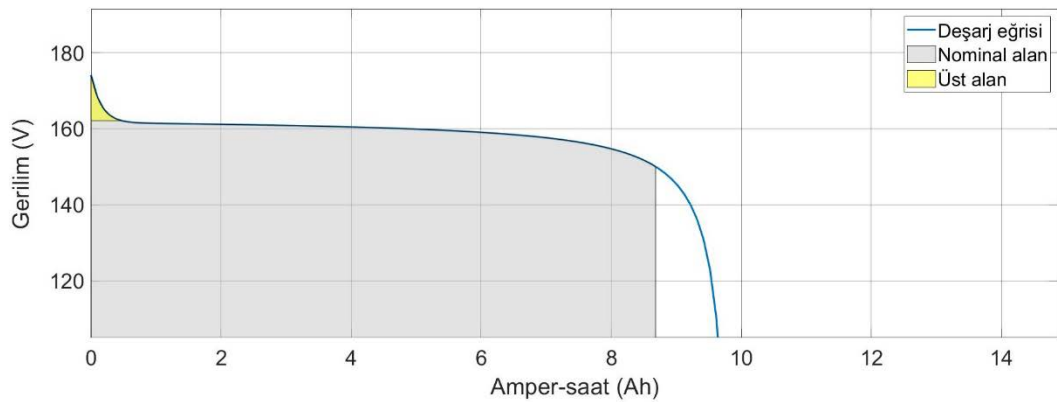
Denklemden V_b batarya terminal gerilimini, V_{oc}^b ve I_b sırasıyla bataryanın açık devre gerilimi ve nominal akımını, R_b bataryanın iç direncini, K polarizasyon sabitini, Q batarya kapasitesini, A ve B sırasıyla batarya üstel gerilim ve kapasite değerlerini temsil etmektedir. Batarya modelinin parametreleri Denklem (3.6)'da gösterildiği gibi batarya akımı ve şarj durumuna bağlıdır.

$$SOC = SOC_{ini} - \int_0^t \frac{\eta_b I_b}{Q} dt \quad (3.6)$$

Denklemden SOC_{ini} bataryanın başlangıç şarj durumunu ve η_b batarya verimini temsil etmektedir. Bataryanın şarj ve deşarj işlemleri kontrol algoritmasında belirlenen limitlere göre gerçekleştirilir. Bu limitler yük talebine, bataryadan çekilen veya verilen güce ve şarj durumuna bağlı olup bataryanın güvenliği için önemlidir. Bu limitler Denklem (3.7)'de ifade edilmiştir.

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (3.7)$$

SOC, bataryanın herhangi bir zamanındaki yük miktarıdır ve bataryanın izin verilen minimum (SOC_{min}) ve maksimum (SOC_{max}) şarj durumları ile sınırlandırılır. Lityum iyon batarya modelinin nominal deşarj akımındaki (0,435 C) karakteristiği Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.11: Lityum iyon batarya modelinin deşarj karakteristiği.

Kullanılan batarya paketi ve kapasitesine ilişkin karakteristik değerler Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4: EDS sisteminin teknik özellikleri.

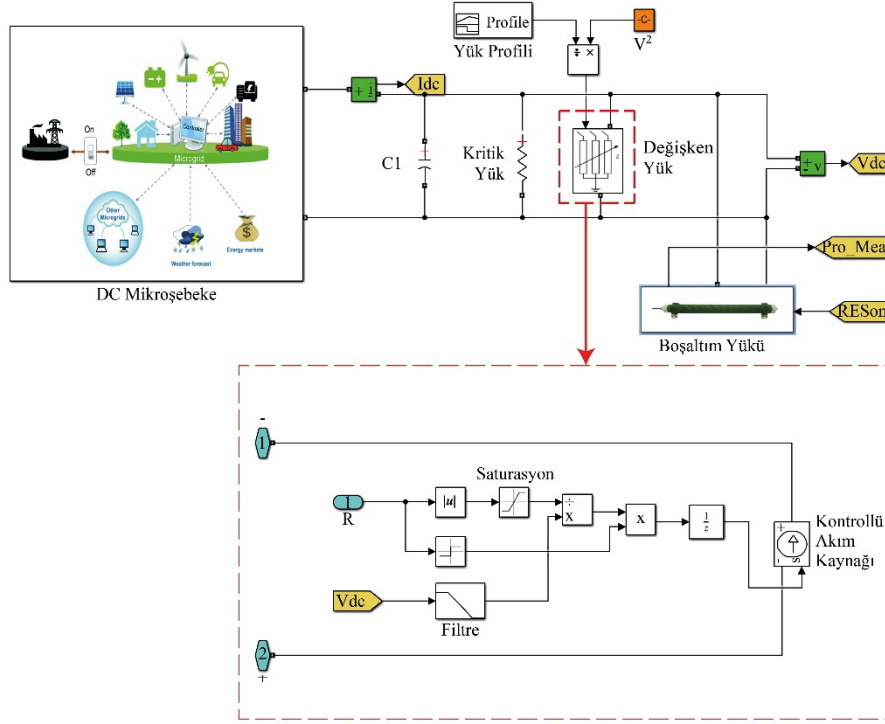
Ekipman	Tanım	Değer
Batarya paketi	Nominal gerilim	$V_b = 150 \text{ V}$
	Açık devre gerilimi	$V_{oc}^b = 162,65 \text{ V}$
	Kapasite	$Q = 9,6 \text{ Ah}$
	Maksimum güç oranı	$P_b^{max} = 1,44 \text{ kW}$
	Optimum güç oranı	$P_b^{opt} = 0,75 \text{ kW}$
	Nominal deşarj akımı	$I_{dis} = 4,1739 \text{ A}$
	İç direnç	$R_b = 0,156 \Omega$
	Polarizasyon sabiti	$K = 0,11706$
	Batarya üstel gerilim katsayısı	$A = 12,5964$
	Batarya üstel kapasite katsayısı	$B = 6,3606$
	Batarya maksimum SOC seviyesi	$SOC_{max} = 90\%$
	Batarya minimum SOC seviyesi	$SOC_{min} = 25\%$

3.5 Yük Modeli

Bir güç sisteminin kararlı çalışması, sistem tarafından talep edilen gücü sürekli olarak sağlama kabiliyetine bağlıdır. Bu nedenle, yük özellikleri sistemin kararlılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Tipik bir yük barasını temsil etmek için yapılan kararlılık çalışmalarında, flüoresan ve akkor lambalar, buzdolapları, ısıtıcılar, kompresörler, motorlar, fırınlar gibi birçok cihazdan oluşan yüklerin modellenmesi oldukça karmaşıktır. Ayrıca yük, zaman, hava koşulları ve ekonomik etkenler gibi birçok faktöre bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bir güç sistemi tarafından sağlanan toplam yükün tam niteliği bilinse bile, bu genellikle milyonlarca bileşen içerdiğinden, her bir bileşeni ayrı ayrı temsil etmek pratik değildir. Bu nedenle yük modellemesi, sistemin kararlılığına ilişkin analizler için kullanılan daha basit ve kullanışlı matematiksel modellere dayanmaktadır (Kundur 1994).

Yük modellemesi, genellikle statik ve dinamik olarak iki tipe ayrılır. Statik yük modeli, yükün anlık gerilim büyüklüğü ve frekansının cebirsel bir fonksiyonu olarak

ifade edilmekte olup sabit güç, sabit akım veya sabit empedans karakteristiği olarak sunulur. Ancak gerilim kararlılığı ve uzun süreli kararlılık çalışmaları, motorlar gibi bazı yüklerin dinamik modellerini gerektirir. Şekil 3.12’de görülmekte olan benzetim çalışmasındaki yük modeli, Şekil 3.13’te verilen değişken yük profiline göre kontrollü akım kaynağı olarak modellenmiştir.

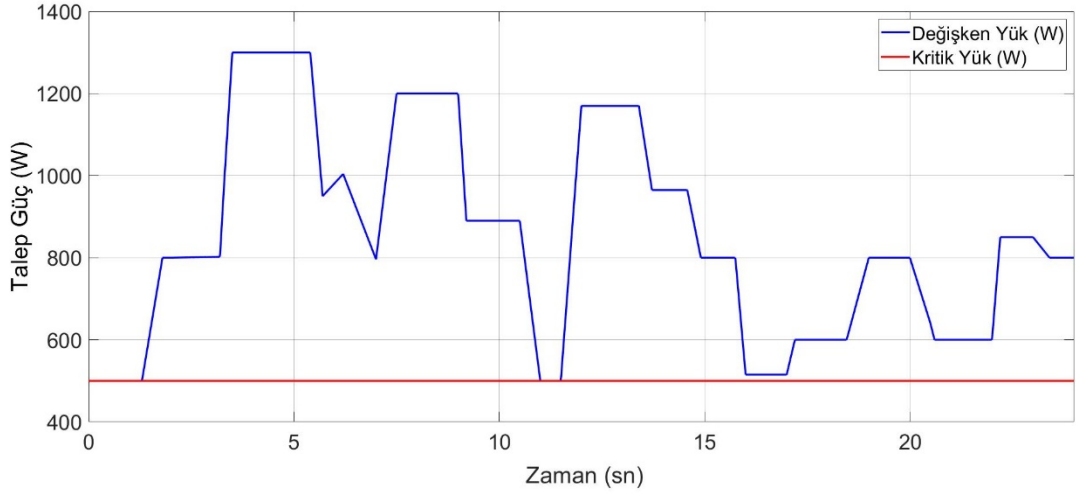


Şekil 3.12: Mikroşebeke benzetim çalışmasında kullanılan yük modeli.

Önerilen mikroşebeke yapısında değişken yük profiline bağlı olarak maksimum yük 1,8 kW olup kritik yük 0,5 kW ve değişken yük 0,5~1,3 kW güç aralığında tanımlanmıştır. DC bara ve yüklere ait teknik özellikler Tablo 3.5’te verilmiştir.

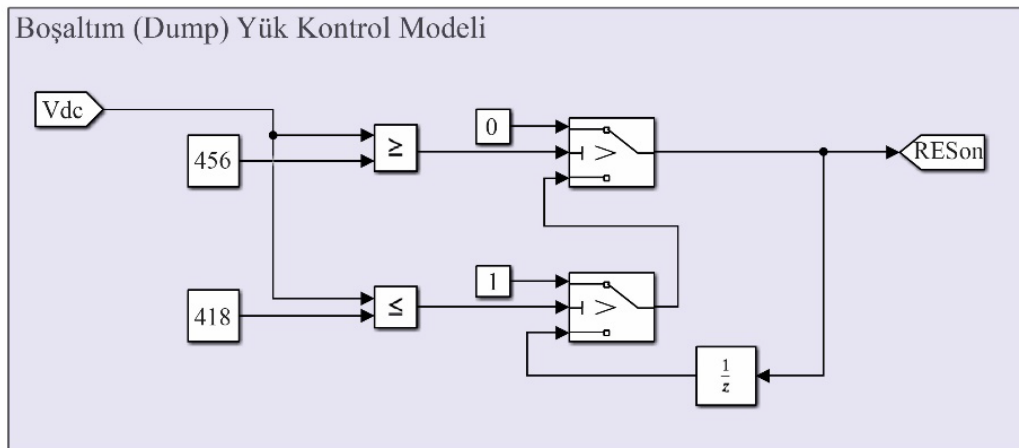
Tablo 3.5: DC bara ve yüklere ait teknik özellikler.

Ekipman	Tanım	Değer
DC bara	DC bara gerilimi	$V_{ref} = 380 \text{ V}$
	Hat direnci	$R_{li} = 3 \sim 6 \Omega$
	Akım paylaşım oranı	$k_i = 0,35 \sim 3$
	Sanal direnç	$R_{d0} = 1 \Omega$
Yük	Değişken yük gücü	$P_l^{dyn} = 0,5 \sim 1,3 \text{ kW}$
	Kritik yük gücü	$P_l^{crt} = 0,5 \text{ kW}$



Şekil 3.13: Mikroşebeke benzetim çalışmasında kullanılan değişken ve kritik yük profili.

Yüksek oranda yenilenebilir enerji kaynaklı dağıtık üretimin bulunduğu mikroşebekelerde, gerilim ve frekans saptmaları izin verilen sınırlarını aşarsa, gerçek zamanlı kontrol sistemleri bu saptmalarla başa çıkamazlar. Bu durum, özellikle düşük talep saatlerinde, büyük oranda üretim ve talep uyumsuzluğu nedeniyle ortaya çıkar. Bir boşaltım (dump) yükü, fazla üretimi tüketerek gerilim ve frekans düzenlemesine yardımcı olabilir (Kreishan ve Zobaa 2021). Tasarlanan DC mikroşebeke sisteminde, normal işletmenin dışında gerçekleşen durumlarda DC bara gerilimi nominal gerilimin %20'sinin üzerine çıkarsa, Şekil 3.14'te gösterilen bir histerezis kontrol modeli kullanılarak boşaltım yükü devreye alınır. Bu model, DC bara gerilimi nominal gerilimin %10'unun üzerinde ise boşaltım yükünü devreden çıkarmaktadır.



Şekil 3.14: Boşaltım yükü histerezis kontrol modeli.

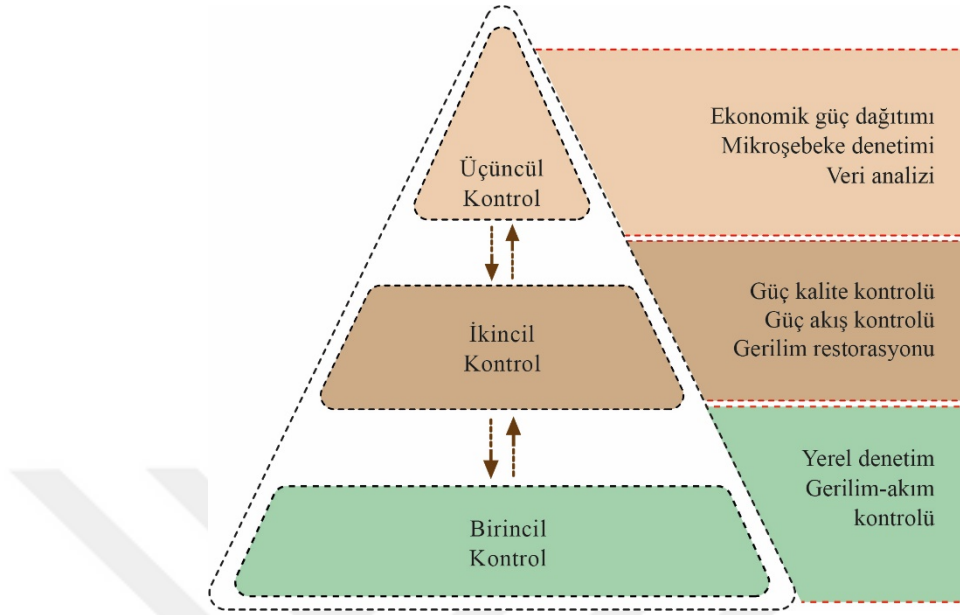
3.6 Hiyerarşik Kontrol

Mikroşebeke ile dağıtık kaynaklardan oluşan dağıtım sistemini birbirinden ayıran en önemli olgu mikroşebekenin kontrol kabiliyetidir. Bu kontrol kabiliyeti, yüksek seviyede bir koordinasyon ve kontrol altyapısı sunar. Mikroşebekeler, geleneksel şebekelerden farklı olarak hiyerarşik bir kontrol yapısına sahiptir ve farklı katmanlarda yer alan kontrol tekniklerinin etkin bir şekilde kullanılmasını gerektirir. Mikroşebekelerin güvenli bir şekilde çalışması ve ana şebekeye başarılı bir şekilde entegre olması veya şebekeden ayrılması uygun kontrol tekniklerinin kullanımına bağlıdır. Şebeke bağlantılı modda, mikroşebeke geriliminin genliği ve frekansı elektrik şebekesine entegre olabilmelidir. Bu nedenle, mikroşebekelerin uygun kontrol döngülerine sahip olması ve şebekeyle uyumlu şekilde çalışması önemlidir. Ayrıca ada moduna geçiş yapılması durumunda, uygun ada mod tespit algoritmalarının kullanılması gerekmektedir. Bu algoritmalar, ardışık sorunların ortaya çıkmasını engelleyerek sistemlerin sorunsuz bir şekilde çalışmasını devam ettirir.

Mikroşebekenin kararlılığı ve performansının artırılması için farklı kontrol döngüleri bir arada kullanılmalıdır. Bu kontrol döngüleri arasında hem ada modunda hem de şebeke modunda kullanılan geri besleme bilgileri sağlayan akım, gerilim, frekans ve aktif/reaktif güç kontrolü yer almaktadır. Mikroşebekelerin hiyerarşik kontrol yapısı, yük paylaşımı ve DEK'lerin koordinasyonu ile birlikte gerilim/frekans regülasyonundan sorumludur. Şebeke modunda ise mikroşebekenin senkronizasyonu, işletme maliyetlerinin optimizasyonu, güç akışının kontrolü, komşu şebekeler ve ana şebeke arasındaki etkileşim gibi görevleri üstlenir.

Güç elektroniği altyapılarının yaygınlaşması ile birlikte hem şebeke modunda hem de ada modunda çalışabilen mikroşebeke sistemlerinin kontrol edilmesi ve enerji yönetiminin sağlanması için hiyerarşik kontrol ve EYS önemli bir gereksinim haline gelmiştir (Beus ve diğ. 2020). Bu bağlamda, koordine edilmiş kontrol, frekans kontrolü ve üçüncül seviye kontrol gibi çeşitli kontrol yöntemleri üzerine çalışmalar yapılmakta ve yeni yöntemler önerilmektedir (Elmouatamid ve diğ. 2020). Bununla birlikte DC mikroşebeke yapılarında gerilim kararlılığı her iki çalışma modunda esneklik sağlamak için önemli araştırmaları gerektirmektedir. Mikroşebekelerde

kullanılan hiyerarşik kontrol yöntemlerinin seviyeleri ve işlevleri Şekil 3.15'te görülmektedir.

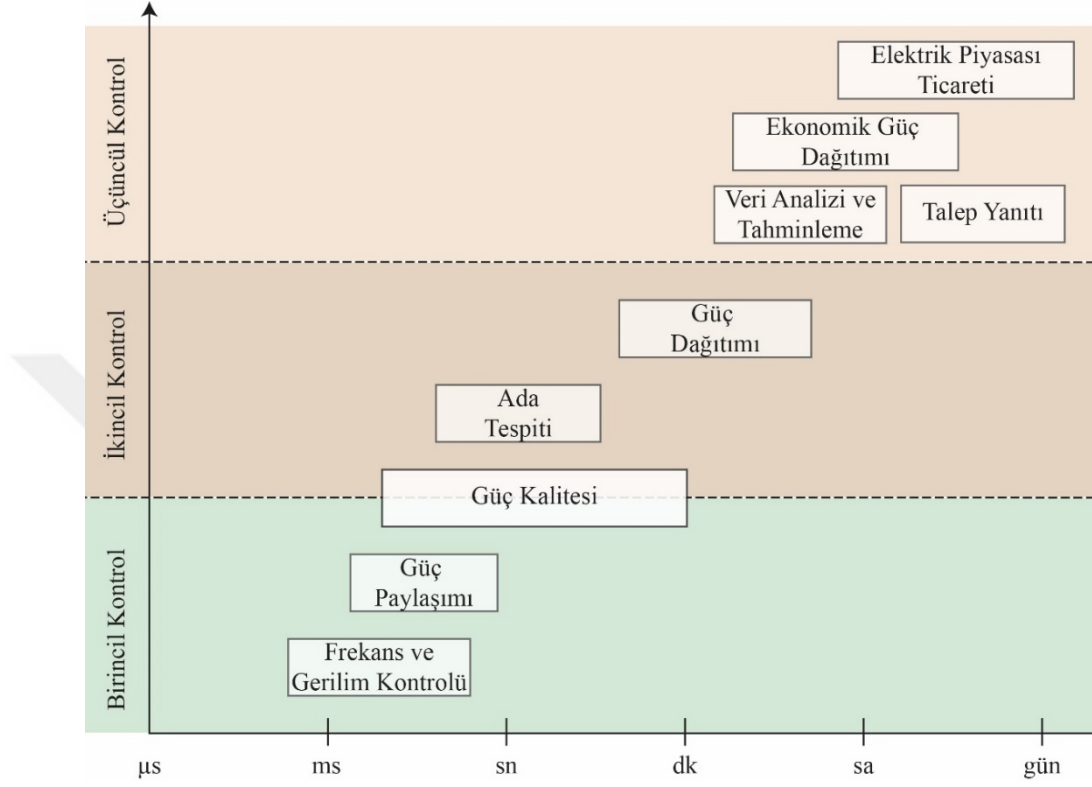


Şekil 3.15: Mikroşebekede hiyerarşik kontrol seviyeleri.

Hiyerarşik kontrol, birincil, ikincil ve üçüncül olmak üzere üç kontrol seviyesinden oluşmaktadır. Hiyerarşik üç seviyeli kontrol yapısında DEK'ler tarafından aktarılabacak güç, alt seviyede bulunan birincil kontrol seviyesinde dönüştürücülerin kontrol edilmesiyle sağlanmaktadır. İkincil kontrol seviyesi, haberleşme ağının kullanılmasıyla bara gerilim restorasyonunun sağlanması ve akım paylaşım doğruluğunun eşzamanlı olarak artırılması için kullanılır. Üçüncül kontrol seviyesinde ise çift yönlü güç akışı, optimum yük paylaşımı ve veri analizi gibi işlemler gerçekleştirilir. Böylece üretim maliyetinin en aza indirilmesi hedeflenir. Mikroşebeke yapısının işletilmesinde temel gerekliliklerin aynı zaman ölçeğinde olmasalar bile paralel olarak yerine getirilmesi sistem kararlılığı ve verimi açısından önemlidir. Kontrol fonksiyonları için farklı zaman ölçekleri Şekil 3.16'da ifade edilmiştir.

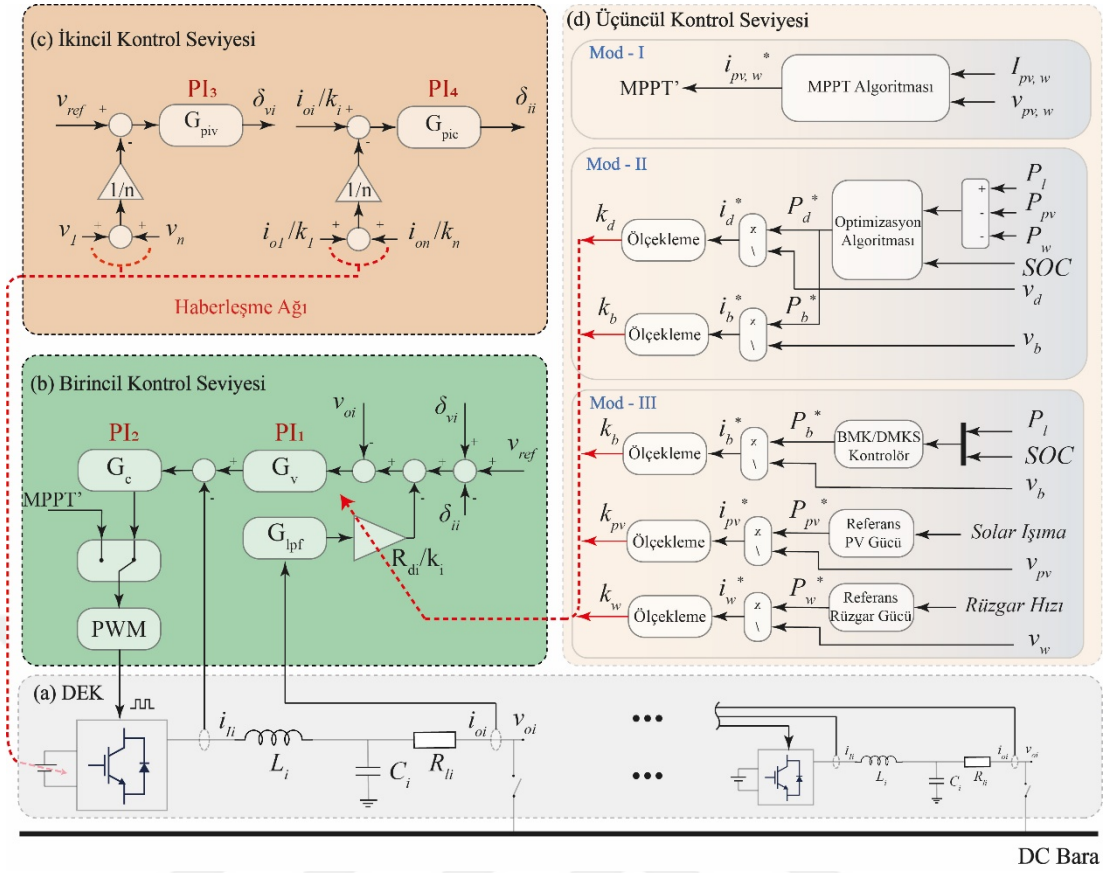
Hiyerarşik mimarinin birincil kontrol seviyesi frekans, gerilim ve güç paylaşımını içermektedir. Güç dönüştürücülerinin hızlı tepkisi nedeniyle, frekans ve gerilim regülasyonu, güç paylaşımı ve ada tespiti hızlı bir şekilde karşılanmaktadır (birkaç milisaniye). İkincil kontrol seviyesi çoğunlukla güç dağıtımı, ada modu tespiti ve güç kalitesi ile ilişkili olup birkaç milisaniyeden bir dakikaya kadar sürebilir.

Üçüncül kontrol seviyesi ise veri analizi ve tahminleme, ekonomik güç dağıtımı, elektrik piyasa ticareti gibi konuları ele almakta olup güç dağıtımı birkaç dakikada çözülebilirken, ekonomik dağıtım ve piyasa katılımı genellikle her birkaç dakikadan birkaç saate kadar uygulanabilir (Yamashita ve diğ. 2020).



Şekil 3.16: Mikroşebeke fonksiyonları için farklı zaman ölçekleri.

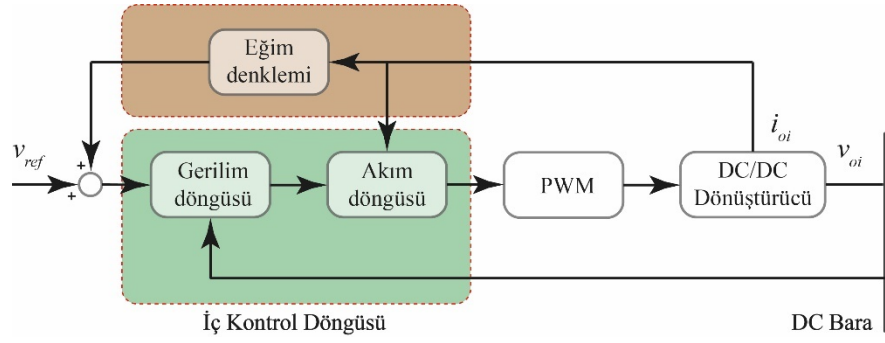
Önerilen hiyerarşik enerji yönetim sisteminin kontrol yapısı Şekil 3.17’de görülmektedir. Hiyerarşik kontrol sürecinin işletilmesinde Şekil 3.17 (a)’da gösterilen yükselten dönüştürücü yapısı kullanılmıştır. Dönüştürücüler arasındaki güç paylaşımı birincil kontrol seviyesinde gerçekleştirilmektedir. Hiyerarşik yapının ikincil kontrol seviyesinde dönüştürücüler arasında gerilim restorasyonu ve akım paylaşım doğruluğunun artırılması ile ilgili süreç işletilmektedir. Üçüncül kontrol seviyesinde ise optimizasyon algoritmaları ve BMK-DMKS kontrolörleri kullanılarak optimum akım paylaşım oranları belirlenir.



Şekil 3.17: Önerilen hiyerarşik enerji yönetim sisteminin kontrol yapısı (a) Dağıtık üretim birimleri (b) Birincil kontrol seviyesi (c) İkincil kontrol seviyesi (d) Üçüncül kontrol seviyesi.

3.6.1 Birincil Kontrol Seviyesi

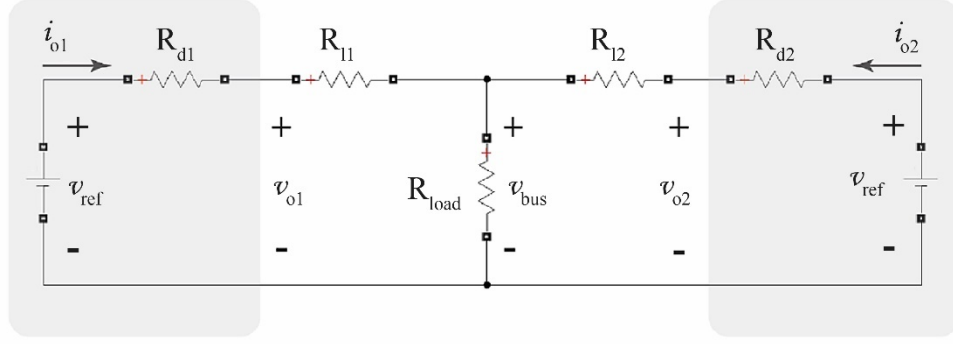
Birincil kontrol, mikroşebekede dahili kontrol olarak anılmakta ve kontrol hiyerarşisinin ilk seviyesini oluşturmaktadır. Bu kontrol yöntemi, mikroşebeke türüne bağlı olarak değişkenlik göstermekle birlikte en kısa tepki süresine sahiptir. Asenkron ve senkron generatörler, güç elektroniği eviricileri ve dönüştürücüleri gibi farklı teknolojilere bağlı olarak kullanılmaktadır. Güç elektroniği sistemleri, senkron ve asenkron generatörlere kıyasla daha esnek bir işletme sağlamaktadır. Birincil kontrolcüler, Şekil 3.18’de görüldüğü gibi genellikle iletişim ihtiyacı olmayan iç kontrol döngüleriyle çalışmaktadır.



Şekil 3.18: Birincil kontrol seviyesi blok diyagramı.

DEK'lerin mikroşebekeye entegrasyonunda gerilim kaynaklı eviriciler ve dönüştürücüler olarak çalışan güç elektroniği sistemleri kullanılmaktadır. Bu dönüştürücü ve eviriciler, mikroşebekeye bağlantı için paralel olarak çalıştırılır. Paralel çalışmada dönüştürücülerde meydana gelen sirkülasyon akımlarının kontrol edilmesi çoğunlukla eğim kontrol yöntemiyle gerçekleştirilir (Zhang ve diğ. 2019). Güç paylaşımı, düşük bant genişliği iletişim gereksinimi ve tak-çalıştır özelliği gibi mikroşebekeye yüksek esneklik sağlaması nedeniyle eğim kontrol yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Birincil kontrol seviyesinde işletilen eğim kontrol yöntemi, mikroşebeke yapılarında yük akımı paylaşımının gerçekleştirilmesi için kullanılan temel yöntemlerden birisidir. Bu yöntemde, dönüştürücü çıkış akımı arttıkça çıkış gerilimini doğrusal olarak azaltarak kontrol sürecini gerçekleştirir. Ancak bu yöntemin iki önemli sınırlaması mevcuttur. İlk sınırlama, eğim kontrollü bir DC mikroşebeke sistemine ait hat direnç faktörü göz önüne alındığında, her bir dönüştürücünün çıkış gerilimi tam olarak eşit olamayacağından dolayı çıkış akımı paylaşma doğruluğu azalır. İkinci sınırlama ise eğim etkisi nedeniyle yük ile DC bara gerilim sapması artar. Geleneksel eğim kontrol yönteminin yukarıda belirtilen iki sınırlaması Şekil 3.19'da görülen iki düğümlü bir DC mikroşebeke üzerinde ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Buradaki her dönüştürücü, Thevenin eşdeğer modeli kullanılarak basitleştirilmiştir. Örneğin birinci DEK için eğim kontrol yöntemine göre çıkış geriliminin ifadesi Denklem (3.8)'de tanımlanmıştır.



Şekil 3.19: İki düğümlü DC mikroşebeke yapısının basitleştirilmiş eşdeğer devre modeli.

$$v_{oi} = v_{ref} - i_{oi} \cdot R_{di} \quad (3.8)$$

Bu denklemde, v_{oi} her bir dönüştürücünün çıkış gerilimini, v_{ref} çıkış geriliminin referans değerini, i_{oi} çıkış akımını, R_{di} sanal direnç değerini temsil etmektedir. Ayrıca $i = 1,2$ şeklinde tanımlanır. Denklem (3.8)'e göre DC gerilim ve akım arasındaki ilişki göz önüne alındığında, Thevenin eşdeğer devre modelindeki çıkış direncinin değeri, sanal direnç değerine ve modeldeki gerilim kaynağının çıkış gerilimi de v_{ref} gerilim değerine eşittir. Bu kontrol işlemi sanal bir direnç vasıtasıyla uygulanır. Şekil 3.19'daki eşdeğer devre modeline göre bara gerilimi Denklem (3.9) ve Denklem (3.10)'da ifade edilmiştir.

$$v_{bus} = v_{ref} - i_{o1} \cdot R_{d1} - i_{o1} \cdot R_{l1} \quad (3.9)$$

$$v_{bus} = v_{ref} - i_{o2} \cdot R_{d2} - i_{o2} \cdot R_{l2} \quad (3.10)$$

Bu denklemlerde v_{bus} DC bara gerilim değerini ve R_{l1} ve R_{l2} hat dirençlerini temsil etmektedir. Denklem (3.9) ve Denklem (3.10) kullanılarak, çıkış akımlarının oranını ifade eden Denklem (3.11) elde edilir (Lu ve diğ. 2014).

$$\frac{i_{o1}}{i_{o2}} = \frac{R_{d2}}{R_{d1}} + \frac{R_{l2} - R_{d2}/R_{d1} \cdot R_{l1}}{R_{d1} + R_{l1}} \quad (3.11)$$

Geleneksel eğim kontrollü DC mikroşebekede, her bir dönüştürücünün DC çıkış akımı, sanal direncinin tersi oranında ayarlanır. Denklem (3.11)'den çıkarılan sonuca göre, Denklem (3.12)'nin sağlanamadığı sürece akım paylaşım hatasının tamamen ortadan kaldırılamayacağını gösterir.

$$\frac{R_{d1}}{R_{d2}} = \frac{R_{l1}}{R_{l2}} \quad (3.12)$$

Genellikle DC mikroşebekelerde sistemin küçük olması nedeniyle hat dirençleri de küçük bir değere sahip olduğu varsayılır. Buna göre $R_{d1} \gg R_{l1}$ ve $R_{d2} \gg R_{l2}$ olduğundan ve $R_{d1} = R_{d2}$ olarak seçilirse Denklem (3.9) ve Denklem (3.10), Denklem (3.13)'teki gibi sadeleştirilebilir.

$$\frac{i_{o1}}{i_{o2}} = \frac{R_{d2} + R_{l2}}{R_{d1} + R_{l1}} \approx \frac{R_{d2}}{R_{d1}} \quad (3.13)$$

Yukarıda bahsedilen hat dirençlerinin küçük olması varsayımı büyük bir mikroşebeke için geçerli değildir. Bu durum, geleneksel eğim kontrol yönteminin sınırlamalarından biridir. Tekrar hatırlanacak olursa, eğim yöntemine göre herhangi bir DEK'in çıkış geriliminin ifadesi Denklem (3.14) ile tanımlanır. Burada Δv_{oi} , DC gerilim sapmasını ifade etmekte olup Denklem (3.15)'te tanımlanmıştır.

$$v_{oi} = v_{ref} - \Delta v_{oi} \quad (3.14)$$

$$\Delta v_{oi} = i_{oi} \cdot R_{di} \quad (3.15)$$

Her bir DEK'e bağlı güç dönüştürücüsü açık devre durumunda çalıştığında, DC gerilim sapması sıfır olacaktır. Ancak dönüştürücü akımının sıfır olmadığı durumlarda DC gerilim sapması meydana gelir ve bu değer yük akımı ile değişir. Gerilim sapması, maksimum kabul edilebilir değerini aşmaması için eğim katsayısı R_{di} 'nin Denklem (3.16)'da ifade edildiği gibi sınırlandırılması gerekmektedir. Bu durumda çıkış gerilim sapması geleneksel eğim kontrol yönteminin ikinci bir kısıtıdır.

$$R_{di} \leq \frac{\Delta v_{oi_{max}}}{i_{oi_{max}}} \quad (3.16)$$

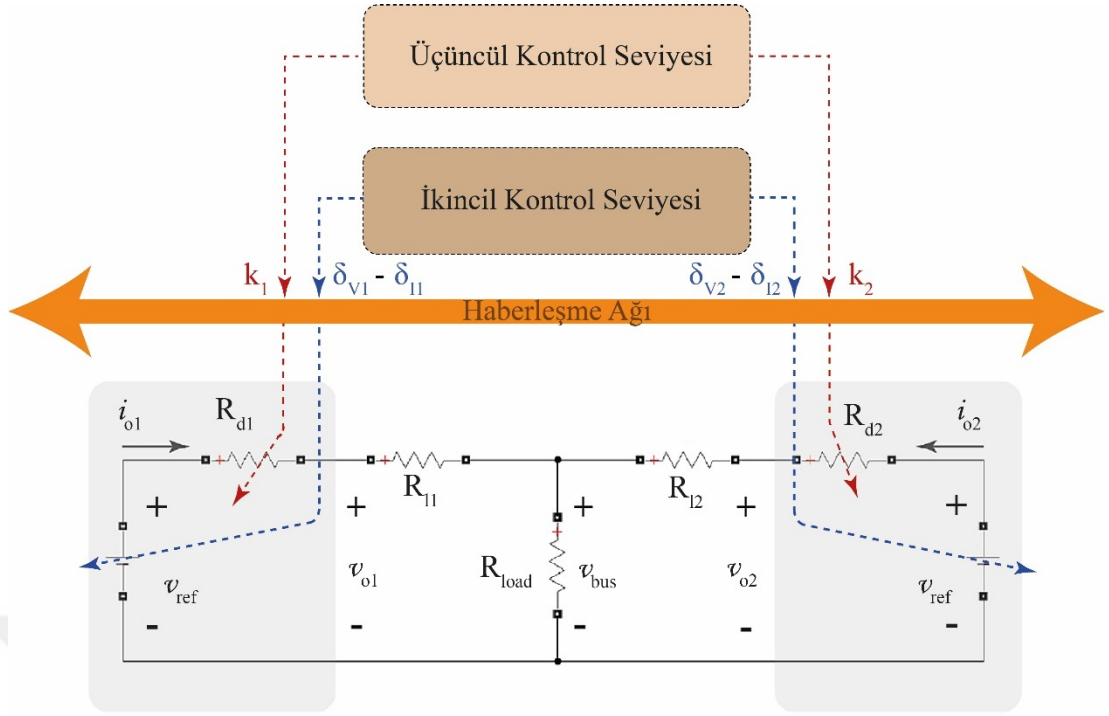
3.6.2 İkincil Kontrol Seviyesi

Güç dönüştürücülerinin paralel çalışması için kullanılan eğim kontrol yöntemi, her bir modülün çıkış akımının çıkış gerilimine oranıdır. Düşük gerilimli yüksek akımlı sistemlerin gerilim regülasyonu uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Bu

sistemlerde geleneksel eğim kontrol yöntemi, akım paylaşımı ve gerilim regülasyonu arasında bir tercih yapılmasını zorunlu kılar. Bir önceki başlıkta ifade edildiği gibi bu yöntemin iki sınırlaması vardır. Birincisi, eğim kontrollü bir DC mikroşebekede hat direnci dikkate alındığında, her dönüştürücünün çıkış gerilimi tam olarak aynı olamayacağından, çıkış akımı paylaşma doğruluğu düşer. İkincisi, eğim etkisi nedeniyle yük ile DC bara gerilim sapması artar. Tüm bu nedenlerden dolayı mikroşebekedeki nominal gerilim seviyelerini sağlamak için harici bir kontrol döngüsü olan ikincil kontrol sisteme dahil edilmelidir.

İkincil kontrol, sistem performansını artırmak ve mikroşebeke güç kalitesini iyileştirmek için kullanılır. Bu kontrol yöntemi hem dağıtık hem de merkezi kontrol yapılarında işletilmektedir. Şebeke modunda, dağıtık üreticiler ve eviriciler şebeke gerilim ve frekans bileşenlerini referans elektrik sinyalleri olarak kullanır. Ancak ada modunda, dağıtık üreticiler ana şebeke tarafından sağlanan referans sinyallerini kaybederler. Bu durumda, eşzamanlı çalışma tek veya çoklu işletme yöntemleri kullanılarak koordine edilir. İkincil kontrolcüler, dağıtık üreticilerin veya eviricilerin paralel çalışma performanslarını iyileştirmek için gerekli olan çeşitli kontrol mekanizmalarını içerir. Mikroşebekelerde arayüz olarak kullanılan güç dönüştürücülerinin master/slave, akım/güç paylaşımı ve frekans/gerilim eğim kontrolü gibi çeşitli yöntemlerle kontrol edilmesi ve eşzamanlı olarak çalıştırılmasını sağlar (Chaudhary ve diğ. 2021).

Geleneksel eğim kontrol yönteminin akım paylaşım doğruluğu ve DC bara geriliminin restorasyonu sınırlamalarının üstesinden gelmek için uyarlanabilir eğim kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, farklı dönüştürücülerin çıkış gerilimleri ve akımları, düşük bant genişliğine sahip haberleşme ağı kullanılarak diğer dönüştürücülere aktarılır. Uyarlanabilir eğim kontrol yöntemine ait konfigürasyon Şekil 3.20’de gösterilmektedir. Bu yöntem, geleneksel eğim kontrol yöntemini kullanarak yaklaşık olarak orantılı bir yük akım paylaşımı elde eder.



Şekil 3.20: Uyarlanabilir eğim kontrol yöntemi için iki düğümlü DC mikroşebeke yapısının eşdeğer devre modeli.

Uyarlanabilir eğim kontrol yönteminin gerçekleştirilmesi için dönüştürücü akım paylaşım oranı (k_i) tanımlanmıştır. DC yük akımının oransal paylaşımını sağlamak için Denklem (3.17)'deki gibi ayarlanmalıdır.

$$\frac{i_{o1}}{i_{o2}} = \frac{k_1}{k_2} \quad (3.17)$$

Denklemde k_1 ve k_2 , sırasıyla 1. ve 2. dönüştürücünün akım paylaşım oranlarını temsil etmektedir. Böylece dönüştürücü çıkışından elde edilen akım değeri optimizasyon algoritmalarının işletilmesiyle elde edilecek optimum akım paylaşım oranı ile doğrudan ilişkili olduğu söylenebilir.

Bu tez çalışmasında önerilen hiyerarşik birincil, ikincil ve üçüncül kontrol seviyeleri arasındaki koordinasyon Şekil 3.17'de görülmektedir. Birincil kontrol seviyesinde bulunan her bir yerel kontrol sistemi için gerilim ve akım PI kontrolörleri kullanılmaktadır (bkz. Şekil 3.17 (b)). Bu kontrol parametreleri sırasıyla, $k_{p1} = 0,5$, $k_{i1} = 100$, $k_{p2} = 0,035$, $k_{i2} = 10$ olarak hesaplanmıştır. Tüm hesaplamalar ve kontrolörler yerel olarak gerçekleştirilir. Bu nedenle uyarlanabilir eğim kontrol yöntemi, merkezi olmayan bir kontrol türüdür. DC mikroşebekenin dağıtık kontrolü

için uygun bir çözümdür. Hiyerarşik yapının birincil kontrol seviyesinde yerel gerilim döngüsü Denklem (3.18) ile ifade edilir.

$$G_{vc} = \frac{G_v G_c}{1 + G_v G_c} \quad (3.18)$$

Denklemde G_{vc} gerilim döngüsünü, G_v yerel gerilim PI kontrolörü ve G_c yerel akım PI kontrolörünün transfer fonksiyonlarını temsil etmektedir. Eğim kontrol yöntemindeki çıkış akımı için ω_c kesim frekansına sahip alçak geçiren filtrenin transfer fonksiyonu Denklem (3.19) ile ifade edilir.

$$G_{lpf} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (3.19)$$

Birincil kontrol döngüsü, güç paylaşımını ve kararlı çalışmayı sağlamaktadır. Ancak Denklem (3.8)'deki geleneksel eğim kontrolörünün işletilmesi durumunda yük akımına bağlı olarak gerilim saptması meydana gelmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için ortalama gerilim ve akım kontrolü uygulanmaktadır. İkincil kontrol seviyesinde bulunan ortalama gerilim kontrolörleri, v_{ref} referans değerini kullanarak DC geriliminin ortalamasını kontrol eder. Bu sayede her bir çıkış gerilimi, referans değerine restore edilir. Benzer şekilde, her bir ortalama akım kontrolörü için referans değeri i_{oi}/k_i 'dir. Bu şekilde, i_{o1}/k_1 ve i_{o2}/k_2 'nin ortalaması geri besleme değişkeni olarak kullanılarak orantılı bir çıkış akım paylaşımı sağlanır. k_i akım paylaşım oranlarının eşit olması durumunda, her bir dönüştürücünün paylaştığı akım oranı da eşit olacaktır. Bu kontrolde DC şebeke gerilimi ölçülerek istenen gerilim değeri v_{ref} ile karşılaştırılmaktadır. Gerilim hatası, her dönüştürücü referansı için (3.20) ve (3.21) denklemlerinde verilen δ_v ve δ_i restorasyon parametreleri hesaplanmaktadır.

$$\delta_{v_i} = \left(v_{ref} - \frac{v_1 + \dots + v_n}{n} \right) \cdot \left(k_{p3} + \frac{k_{i3}}{s} \right) \quad (3.20)$$

$$\delta_{i_i} = \left(\frac{i_{oi}}{k_i} - \frac{i_{o1}/k_1 + \dots + i_{on}/k_n}{n} \right) \cdot \left(k_{p4} + \frac{k_{i4}}{s} \right) \quad (3.21)$$

Denklemlerde δ_{v_i} ortalama gerilim PI restorasyon parametresini, δ_{i_i} ortalama akım PI restorasyon parametresini, n mikroşebeke sistemini oluşturan DEK'lerin sayısını ve $i, i.$ dağıtık üretim birimini temsil etmektedir. Bu kontrolör parametreleri

sırasıyla, $k_{p_3} = 2, k_{i_3} = 100, k_{p_4} = 2, k_{i_4} = 50$ olarak hesaplanmıştır. Bu durumda her bir dönüştürücünün çıkış gerilimi v_{oi} Denklem (3.22) ile ifade edilir.

$$v_{oi} = [v_{ref} + \delta_{v_i} - \delta_{i_i} - R_{di}/k_i \cdot G_{lpf} i_{oi}] \cdot G_{vc} \quad (3.22)$$

3.6.3 Üçüncül Kontrol Seviyesi

Üçüncül kontrol seviyesi, hiyerarşik kontrol sistemlerinde kullanılan ve birbirine bağlı mikroşebekelerin koordinasyonunu sağlayan bir kontrol sistemidir. Bu kontrol sistemleri, mikroşebekenin ana şebeke ve diğer mikroşebekelerle haberleşme ağını kullanarak güç alış-verişi gibi görevleri yerine getirmesine yardımcı olur. Ayrıca bu kontrolcüler, mikroşebeke ile komşu şebekeler arasında güç alış-verişi ve ekonomik kontrol için gerekli olan enerji yönetimini gerçekleştirir.

Mikroşebeke kontrolcüsü, mikroşebeke ile ana şebeke arasındaki ara birimi oluşturur. Yük atma, güç akış kontrolü, hata seviyesi kontrolü, piyasa işletmesi, yeniden bağlanma ve bağlantı kesilmesi gibi mikroşebeke birim işlemlerini gerçekleştirir. Bu kontrolcü, yerel olarak elde ettiği bilgileri kullanarak çıkış gücünün sınır değerlerini ayarlar. Bu sayede, mikroşebeke sistemi daha verimli bir şekilde çalışabilir ve güç yönetimi daha etkili hale getirilebilir.

Üçüncül kontrolcü, bir mikroşebekede birçok görevi yerine getirir. Bunlar arasında, dağıtım fiderlerinden ve DEK'lerden optimum üretim planlaması bilgilerini kullanarak mikroşebekenin üretim güvenliğini ve sürdürülebilirliğini sağlar. Ayrıca diğer mikroşebekelere ve dağıtım fiderlerine aktif ve reaktif güç satarak ya da satın alarak piyasa faaliyetlerine katkı sağlar. Benzer şekilde enerji transferi, talep tarafı yönetimi, güvenlik kontrolleri, ekonomik planlama ile yük ve hava koşullarının kestirimi gibi temel fonksiyonları yerine getirir (Vandoorn ve diğ. 2013).

Mikroşebeke yapısında kullanılan üçüncül kontrolcü üretim planlama optimizasyonu, enerji dengesizliklerinin kompanzasyonu ve rezerv yönetimi gibi işlevleri de yerine getirir. Mikroşebekeler aynı zamanda, merkezî kontrolcü tarafından koordine edilen çeşitli yardımcı servisler kullanılarak, ana şebekenin performansında iyileştirmeler yapabilir. Bu servisler genellikle enerji yönetim sistemlerinin

mikroşebeke ile entegrasyonunu sağlar. Bu durumlarda, işlevsel rezerv yönetme yeteneği, bütün sistemin frekans regülasyonu, aşırı yüklenmenin önlenmesi ve günlük yenilenebilir enerji çevrimlerinin yönetimi gibi faaliyetler genel kontrol tarafından sağlanır. Bu şekilde üçüncül kontrolcü, mikroşebekenin etkin bir şekilde yönetilmesine yardımcı olur (Palizban ve Kauhaniemi 2015).

Bu tez çalışmasında, DEK'ler arasındaki optimum gücün dağıtılması ve kaynaklar arasında en uygun geçişin sağlanmasında aktif rol oynayan üçüncül kontrol seviyesi tasarlanmıştır (bkz. Şekil 3.17 (d)). Bu kontrol seviyesinde, DEK'lere ait i_d^* , i_b^* , i_{pv}^* ve i_w^* referans akımları önerilen stratejiye göre elde edilmiştir. Ancak bu parametrelerin sistem kontrolünde kullanılabilmesi için doğrusal olarak önceden tanımlanmış alt ve üst sınırlara ölçeklendirilmesi gerekmektedir (Singh ve Singh 2020). Bu nedenle referans akım verisi, yaygın olarak kullanılan minimum-maksimum değere dayalı normalizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Normalizasyon işleminden elde edilen k_i akım paylaşım oranı, haberleşme ağı üzerinden birincil kontrol seviyesindeki yerel kontrolörlere aktarılır. Böylece her bir üretim biriminin eğim katsayısı k_i parametresi ile güncellenir. Verinin her bir $y_{j,n}$ örneği, Denklem (3.23) kullanılarak $[0,35-3]$ aralığında normalize edilmiş $y'_{j,n}$ değerine dönüştürülür.

$$y'_{j,n} = \frac{y_{j,n} - \min(y_j)}{\max(y_j) - \min(y_j)} (nMax - nMin) + nMin \quad (3.23)$$

Burada $\min$ ve $\max$ sırasıyla i_{th} akım verisinin minimum ve maksimum değerini, $nMin$ ve $nMax$ sırasıyla her bir akım referansının alt ve üst sınırlarını temsil etmektedir.

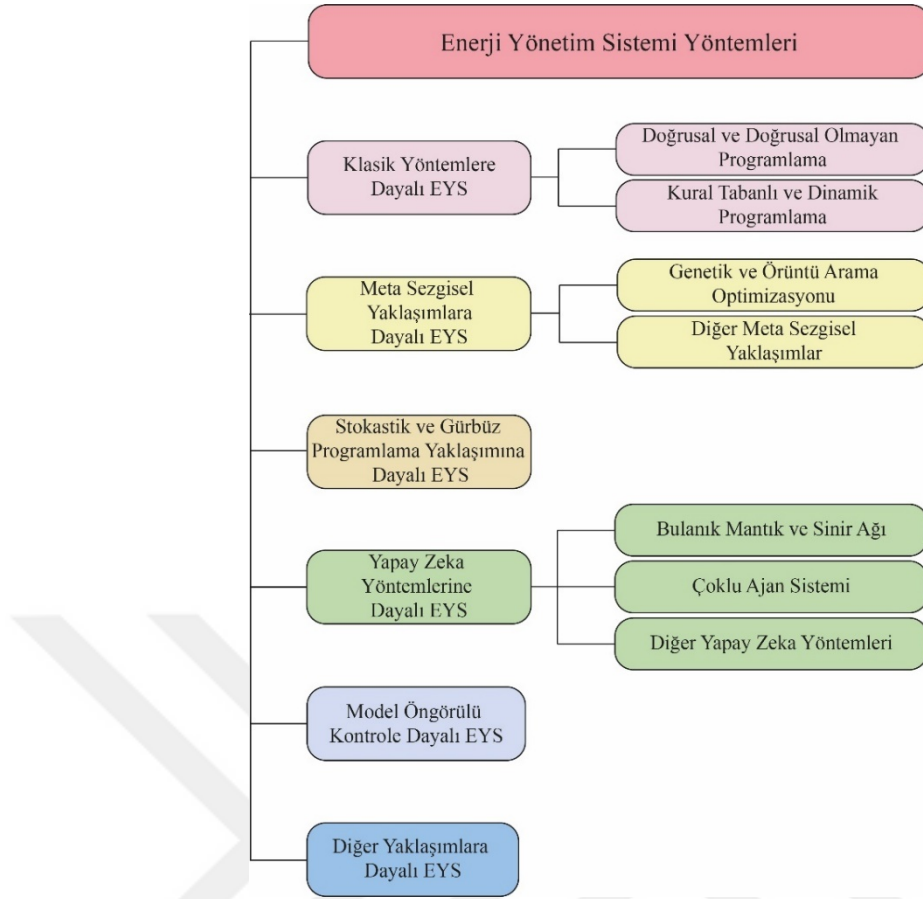
4. DC MİKROŞEBEKEDE ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ

4.1 Enerji Yönetim Sistemlerine Genel Bakış

Mikroşebeke yapılarında EYS, sistemdeki enerji tüketimini kontrol etmek, enerji kaynaklarını yönetmek ve enerji depolama sistemleriyle entegre olmak için kullanılır. EYS, sistemdeki enerji talebinin tespit edilmesi ve buna göre enerji kaynaklarının yönetilmesiyle gerçekleştirilir. Bu sayede, enerjinin optimum bir şekilde kullanılması ve tüketicilere yeterli miktarda enerjinin sağlanması hedeflenir. Aynı zamanda EYS, mikroşebeke sistemlerinde EDS'nin kullanımını da içerir. Bu depolama sistemleri, enerji talebi düşükken fazla enerjinin depolanması ve talep yüksekken depolanan enerjinin kullanılması için tasarlanır. Bu sayede enerji kaynaklarının daha etkili bir şekilde kullanılması sağlanır.

Mikroşebeke sistemleri, enerji verimliliğini artırmak ve YEK'leri kullanarak enerji üretimini çeşitlendirmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu sistemler, birden fazla enerji kaynağından (FV, RT, hidroelektrik vb.) enerji üretir ve tüketim ihtiyaçlarını karşılamak üzere tüketicilere dağıtır. Ancak bu sistemlerin verimli bir şekilde çalışması, EYS'nin doğru bir şekilde yapılmasına bağlıdır. Bu nedenle, yüksek sistem güvenilirliği ve operasyonel verimlilik elde etmek için optimum bir enerji yönetimi gereklidir (Thirunavukkarasu ve diğ. 2022).

Literatür incelemesine dayalı olarak farklı EYS yöntemleri Şekil 4.1'de özetlenmektedir. Mikroşebeke yapılarında güç paylaşımının gerçekleştirilmesinde uyarlanabilir sanal empedans, konsensus tabanlı, ajan tabanlı, programlama algoritmaları gibi kontrol teknikleri kullanılmaktadır (Rosini ve diğ. 2021). Benzer şekilde enerji yönetiminde ise klasik yöntemler, meta sezgisel yaklaşımlar, stokastik ve gürbüz programlama yaklaşımları, yapay zeka yöntemleri ve model öngörülü kontrol gibi EYS yöntemleri kullanılmaktadır (Jamal ve diğ. 2021).

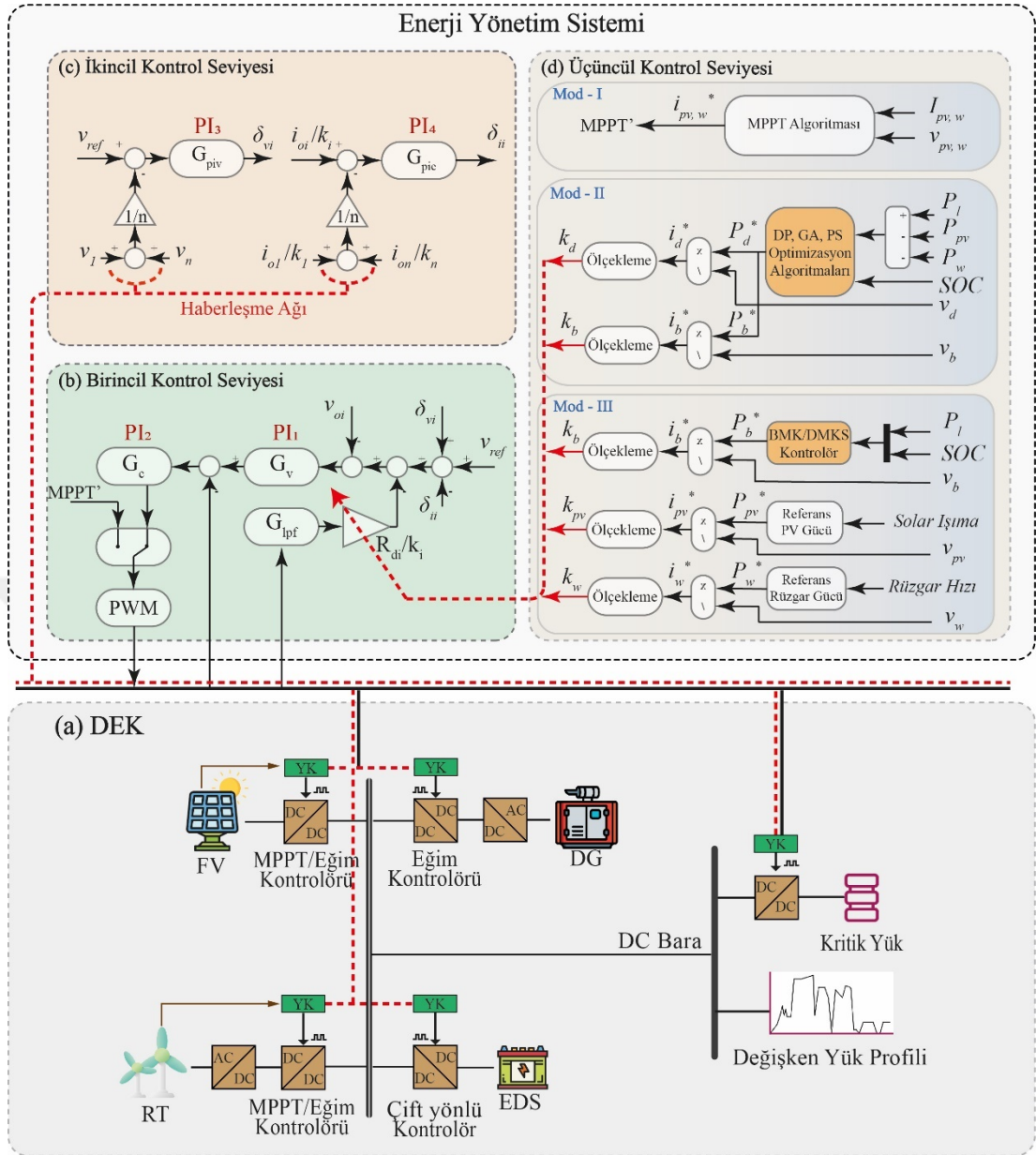


Şekil 4.1: Mikroşebeke yapılarında kullanılan enerji yönetim sistemi teknikleri.

Bir EYS, güç dengesinin sürdürülmesi ve bara gerilim kararlılığı gibi kontrol hedeflerini karşılamalı, EDS'yi aşırı şarj ve derin deşarjdan korumalı, değişen çevre koşulları altında YEK'lerden tam olarak yararlanmalı, yakıt tüketimini minimize etmeli ve üretim sistemlerinin verimliliğini iyileştirmelidir (Han ve diğ. 2019a).

4.2 Önerilen Enerji Yönetim Sistemi

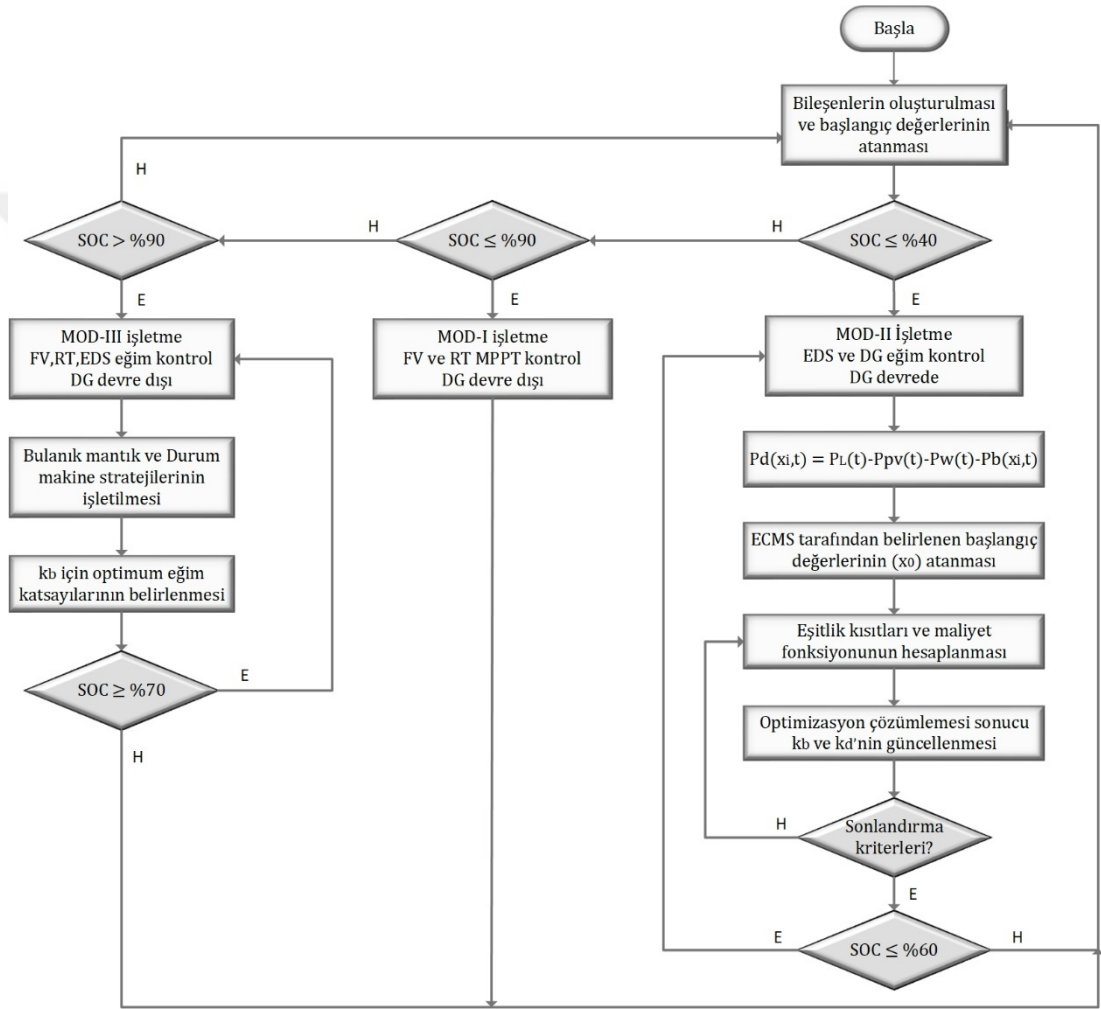
Mikroşebeke sistemlerinde güç kontrolünü gerçekleştirmek için tak-çalıştır yeteneği olan ve daha güvenilir çözümler sunan eğim tabanlı kontrol yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu avantajlardan dolayı tez çalışmasında uyarlanabilir eğim kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Uyarlanabilir eğim katsayılarının belirlenmesinde etkin bir rol oynayan EYS, DEK'lerin servis ömrünü, yakıt ekonomisini, sistem kararlılığını ve dinamik performansını artırarak birçok olumlu katkı sağlamaktadır. Önerilen hiyerarşik EYS'ye ilişkin prensip şema Şekil 4.2'de sunulmuştur. Hiyerarşik EYS, birincil, ikincil ve üçüncül olmak üzere üç kontrol seviyesinden oluşmaktadır.



Şekil 4.2: Önerilen DC mikroşebekenin EYS yapısı (a) Dağıtık üretim birimleri (b) Birincil kontrol seviyesi (c) İkincil kontrol seviyesi (d) Üçüncül kontrol seviyesi.

Şekil 4.2 (b)'de gösterilen birincil kontrol seviyesinde, akım ve gerilim iç kontrol döngüleri ve eğim kontrolörü işletilmekte, ayrıca MPPT ve eğim kontrol geçişleri bu katmanda gerçekleştirilmektedir. İkincil kontrol seviyesi, DC bara gerilim restorasyonunu sağlamak ve akım paylaşım doğruluğunu eşzamanlı olarak arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanılan kontrol algoritması Şekil 4.2 (c)'de gösterilmiştir. Şekil 4.2 (d)'de görülen üçüncül kontrol seviyesinde ise optimum yük paylaşımı gerçekleştirilerek üretim maliyetinin en aza indirilmesi hedeflenmektedir. DC mikroşebeke yapısında optimum yük paylaşımını gerçekleştirmek ve mevcut enerji kaynaklarını en uygun şekilde kullanabilmek amacıyla, optimizasyon

algoritmalarına dayalı ECMS, bulanık mantık ve DMKS tabanlı EYS yöntemleri önerilmiştir. Otomatik operasyon modları talep edilen yük, EDS'nin şarj durumu ve YEK'lerin üretim kapasiteleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Önerilen EYS'ye ilişkin akış şeması Şekil 4.3'te verilmiştir. Sistemin kontrol yapısında Mod-I, Mod-II ve Mod-III olmak üzere üç çalışma stratejisi içermektedir. Mod-I'de YEK'lerin MPPT operasyonda çalışması sağlanırken, Mod-II'de optimizasyon algoritmaları kullanılır. Mod-III'te ise bulanık mantık ve deterministik yöntemle dayalı DMKS uygulanır.



Şekil 4.3: Enerji yönetim stratejisinin akış diyagramı.

Mikroşebeke sistemi çalıştırıldığında, ilk olarak EDS'nin SOC seviyesi kontrol edilir. Eğer EDS'nin SOC seviyesi %40 ile %90 arasındaysa, Mod-I işletme durumunu ifade eder. Böylelikle talep edilen güç, YEK'lerin MPPT modunda çalıştırılmasıyla karşılanır. Mod-II işletmede, EDS'nin SOC seviyesi %40'ın altına düşmesi durumunda DG, EYS tarafından devreye alınarak güç paylaşımını destekleyerek gerekli yük talebini karşılar. Bu aşamada, DG ve EDS arasında yakıt minimizasyonu

gerçekleştirilir. DP, GA ve PS optimizasyon algoritmalarına dayalı ECMS kullanılarak, DG minimum yakıt tüketiminde çalıştırılır. EDS'nin SOC seviyesi %90'ın üzerine çıkarsa, Mod-III işletmesine geçilir. Bu durumda YEK ve EDS birimleri, DC mikroşebeke sisteminin gerilim kararlılığının korunması gerekliliğinden eğim kontrol modunda işletilir. YEK'lerin akım paylaşım oranı hava şartlarına bağlıdır, EDS'nin akım paylaşım oranı ise bulanık mantık ve DMKS kontrolörleri tarafından belirlenir. Tez çalışmasında kullanılan optimizasyon algoritmaları, alt başlıklarda detaylı bir şekilde açıklanarak, BMK ve DMKS hakkında ayrıntılı bilgiler sunulmuştur.

4.3 Eşdeğer Tüketim Minimizasyonu Stratejisi

ECMS, ilk olarak 1999 yılında Paganelli tarafından tanıtılmıştır. Bu yöntem, tümleşik minimizasyon problemini gerçek enerji akışına dayalı argümanlar kullanarak her an için yalnızca anlık minimizasyon problemlerine indirgemek için geliştirilmiştir (Paganelli 1999). Eşdeğer yakıt tüketimi hesaplamasının matematiksel modelinde, Pontryagin'in minimum prensibi kullanılarak analitik bir çözüm elde edilebilir. Bu çözüm, kontrol teorisi alanında kullanılan bir prensip olup, kontrol sistemlerinin en uygun kontrol stratejisini belirlemek için kullanılır. Analitik çözüm sayesinde, kontrol stratejisinin matematiksel ifadesi Denklem (4.1) ile elde edilerek eşdeğer yakıt tüketim parametreleri optimize edilebilir (Onori ve diğ. 2016).

$$P_{eqv}(t) = P_{fuel}(t) + \lambda(t) \cdot P_b(t) \quad (4.1)$$

Denklemde $P_{eqv}(t)$ yakıt tüketimine eşdeğer gücü, $P_b(t)$ batarya elektrokimyasal gücünü, $P_{fuel}(t)$ yakıt akış hızına eşdeğer gücü, $\lambda(t)$ batarya gücünü yakıt gücüne dönüştüren ağırlık faktörünü ifade etmektedir. ECMS, hibrit bir araç üzerinde anlık olarak en düşük yakıt tüketiminin elde edilmesi durumunda, tüm seyahat boyunca en düşük yakıt tüketiminin elde edileceği kabulü üzerine kurulu global minimizasyon stratejisidir (Dong ve diğ. 2020; Zhang ve diğ. 2017). Bir çalışmada, YP içeren hibrit bir mikroşebeke sisteminde hidrojen tüketimini en aza indirmek amacıyla ECMS kullanılmıştır (Han ve diğ. 2019b).

Bu tez çalışmasında, ECMS kullanılarak DC mikroşebeke yapısındaki DG'nin yakıt tüketiminin en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Önerilen yöntemde, eşdeğerlik faktörü hesaplanarak, EDS ve DG arasındaki güç paylaşımı gerçekleştirilir. Eşdeğerlik faktörü, belirlenen örnekleme zamanlarında yeniden hesaplanmalıdır. Böylece örnekleme süresi içinde anlık yakıt tüketiminin en aza indirilmesi sağlanır. Burada, önerilen DC mikroşebekede DP, GA ve PS'ye dayalı ECMS kullanılmıştır.

4.3.1 Doğrusal Optimizasyon

Doğrusal optimizasyon probleminde amaç fonksiyonu ve kısıt fonksiyonları doğrusaldır. Üretim planlama, rafineri yönetimi, finansal ve ekonomik planlama, iş gücü planlaması, tarımsal ve gıda planlamaları, ulaştırma veya dağıtım problemleri, yatırım planlaması, arazi kullanımı gibi pek çok uygulama alanında karşımıza çıkmaktadır. DP problemlerinin en iyi çözümü, uygun çözüm bölgesinin bir köşesinde yer almaktadır. Bu nedenle, çözümleme işlemi uygun bir köşeden başlatılır. Eğer bu köşe en iyi çözümü sağlamıyorsa, amaç fonksiyonunu iyileştiren veya aynı düzeyde bırakan başka bir komşu köşeye geçilir. Bu işlem, problemin en iyi çözümü bulununcaya kadar devam eder.

DP, matematiksel modellerin optimize edilmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. DP problemleri, bir dizi doğrusal kısıtın altında bir amaç fonksiyonunun maksimum veya minimum değerini bulmak için kullanılır. Bu problemler, doğrusal denklemler ve eşitsizlikler yardımıyla ifade edilirler. Bu bağlamda minimize etmek istediğimiz amaç fonksiyonu $f(x)$ olsun. Bu amaç fonksiyonu kısıtlara bağlı olarak Denklem (4.2)'deki gibi tanımlanır.

$$\min_x f(x) = c^T x \quad \begin{cases} Ax \leq b \\ A_{eq}x = b_{eq} \\ l_b \leq x \leq u_b \end{cases} \quad (4.2)$$

Denklemde A matrisi, x değişkenlerinin kısıtlarını ifade eden $m \times n$ boyutunda bir matristir. b vektörü A matrisinin eşitsizliklerinde sağlanması gereken sınır değerlerini ifade eden $m \times 1$ boyutunda bir matristir. c , eşitlik kısıtlarını ifade eden $n \times 1$ boyutlu bir matristir. A_{eq} matrisi ve b_{eq} vektörü lineer eşitlik kısıtları, l_b ve u_b vektörleri alt ve üst sınır değerleri temsil etmektedir. Doğrusal programlamanın temel

çözüm sayısı, uygun çözüm bölgesindeki köşelerin sayısıdır. Bu sayı, uygun çözüm bölgesinin boyutu (n) ve kısıtlama sayısı (m) arasındaki ilişkiyle belirlenir ve Denklem (4.3) ile ifade edilir (Tezel Özturan 2019).

$$\binom{n}{m} = \frac{n!}{m!(n-m)!} \quad (4.3)$$

ECMS'nin örnekleme zamanlarında, EDS ve DG arasında eşdeğerlik faktörü hesaplanır. Bu süre içerisinde anlık yakıt tüketiminin en aza indirilmesi sağlanır. ECMS, DG'deki yakıt tüketiminin azaltılması amacıyla Denklem (4.4)'te verilen maliyet fonksiyonu ve sınır koşullarını kullanır (Han ve diğ. 2019a).

$$\min_x f(x) = (P_d + \alpha P_b) \cdot \Delta T \begin{cases} SOC_{min}^d \leq SOC \leq SOC_{max}^d \\ P_b^{min} \leq P_b \leq P_b^{max} \\ P_d^{min} \leq P_d \leq P_d^{max} \\ 0 \leq \alpha \leq 2 \end{cases} \quad (4.4)$$

Denklemde P_d DG'nin gerçek yakıt tüketimini, P_b batarya eşdeğer yakıt tüketimini, P_b^{min} ve P_b^{max} sırasıyla bataryanın maksimum şarj gücü ve maksimum deşarj gücünü temsil etmektedir. P_d^{min} ve P_d^{max} sırasıyla DG sisteminin minimum ve maksimum işletme güçlerini, SOC_{min}^d ve SOC_{max}^d sırasıyla ECMS'nin işletilmesi sırasında batarya minimum ve maksimum şarj seviyelerini, α lineer ceza katsayısını ve ΔT ise örnekleme zamanını ifade eder. Eşitlik kısıtları, Denklem (4.5) ve Denklem (4.6)'da ifade edilmiştir.

$$\alpha = 1 - 2\mu \frac{[SOC - 0.5(SOC_{max}^d + SOC_{min}^d)]}{SOC_{max}^d + SOC_{min}^d} \quad (4.5)$$

$$P_l = P_d + P_b + P_{pv} + P_w \quad (4.6)$$

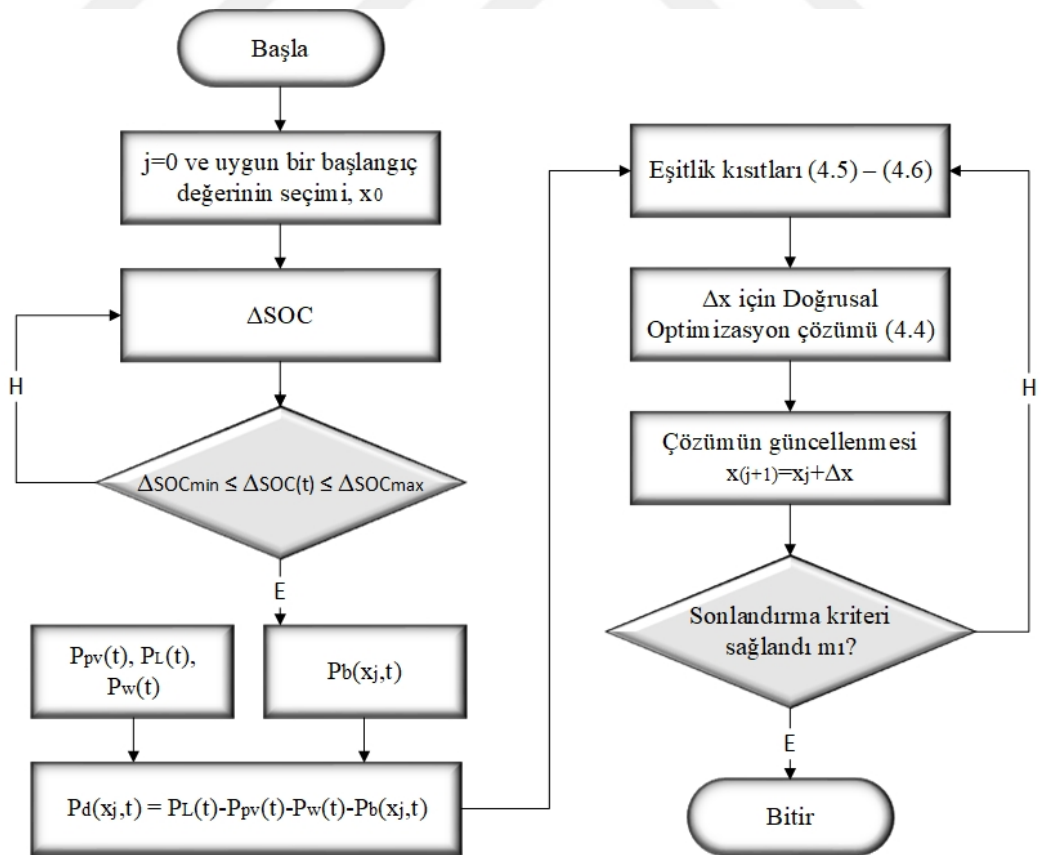
Denklemde P_l, P_{pv}, P_w sırasıyla talep gücü, FV tarafından üretilen gücü ve RT tarafından üretilen gücü ifade etmektedir. μ ise denge katsayısını temsil etmektedir. μ , batarya şarj seviyesinin efektif kontrolü için 0,6 olarak belirtilmiştir. Bataryanın SOC seviyesi dikkate alınarak Denklem (4.4) ve Denklem (4.5) yardımıyla P_d^* optimum referans gücü hesaplanır. Bu değer talep güçten çıkarılmasıyla optimum batarya gücü olan P_b^* elde edilir. Buna bağlı olarak DG ve EDS'nin optimum referans akımları sırasıyla Denklem (4.7) ve Denklem (4.8)'den hesaplanmaktadır.

$$i_d^* = \frac{P_d^*}{v_d} \quad (4.7)$$

$$i_b^* = \frac{P_b^*}{v_b} \quad (4.8)$$

Sistem kontrolünde kullanılan bu parametrelerin uygun şekilde ölçeklenmesi gerekmektedir. Bu ölçekleme işlemi, önceden belirlenmiş alt ve üst sınırlarla yapılmalıdır. Referans akım değerleri normalize edilerek, k_d ve k_b akım paylaşım oranları hesaplanır. Bu hesaplanan değerler, haberleşme ağı üzerinden birincil kontrol yapısına aktarılır. Bu sayede, uyarlanabilir eğim kontrol katsayıları güncellenir.

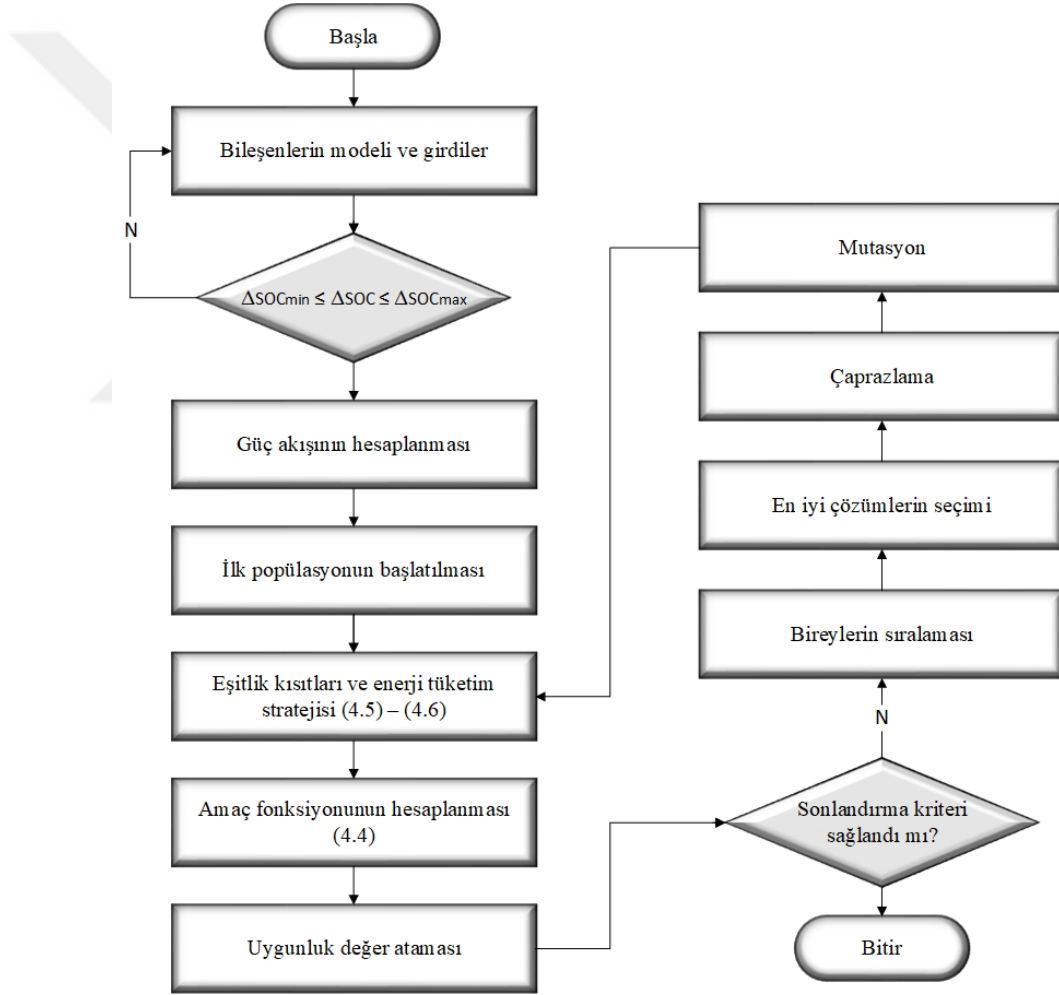
DP dayalı ECMS, enerji yönetimi sürecinde birçok farklı kaynak ve tüketim noktası arasında enerji transferini en uygun şekilde sağlayacak bir çözüm sunmaktadır. Bu çözüm, DP algoritması kullanılarak hesaplanır ve enerji sisteminin en verimli şekilde kullanımını sağlar. Şekil 4.4'te verilen DP dayalı ECMS'nin akış diyagramı, enerji sistemi üzerindeki her bir bileşenin birbirleriyle olan ilişkisini ve bu ilişkilerin nasıl optimize edildiğini göstermektedir.



Şekil 4.4: Doğrusal optimizasyona dayalı ECMS'nin akış diyagramı.

4.3.2 Genetik Algoritma

GA'ların bugünkü biçimi ilk olarak J.H. Holland tarafından 1975 yılında ortaya konulmuştur. GA'lar en iyinin korunumu ve doğal seçilim ilkesinin benzetim yoluyla bilgisayarlara uygulanması ile elde edilen bir arama yöntemidir (Nabiyev 2016). GA, kısıtlı veya kısıtsız optimizasyon problemlerini çözmek için doğal seçilime dayalı bir meta-sezgisel olarak kullanılır. Bu yaklaşımda, kromozom, gen, seçim, çaprazlama ve mutasyon gibi biyolojik kavramlar optimizasyon probleminin çözüm bileşenlerine eşlenir ve global en iyi çözümün aranmasında kullanılır (Nemati ve diğ. 2018). GA temelli ECMS'nin akış diyagramı Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5: Genetik algoritmaya dayalı ECMS'nin akış diyagramı.

Mikroşebeke yapısında ECMS için kullanılan diğer bir optimizasyon yöntemi, GA tabanlı yaklaşımdır. GA'larda, her bir çözüm bileşeni gen olarak temsil edilir ve genlerin birleştirilmesi ile oluşturulan kromozomlar birer çözüm adayını temsil eder.

Denklem (4.4)'te verilen maliyet fonksiyonunda her bir kromozomun ne kadar uygun olduğu değerlendirilir. Başlangıçta, belirli sayıda kromozom içeren ilk popülasyon oluşturulur. Sonlandırma kriteri sağlanana kadar, ebeveyn kromozomlar uygunluk değerlerine göre seçilerek çaprazlama işlemine tabi tutulur ve yeni yavru kromozomlar üretilir. Çaprazlama işleminin ardından, belirli bir oranda yavru kromozom genleri üzerinde rastgele değişiklikler yapmak için mutasyon operatörü kullanılır. Elde edilen popülasyondaki en uygun kromozom, bir sonraki nesle aktarılır. Optimum çözümün bulunması veya sonlandırma kriterinin sağlanması durumunda algoritma sonlandırılır (Raghavan ve diğ. 2020).

4.3.3 Örüntü Arama Algoritması

Mikroşebeke sisteminde kullanılan optimizasyon yöntemlerinden üçüncüsü, basit, uygulaması kolay ve yakınsama yeteneği yüksek evrimsel bir algoritma olan PS algoritmasıdır. Bu algoritma sayesinde, sistemin tüketim talepleriyle üretim kapasitesi arasındaki dengesizlikler en aza indirilir. Bu algoritma, amaç fonksiyonunun minimum noktasını tespit etmek için gradyan veya yüksek dereceden türev bilgisi gerektirmez (Lewis ve Torczon 2000).

PS algoritması, başlangıç noktalarının çevresinde mesh adı verilen noktalar kümesiyle başlar. Optimum noktaya yakın veya uzak olan noktaların bir dizisini hesaplar. Mesh, başlangıç noktasına eklenen bir örüntü vektörü kümesiyle oluşur. Ağdaki bir nokta, daha iyi bir amaç fonksiyonu değerine sahip olduğunda, bir sonraki adımda geçerli bir nokta haline gelir (Dogan 2021). Örüntü arama temelli ECMS'nin akış diyagramı Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

Bir örüntü (P_k), iki temel bileşeni olan temel matris B ve üretim matrisi C_k 'dan oluşur. Bu matrisler, bir sonraki iterasyonda deneme adımlarının olası yönlerini belirleyerek amaç fonksiyonunu şekillendirir. P_k , Denklem (4.9)'da verilen matris formülüyle tanımlanır.

$$P_k = BC_k \quad k \in N \quad (4.9)$$

$$s_k = \Delta_k P_k \equiv \Delta_k B C_k \quad (4.12)$$

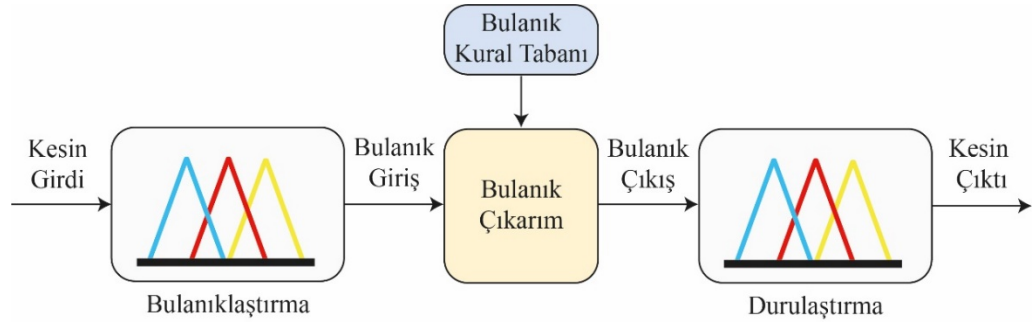
$$J(x_k + s_k^i) - J(x_k) < 0 \quad (4.13)$$

$x_{k+1} = x_k + s_k^*$ şeklinde bir sonraki tahmin oluşturularak ve en iyi deneme adımı s_k^* seçilerek Denklem (4.13) elde edilir. Deneme adımı s_k^i , algoritmanın yakınsama özelliklerini belirleyen Δ_k tarafından üretilir. Bu süreç, amaç fonksiyonu minimum değerine ulaşıncaya kadar tekrarlanır.

4.4 Bulanık Mantık Kontrolör

Temelleri Lotfi Zadeh tarafından atılan bulanık mantık, belirsizliği ele almak için geliştirilen matematiksel bir modeldir. Bu model, klasik mantık yaklaşımından farklı olarak, kesin ifadelerin yanı sıra belirsiz ve kesin olmayan ifadeleri de ele alır (Zadeh 1965). Bulanık mantık, matematiksel denklemlerin yerine bulanık kümeler ve kural tabanı kullanır. Bu yöntemde, gözlenmiş ve ölçülmüş değerler ile uzman kişinin görüşleri olmak üzere iki farklı bilgi kaynağı bir arada düşünülür. Bu yaklaşım, sayısal veri tabanına ek olarak sözel kural tabanının da kullanımını gerektirir. Örneğin, suyun 100°C'de sıcak olarak ifade edilmesi durumunda, 95°C veya 80°C'deki su için "sıcak değildir" ifadesi doğru olmadığı gibi yanlışta değildir. Bu nedenle, bulanık küme kavramı, önermelerin doğru (1) veya yanlış (0) olmayan değerleri kullanarak oluşturulmuştur. Küme yapısı, negatif, pozitif, az, çok, kısa, uzun, sık, birçok gibi dilbilimsel yapıları kullanarak derecelendirilmiş veri modelleri oluşturmayı sağlar. Bu yaklaşım, olayların daha gerçekçi ve doğal bir şekilde modellenmesini sağlar. Bu sayede, sayısal verilerin yanı sıra insanların subjektif değerlendirmelerinin de hesaba katılabildiği bir model elde edilir (Nabiyev 2016).

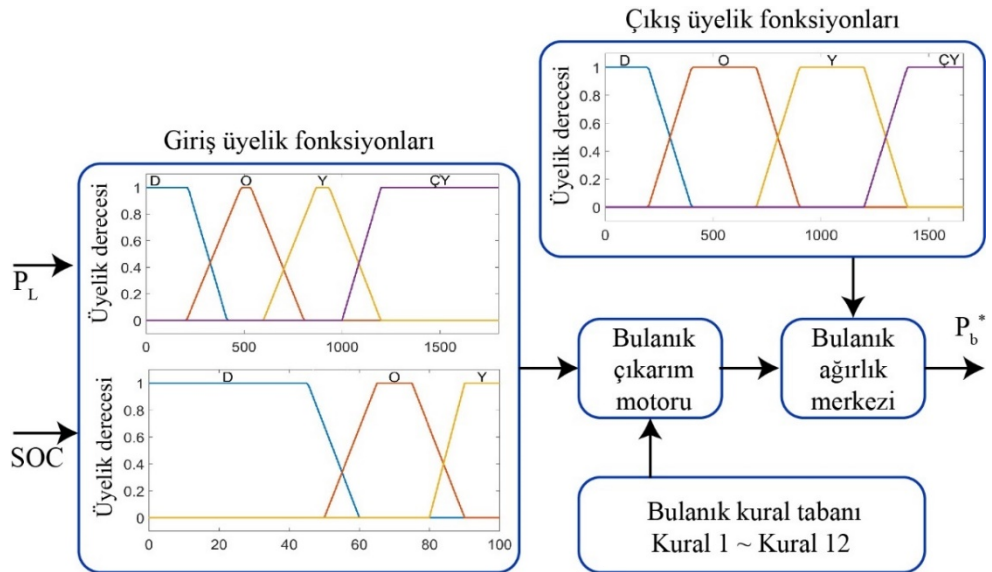
Şekil 4.7'de bulanık mantık sisteminin temel prensip şeması verilmiştir. Bulanık mantık; bulanık kurallar kümesi, giriş-çıkış üyelik fonksiyonları, durulaştırıcı ve bulanık çıkarım motoru olmak üzere dört ana unsurdan oluşmaktadır.



Şekil 4.7: Bulanık mantık blok diyagramı.

Öncelikle, denetlenmesi gereken modelin parametreleri ölçülmeli ve kesin giriş değerleri belirlenmelidir. Giriş değerleri, bulanıklaştırma işlemi sonrasında bulanık biçimde ifadeler edilir. Bulanık değerler, bilgi tabanından sağlanan bulanık kurallar ile belirlenir. Bulanık çıkarım sonucu elde edilen sonuç değeri, durulama yöntemlerinden biri kullanılarak kesinleştirilir ve sistem kontrol parametresi elde edilir.

Önerilen mikroşebeke için tasarlanan bulanık mantık kontrolör yapısı Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Bulanık mantık, üçgen, yamuk, çan eğrisi, gauss ve sigmoid gibi farklı üyelik fonksiyonlarını içermektedir. Gerçek zamanlı uygulamalarda, işlem kolaylığı sağlamaları nedeniyle üçgen ve yamuk gibi doğrusal üyelik fonksiyonları sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yamuk üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Yamuk fonksiyonda, başlangıç (a), bitiş (d) ve en yüksek üyelik derecesine sahip olan (b) ve (c) olmak üzere dört parametre yer almaktadır. Bu parametreler Denklem (4.14) ile hesaplanmaktadır.



Şekil 4.8: Bulanık mantık çıkarım sistemi blok diyagramı.

$$\mu(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{(x-a)}{(b-a)}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{(d-x)}{(d-c)}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d < x \end{cases} \quad (4.14)$$

Bulanıklaştırma işlemi, sistemden alınan kesin girdilerin sembolik değerlere dönüştürülmesi için kullanılır. Bu işlemde, girdilerin dilsel niteliklerini ifade eden sembolik değerler belirlenir. Girdilerin ait olduğu bulanık kümeler ve üyelik dereceleri, yamuk formdaki üyelik fonksiyonundan faydalanarak tespit edilir. Üyelik fonksiyonu, her bulanık ögenin bulanık çıkarım motoruna giriş olarak sağlanacak μ_i üyelik derecesini belirler. P_l ve SOC girişleri, sırasıyla $[D,O,Y,\zeta Y]$ ve $[D,O,Y]$ bulanık alt kümelerine sahiptir. Bu nedenle, $\mu_{\tilde{P}_l} = [m_D, m_O, m_Y, m_{\zeta Y}]$ ve $\mu_{\widetilde{SOC}} = [m_D, m_O, m_Y]$ vektörleri, üyelik fonksiyonu aracılığıyla bulanıklaştırılabilirler.

Bulanık mantık kontrolünün temel bir bileşeni olan bulanık çıkarım motoru, insanın karar verme ve çıkarım yapma yeteneği ile benzer bir şekilde bulanık kavramları işler. Buna göre hangi kuralların değerlendirilmesi gerektiğine karar verir. Bulanık çıkarım ilişkisi $\tilde{R}(\tilde{P}_l, \widetilde{SOC})$, bulanık vektörler $\tilde{P}_l$ ve $\widetilde{SOC}$, Descartes çarpım işlemi kullanılarak Denklem (4.15) ile elde edilir (Dong ve diğ. 2021).

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{R}(\tilde{P}_l, \widetilde{SOC})} &= \mu_{\tilde{P}_l} \circ \mu_{\widetilde{SOC}} \\ &= [m_D, m_O, m_Y, m_{\zeta Y}] \circ [m_D, m_O, m_Y] \\ &= \begin{bmatrix} m_D \wedge m_D & \cdots & m_{\zeta Y} \wedge m_D \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_D \wedge m_Y & \cdots & m_{\zeta Y} \wedge m_Y \end{bmatrix}_{3 \times 4} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Denklemde $\mu_{\tilde{R}(\tilde{P}_l, \widetilde{SOC})}$ ifadesi, bulanık çıkarım matrisini göstermektedir. Mamdani tipi bulanık çıkarım sistemi için bulanık ilişki $m_D \wedge m_O = \min(\mu_D, \mu_O)$ şeklinde gerçekleşmektedir. Son olarak bulanık çıkarımın sonucu, genellikle bulanık kümeler olarak ifade edilir. Verilen sonucun sisteme yeniden uygulanabilmesi için sayısal bir değere dönüştürülmesi gerekmektedir. Birden fazla kuralın olduğu durumlarda, ağırlıklı çıktıların kütle merkezi Denklem (4.16) kullanılarak hesaplanır.

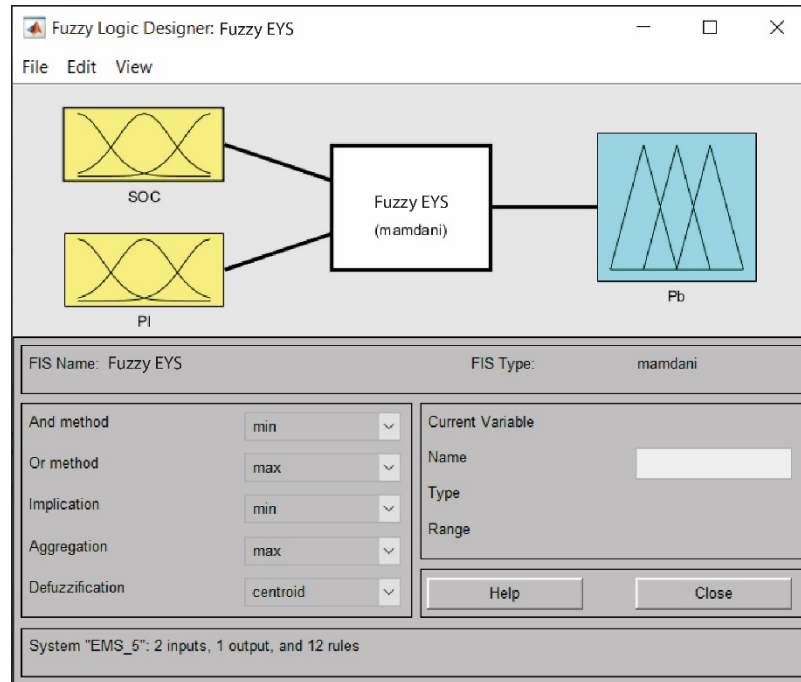
Durulaştırma birimi, karar verme biriminden gelen bulanık bir bilginin kesin değerlere dönüştürülmesi işlemidir. Bu işlem Denklem (4.17) ile tanımlıdır.

$$z_0 = \frac{\sum_{i \in \tilde{R}} \mu_i \cdot z_i(\mu_i)}{\sum_{i \in \tilde{R}} \mu_i} \quad (4.16)$$

$$u = \frac{u_{min} + u_{max}}{2} + \frac{u_{max} - u_{min}}{z_{max} - z_{min}} \cdot \left(z_0 - \frac{z_{min} + z_{max}}{2} \right) \quad (4.17)$$

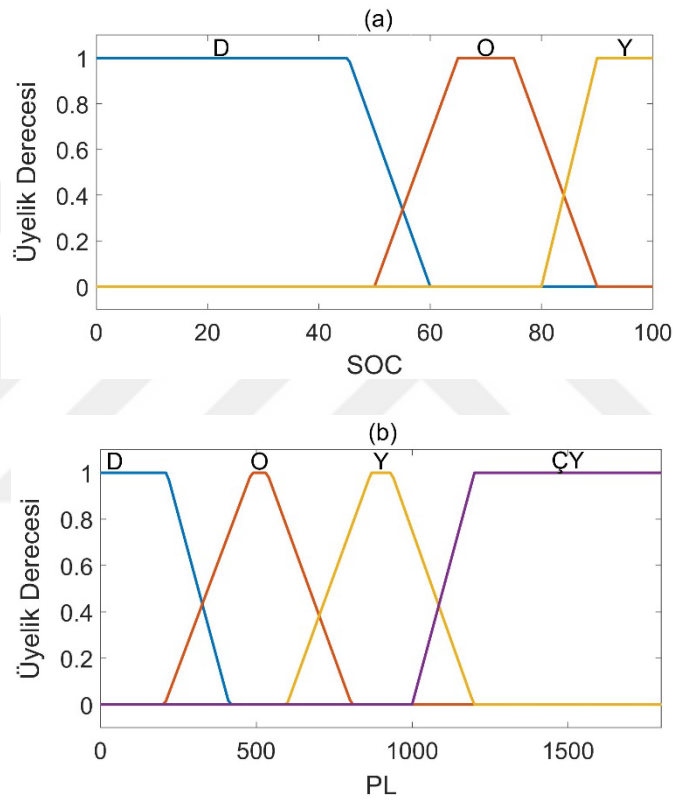
Denklemde μ_i i kuralına karşılık gelen bulanık dereceyi, $z_i(\mu_i)$ durulanmış değeri, z_0 normalize edilmiş çıkış sinyalini, u kontrolörün gerçek çıkış değerini temsil etmektedir.

EYS için tasarlanan bulanık mantık yapısı, MATLAB/Fuzzy Logic Designer arayüzü ile hazırlanmıştır. Bu yapıda güç talebi ve SOC seviyesi olmak üzere iki farklı girdi parametresi kullanılmaktadır. Çıkış olarak optimize edilmiş batarya gücü belirlenmekte olup sistem tek çıkışlıdır. Girdi ve çıktı parametreleri, Şekil 4.9'da gösterilen bulanık mantık arayüzü kullanılarak tanımlanmaktadır. Bu arayüz üzerinden, gerekli hesaplama ve durulaştırma ayarları yapılmaktadır. Bu sayede EYS, kullanıcı tercihleri ve batarya durumunu dikkate alarak batarya gücünü optimize etmektedir.

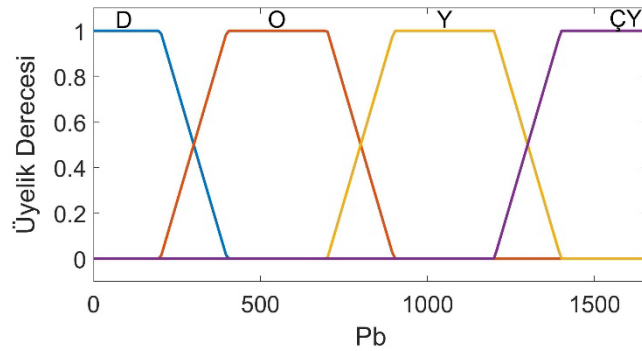


Şekil 4.9: EYS için bulanık mantık tasarım arayüzü.

Bulanık mantık girişleri, bataryanın SOC seviyesi değeri için 3, talep gücü değeri için 4 üyelik fonksiyonu içermektedir. Benzer şekilde, çıkış değeri olan batarya gücü için 4 üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Bulanık çıkarım sisteminin giriş üyelik fonksiyonları Şekil 4.10'da ve çıkış üyelik fonksiyonu ise Şekil 4.11'de görülmektedir. Üyelik fonksiyonları, ilgili değerlerin göreceli durumunu ifade eden Çok Yüksek, Yüksek, Orta ve Düşük sözel ifadelerine karşılık gelen ÇY, Y, O ve D kısaltmalarını içermektedir. Kural tabanı oluşturulurken mantıksal işlemlerden “ve” operatörü kullanılmıştır.



Şekil 4.10: Bulanık mantık girişlerinin üyelik fonksiyonları (a) Batarya doluluk oranı, (b) Talep edilen güç.



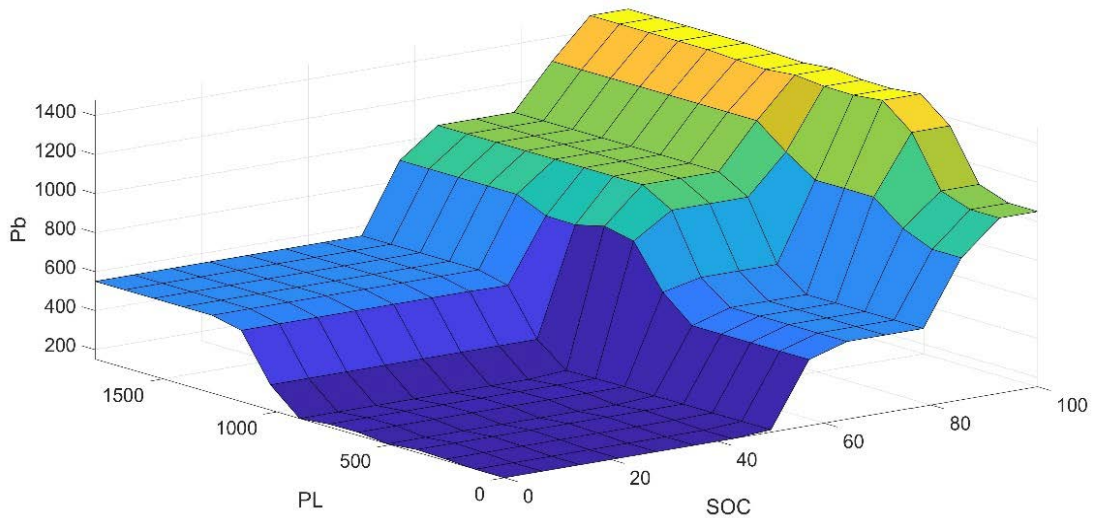
Şekil 4.11: Bulanık mantık çıkış üyelik fonksiyonları.

Sistem girişleri olan batarya doluluk oranı ve talep edilen güç için 12 adet kural oluşturulmuştur. Her bir kural çıkış değeri ile ilişkilendirilmiştir. Bu durum karar verme sürecini ifade etmektedir. Karar verme birimi, IF-THEN yapılarına dayalı bir dizi dilsel ifade kullanarak çalışır. Önerilen mikroşebekede, bulanık mantık için belirlenen optimal kural kümeleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Örneğin, IF $P_l = D$ ve $SOC = O$, THEN $P_b^* = O$. Kuralların oluşturulması görecelik esasına dayanmaktadır.

Tablo 4.1: Önerilen mikroşebekede bulanık mantık için optimal kural kümeleri.

P_L/SOC	D	O	Y
D	D	O	Y
O	D	O	ÇY
Y	D	Y	ÇY
ÇY	O	Y	ÇY

Sistem girişlerinden bataryanın doluluk miktarı ve talep gücünün değişimine bağlı olarak batarya gücündeki değişimleri gösteren yüzey görünümü Şekil 4.12’de sunulmuştur. Talep gücü ve batarya doluluk oranı yüksek olduğunda, Şekil 4.12’den görüldüğü gibi batarya gücünün katkısı fazla olmaktadır. Benzer şekilde, batarya doluluk oranı düşük olduğunda batarya gücünün katkısı daha az belirlenmektedir.

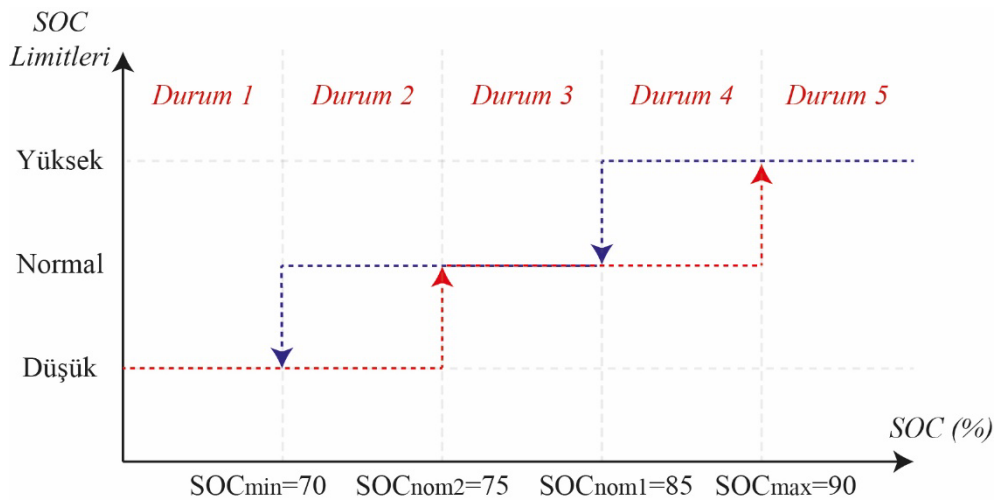


Şekil 4.12: Bulanık mantık kurallarının yüzey görünümü.

4.5 Durum Makine Kontrol Stratejisi

DMKS, bir makinenin işletme durumlarına uygun olarak farklı kontrol stratejilerinin uygulanmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu strateji, makinenin farklı yükler, hızlar, sıcaklıklar, basınçlar gibi işletme koşullarına bağlı olarak ayarlanmasını sağlar. DMKS, çıktıları yalnızca en son girdiye değil, girdilerinin tüm geçmişine bağlı olan bir sistem modelleme yöntemidir. Çıktının tamamen girdi tarafından belirlendiği işlevsel sistemlerle karşılaştırıldığında, bu strateji geçmiş girişlerine göre belirlenen bir performansa sahiptir. DMKS, özellikle karmaşık işlemlere sahip makinelerin kontrolünde kullanışlıdır. Bu yöntem, makinenin işlevselliğini işletme koşullarına uygun olarak değiştirmek ve enerji tüketimini azaltmak gibi amaçlar için kullanılabilir (Li ve diğ. 2016).

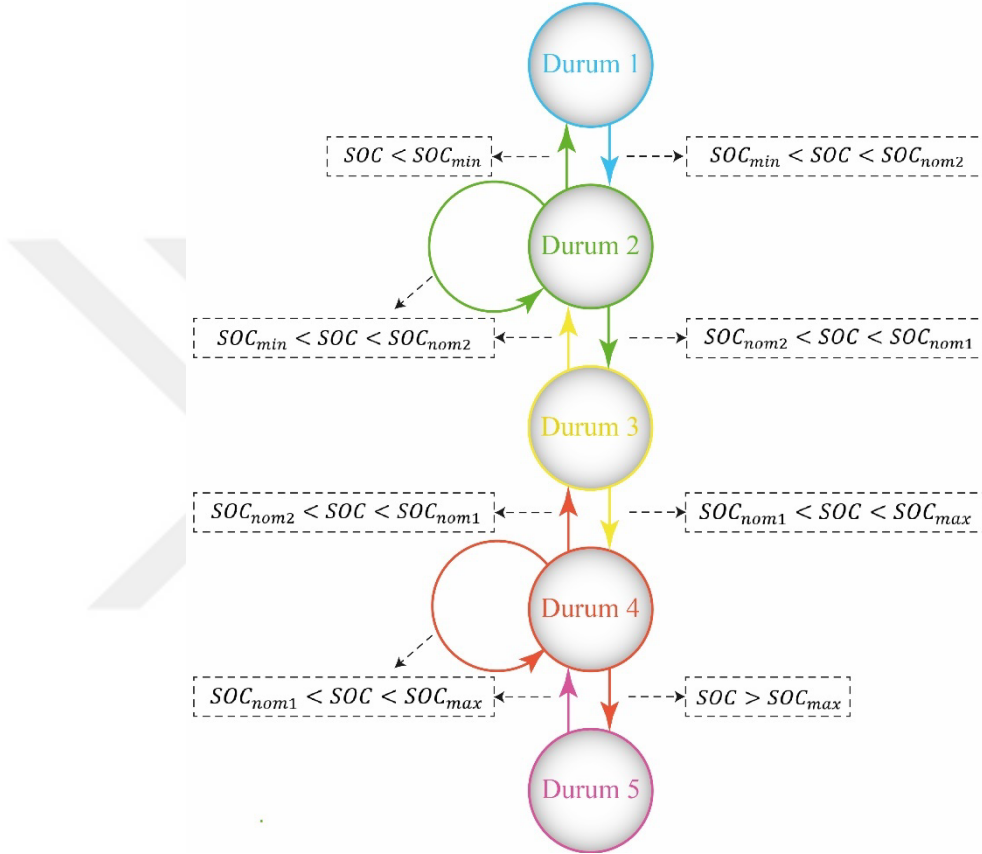
Bu çalışmada, DC mikroşebeke yapısında EYS için eğim kontrol yaklaşımına dayalı bir DMKS geliştirilmiştir. Önerilen EYS’de kullanılan DMKS yönteminde, en uygun durum anlık olarak seçilir ve elde edilen k_b akım paylaşım oranı haberleşme ağı üzerinden birincil kontrol yapısına aktarılarak eğim kontrol katsayıları güncellenir. DMKS, EDS’nin referans gücünü belirlemek için durum değişimlerini dikkate almaktadır. Şekil 4.13’te gösterildiği gibi, EDS’nin SOC seviyesi için belirlenmiş olan histerezis döngüleri temel alınarak, DMKS tarafından beş durum tanımlanmıştır.



Şekil 4.13: EDS'nin SOC seviyeleri için histerezis döngüsü.

Bu durumlar DC-DC dönüştürücülerin k_b referans güç sinyalinin üretmektedir. Ayrıca EDS'nin SOC seviye değerleri üst sınırı SOC_{max} ve alt sınırı SOC_{min} 'e göre,

yüksek ($SOC > SOC_{max}$), normal ($SOC_{min} < SOC < SOC_{max}$) ve düşük ($SOC < SOC_{min}$) olmak üzere üç aralık tanımlanmıştır. Bu seviyeler arasındaki değişimler iki histerezis döngüsü aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Her bir aşama, sistemin bulunduğu durumu temsil ederken, olaylar ise durumun değişmesine neden olan etkenlerdir. Mikroşebekede enerji yönetimi için tanımlanan DKMS durum diyagramı Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.14: Durum makine kontrol stratejisinin durum diyagramı.

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’te ifade edilen durumlar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

Durum 1: Bu koşul altında batarya SOC seviyesi, SOC_{min} değerinin altındadır. Bu duruma ilişkin koşullar ve olaylar Denklem (4.18) ile ifade edilir.

$$P_b^* = \begin{cases} P_b^{min} & \text{if } P_b^{opt} > P_l \geq P_b^{min} \\ P_l & \text{if } P_b^{max} > P_l \geq P_b^{opt} \\ P_b^{opt} & \text{if } P_l \geq P_b^{max} \\ 0 & \text{if } P_b^{min} > P_l \end{cases} \quad (4.18)$$

Durum 2: Bu koşul altında batarya SOC seviyesi, SOC_{min} ve SOC_{nom2} arasında sınırlandırılmıştır. Bu durumda batarya referans gücü önceki güç değerini korur.

Durum 3: Bu koşul altında batarya SOC seviyesi, SOC_{nom2} ve SOC_{nom1} arasında sınırlandırılmıştır. Bu duruma ilişkin koşullar ve olaylar Denklem (4.19) ile ifade edilir.

$$P_b^* = \begin{cases} P_l & \text{if } P_b^{max} > P_l \geq P_b^{opt} \\ P_b^{opt} & \text{if } P_b^{opt} > P_l \geq P_b^{min} \\ P_b^{max} & \text{if } P_l \geq P_b^{max} \end{cases} \quad (4.19)$$

Denklemde P_b^{opt} optimum batarya gücünü temsil etmektedir.

Durum 4: Bu koşul altında batarya SOC seviyesi, SOC_{nom1} ve SOC_{max} arasında sınırlandırılmıştır. Bu durumda batarya referans gücü önceki güç değerini korur.

Durum 5: Bu koşul altında EDS'nin SOC seviyesi, SOC_{max} seviyesinin üzerindedir. Bu duruma ilişkin koşullar ve olaylar Denklem (4.20) ile ifade edilir.

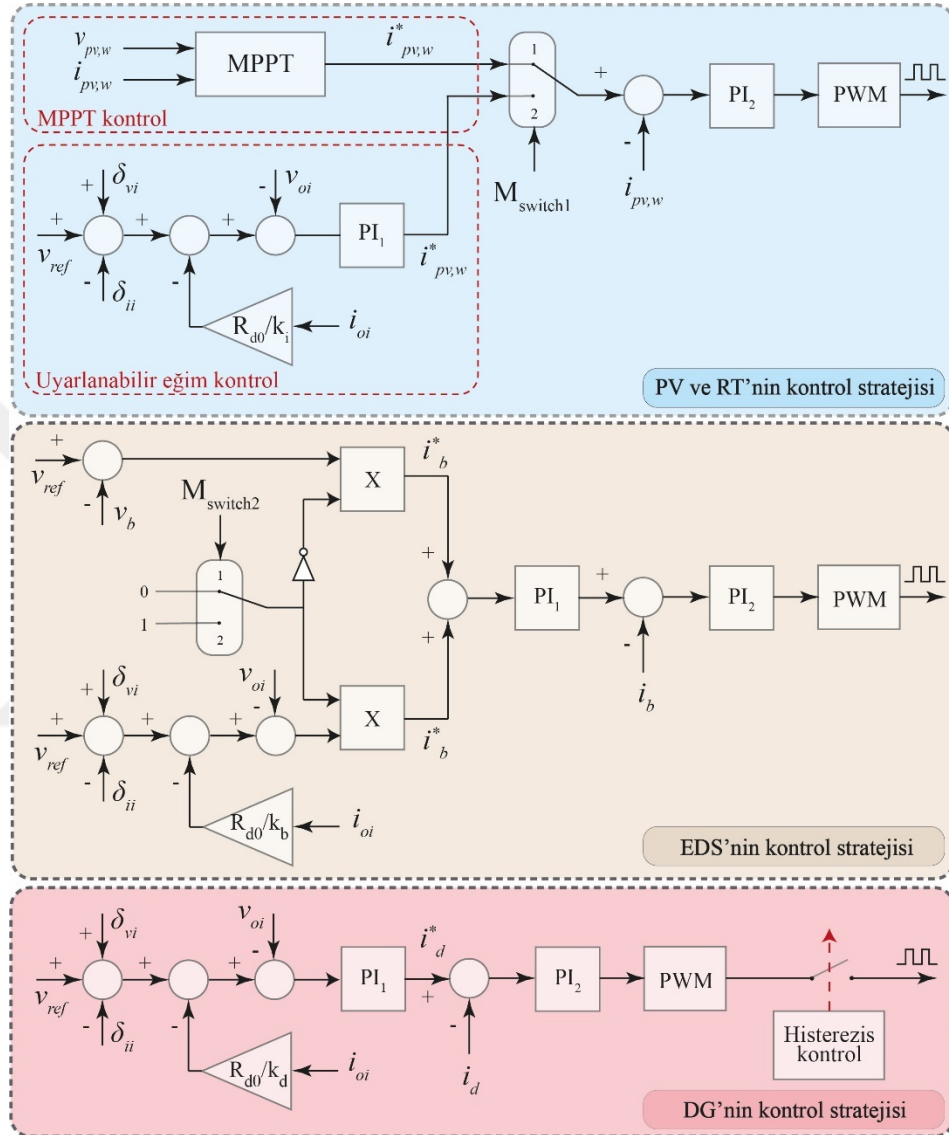
$$P_b^* = \begin{cases} P_b^{min} & \text{if } P_b^{min} > P_l \\ P_l & \text{if } P_b^{max} > P_l \geq P_b^{min} \\ P_b^{max} & \text{if } P_l \geq P_b^{max} \end{cases} \quad (4.20)$$

Denklemde P_b^* , P_b^{min} ve P_b^{max} sırasıyla batarya referans gücünü, batarya minimum gücünü ve batarya maksimum gücünü temsil etmektedir. P_l ise talep edilen gücü ifade etmektedir.

4.6 Önerilen Hiyerarşik Kontrollü EYS'nin Benzetim Modeli

DC mikroşebekedeki yüklerin talep ettiği güç, sistemdeki DEK'ler tarafından EYS doğrultusunda optimum bir şekilde karşılanmaktadır. Bu kaynakların DC baraya bağlantısında DC-DC dönüştürücüler kullanılmaktadır. Dönüştürücüler arasındaki optimum yük paylaşımı, uyarlanabilir eğim kontrolörü tarafından gerçekleştirilir.

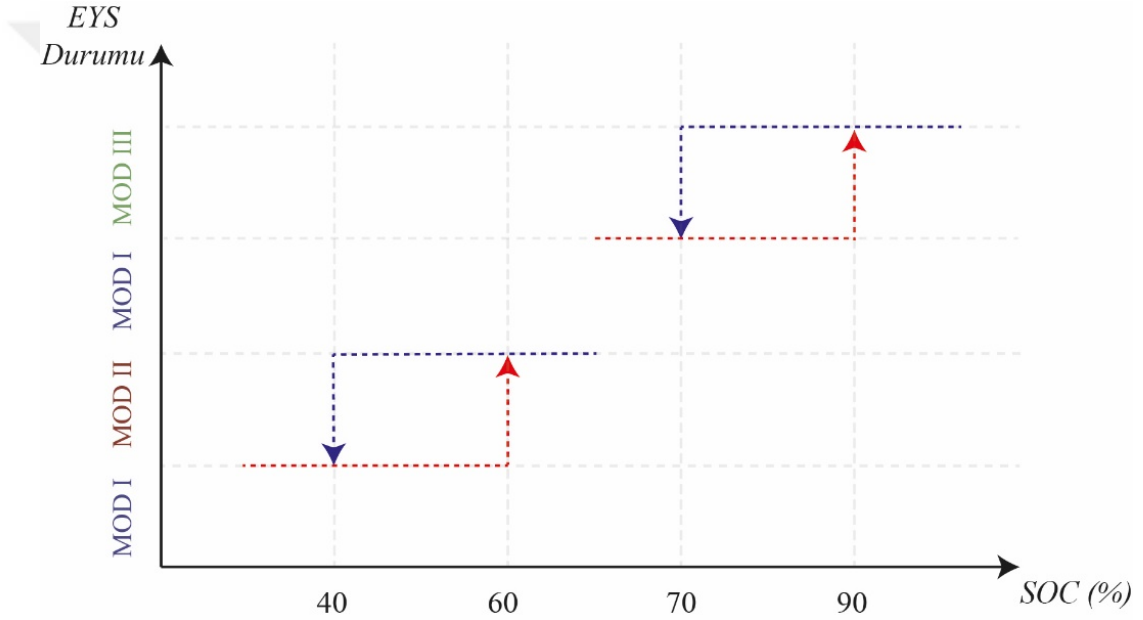
Şekil 4.15'te görüldüğü gibi, DEK birimlerine ait DC-DC dönüştürücülerin çıkış akım ve geriliminin kontrolü için kaskat PI kontrol döngüsü kullanılmaktadır. Kaskat PI kontrol döngüsü, belirli bir ölçümün değerine göre önceliği olan bir kontrol stratejisidir.



Şekil 4.15: Kontrol stratejilerinin uygulanması için belirlenen her bir dağıtık üretim biriminin işleyiş yapısı.

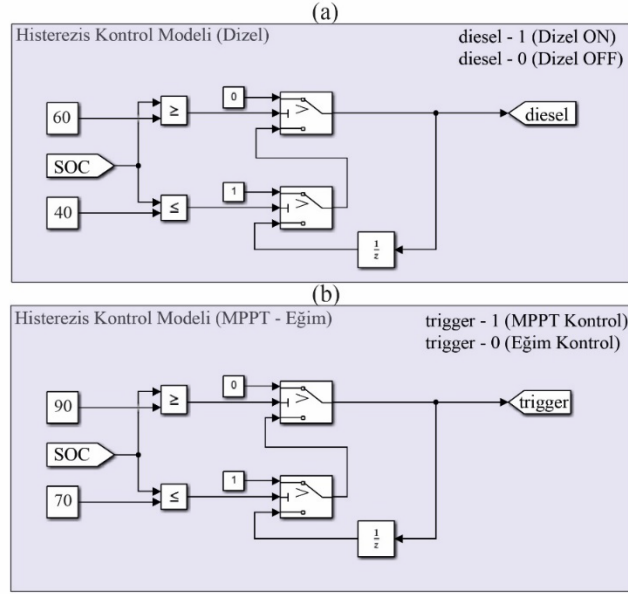
EYS tarafından belirlenen işletme talimatlarına uygun olarak, farklı modlar arasında geçiş yapabilmek için bir mod geçiş sinyali kullanılmaktadır. YEK'lerin kontrolünde kullanılan MPPT ve eğim kontrolü arasındaki geçişler $M_{switch1}$ anahtarı kullanılarak sağlanırken, EDS'nin mevcut referansının seçimi $M_{switch2}$ anahtarı ile gerçekleştirilir. Önerilen EYS'de, SOC seviyesine bağlı olarak sistem kontrolü, çift histerezis kontrol yöntemi kullanılarak sağlanmıştır. SOC, bataryanın şarj durumunu

ifade eden bir ölçüttür ve sistem kontrolü için önemli bir parametre olarak kullanılmaktadır. SOC seviyesine bağlı olarak mod geçişlerinin işletilmesini ifade eden çift histerezis kontrol şeması Şekil 4.16'da gösterilmiştir. SOC değeri, SOC_{max} veya SOC_{min} değerlerine ulaştığında, modlar arasında sürekli geçiş yapılabilir. Bu durum sistem yanıtında dalgalanmalara neden olur. Bunu önlemek için histerezis kontrol yaklaşımı kullanılmıştır. Böylece sistemin yüksek verimlilik, kararlılık ve güvenilirlik seviyeleri korunur ve güç talepleri optimum şekilde yönetilir. Sonuç olarak Mod-II ve Mod-III çalışma koşullarında histerezis kontrol kullanılmaktadır. Mod-II ve Mod-III harici durumlarda ise sistem Mod-I işletme koşulunda çalışmaktadır.



Şekil 4.16: Mod geçişlerinin işletilmesini ifade eden çift histerezis kontrol şeması.

Çift histerezis kontrol şemasının benzetim modeli Şekil 4.17'de görülmektedir. Şekil 4.17 (a)'da DG'yi kontrol eden histerezis kontrol benzetim modelinde, SOC seviyesinin %40'ın altına düşmesi durumunda mikroşebekenin talep gücüne destek olmak için devreye alınır. Bu aşamada, Mod-II işletme modu devreye girer ve DG'nin yakıt tüketimini minimize etmek için optimizasyon algoritmaları çalıştırılır. MPPT ve eğim kontrolör arasındaki koordinasyonu sağlayan histerezis kontrol benzetim modeli Şekil 4.17 (b)'de görülmektedir. Bu aşamada, Mod-III işletme modu devreye girer. Sistemin mod işletme koşulları ayrıntılarıyla aşağıda alt başlıklarla verilmiştir.



Şekil 4.17: Histerezis kontrol benzetim modeli (a) Mod-II operasyonun işletilmesi, (b) Mod-III operasyonun işletilmesi.

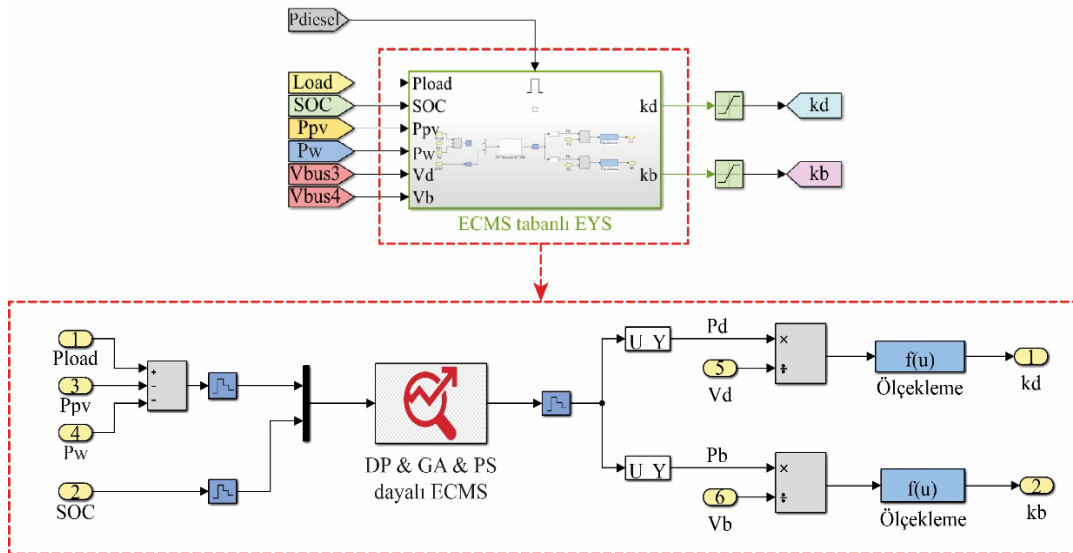
4.6.1 Mod-I İşletme

Güneş enerjisi sistemleri, FV modüller tarafından güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılır. Ancak, FV modüllerinin ürettiği güç seviyesi, güneş ışınımı ve modül sıcaklığı gibi çevresel faktörlere bağlı olduğundan, FV modülleri sabit ışık ve sıcaklık koşullarında doğrusal olmayan bir performans sergiler. Herhangi bir atmosferik koşul altında, belirli bir yükü besleyen bir FV modülü için tek bir maksimum güç değeri yoktur. Bu nedenle MPPT, FV modüllerinin sürekli olarak en yüksek verimlilik seviyesinde çalışmasını sağlayarak sistem verimliliğini artırır (Mao ve diğ. 2020).

DC-DC dönüştürücüler, FV modül çıkışını sürekli olarak takip ederek maksimum güç noktasında tutar. Bu durum, her an en yüksek verimlilik seviyesini elde etmek için gereklidir. Düşük maliyet ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle P&O algoritması gibi örnekleme verilerine dayalı doğrudan MPPT kontrol algoritmaları FV sistemlerde sıkça kullanılmaktadır. Sonuç olarak Mod-I'de YEK'lerden en yüksek verimi elde edebilmek için bu kaynaklar SOC seviyesi %40-%90 aralığında iken MPPT operasyonda çalıştırılır. Bu aralıkta talep edilen güç YEK'ler tarafından karşılanırken, EDS talep edilen güce bağlı olarak şarj ve deşarj modları arasında geçişler yapmaktadır.

4.6.2 Mod-II İşletme

Önerilen mikroşebeke yapısındaki DG'nin yakıt tüketimini minimize etmek için ECMS tabanlı optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. EDS'nin aşırı şarj ve derin deşarj gibi olumsuz durumlardan etkilenmemesi amacıyla güvenli kapasite sınırı minimum şarj için %25 maksimum şarj için %90 olarak belirlenmiştir (Bukar ve diğ. 2019). DG, SOC seviyesi %40'a düştüğünde devreye girer. SOC seviyesi %60'a ulaştığında devreden çıkar. Bu durum Mod-II işletme koşuluna karşılık gelmekte olup DG, EYS tarafından devreye alınır. EDS'ye güç paylaşımında yardımcı olur ve gereken yük talebini karşılar. YEK'ler MPPT'de işletilmeye devam eder. DG ve EDS arasındaki yük paylaşımı minimum yakıt maliyetiyle gerçekleştirilmesinde uyarlanabilir eğim kontrol yöntemi kullanılır. Eğim yöntemi için gerekli olan i_b^* ve i_d^* referans akımları üçüncül kontrol seviyesinde optimizasyon algoritmaları tarafından belirlenir. Belirlenen referans akımları normalizasyon işlemine tabi tutularak k_b ve k_d akım paylaşım oranları elde edilir. Böylelikle birincil kontrol seviyesine aktarılabilecek eğim kontrol katsayıları tespit edilir. Birincil kontrol seviyesinde bu katsayılar kullanılarak DG ve EDS arasında optimum yük paylaşımı sağlanır. DP, GA ve PS algoritmalarının kullanıldığı ECMS benzetim modeli Şekil 4.18'de görülmektedir.



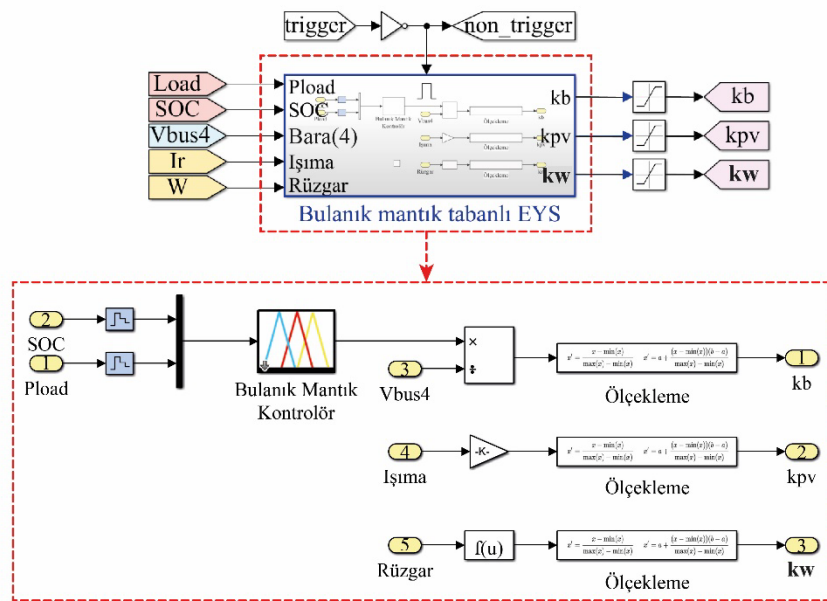
Şekil 4.18: ECMS benzetim modeli.

4.6.3 Mod-III İşletme

EDS'nin SOC seviyesi $SOC_{max} = \%90$ 'a ulaştığında, Mod-III işletme moduna geçilir. Bu işletme modunda uyarlanabilir eğim kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Böylelikle EDS, güvenli kapasite limitlerinde yönetilmek üzere optimum güç paylaşımı ve DC bara gerilim kararlılığı sağlanır. DEK'lerin eğim kontrolcülerine ait referans akımları i_b^* , i_{pv}^* ve i_w^* önerilen stratejiye göre elde edilir. Normalizasyon işlemi sonucunda k_b , k_{pv} ve k_w akım paylaşım oranları hesaplanır.

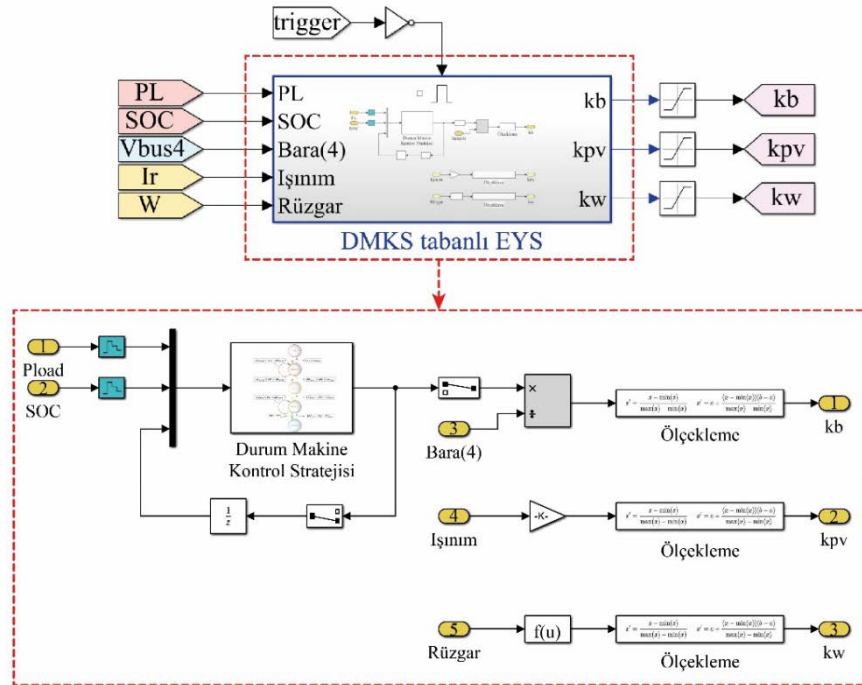
YEK'lere ait k_{pv} ve k_w akım paylaşım oranları, hava şartlarına göre ölçeklendirilerek eğim kontrolöre aktarılırken, EDS'ye ait k_b akım paylaşım oranı, BMK veya DMKS kontrolörleri tarafından optimum bir şekilde belirlenir. Mod-III işletme modunda, talep edilen gücün optimum şekilde dağıtılması ve EDS'den en iyi şekilde yararlanılması için iki farklı kontrol algoritması olan BMK ve DMKS kullanılmıştır.

BMK, matematiksel denklemler yerine bulanık kümeler ve kural tabanı kullanır (Demirçalı 2021). Bu yöntem, karmaşık matematiksel modellere gerek kalmadan, güç sistemleri için etkili bir kontrol stratejisi sağlar. Bulanık mantık tabanlı EYS'nin benzetim modeli Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.19: Bulanık mantık tabanlı EYS'nin benzetim modeli.

Mod-III işletme operasyonunda kullanılan bir diğer kontrol algoritması DMKS yaklaşımıdır. Durum makinesi, karar verme algoritmalarını uygulamak için güçlü bir araçtır. Problemleri yaklaşma ve çözme için bir geliştirme aracı olarak kullanılabilir. DMKS’de değişimi tanımlayan koşul veya olay doğru olduğu sürece sistem bir durumdan diğerine geçer (Feroldi ve Zumoffen 2014). Bu strateji, sistemin dinamik özelliklerini göz önünde bulundurarak belirlenmiş kurallara dayanmaktadır. EDS'nin SOC seviyesi ve talep gücü DMKS'nin girdilerini oluştururken, k_b akım paylaşım oranı sistemin çıktısıdır. DMKS tabanlı EYS kullanılarak bataryanın çıkış gücü optimize edilir. Şekil 4.20’de, DMKS tabanlı EYS’nin benzetim modeli görülmektedir.



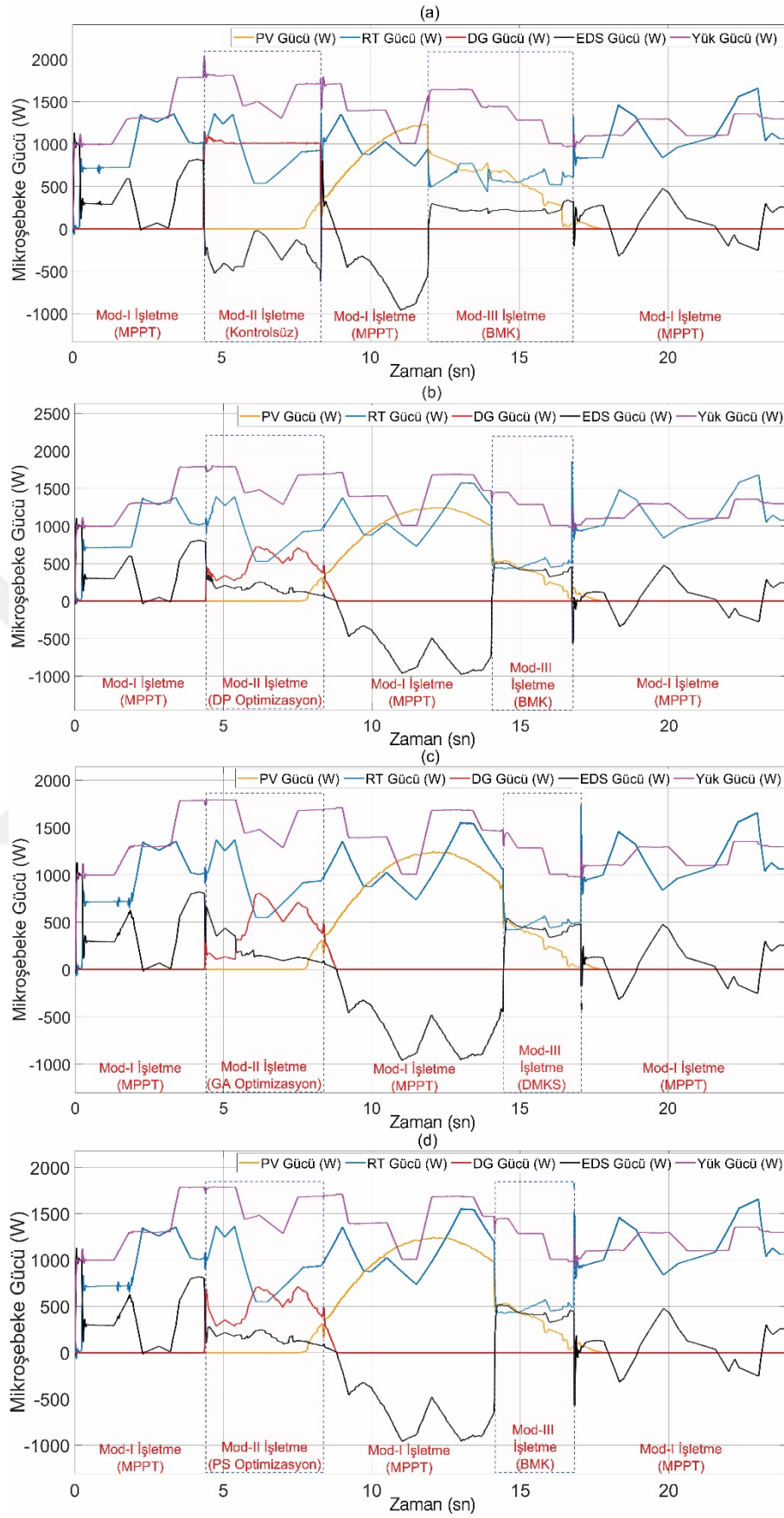
Şekil 4.20: DMKS tabanlı EYS’nin benzetim modeli.

4.7 Benzetim Sonuçları

Bu çalışmada önerilen EYS ve DC mikroşebekenin benzetim modeli MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Mikroşebekenin ada modundaki gerilim kararlılığı, kritik ve değişken yük profilleri ve DEK birimlerinin üretim senaryoları önerilen hiyerarşik EYS ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Önerilen DC mikroşebekeye ait yapılan benzetim çalışmalarında kullanılan sistem parametreleri Bölüm 3’te sunulduğu haliyle ele alınmıştır.

Sonuçları sunulan benzetim çalışmalarında EDS'nin başlangıç SOC değeri %70 olarak belirlenmiştir. Ayrıca EYS'nin performansı aynı benzetim şartları altında kontrol stratejisine bağlı olarak dört farklı senaryo için incelenmiştir. DC mikroşebeke platformu, farklı işletme koşulları altında FV, RT, DG ve EDS kaynaklarının durumuna ve yük profillerine bağlı olarak üç farklı operasyon modu belirlenmiştir. Mod-I'de, mikroşebekenin yük talebi, YEK'ler MPPT modunda çalıştırılarak karşılanır. Mod-II'de, YEK'ler MPPT modunda çalışmaya devam ederken EDS ve DG arasındaki yük paylaşımı, ECMS tarafından belirlenen akım paylaşım parametresine göre yapılmaktadır. Optimum akım paylaşım oranları DP, GA ve PS optimizasyon algoritmaları kullanılarak belirlenir. Mod-III'te ise DG'ye ihtiyaç duyulmayıp, DEK'ler arasındaki güç akışı BMK/DMKS tarafından belirlenen akım paylaşım oranına göre gerçekleştirilir. EYS'ye ait güç akışının benzetim sonuçları, tüm durumlar için Şekil 4.21'de sunulmuştur.

Senaryo I: Şekil 4.21 (a)'da görüldüğü üzere, mikroşebeke sistemi 0 - 4,4 sn aralığında Mod-I işletme modunda çalışmaktadır. Kritik yük dahil olmak üzere değişken yük talebi, rüzgâr hızına bağlı olarak MPPT modunda çalıştırılan RT tarafından karşılanmakta ve geri kalan güç EDS tarafından sağlanmaktadır. $t=4,4$ sn'de EDS'nin SOC değeri kritik seviye olan %40'ın altına düşmüştür. Bu durumda sistem, Mod-II işletme moduna geçer ve DG'yi devreye alır. DG nominal güçte çalışmakta olup YEK'lerin üretim kapasitesine göre yük talebi karşılanmaktadır. Enerji fazlalığı ise EDS'ye aktarılmaktadır. $t=8,3$. sn'de DEK'lerin üretim kapasitesinin artması ve EDS'nin SOC seviyesinin %60'a ulaşmasıyla DG devre dışı bırakılmıştır. Bu durumda sistem tekrar Mod-I işletme moduna geçmiştir. Burada, talep edilen yük YEK'ler tarafından karşılanmaktadır. Üretim fazlası güç EDS'ye aktarılarak şarj işlemi gerçekleştirilmektedir. $t=12$. sn'de EDS'nin SOC seviyesi %90'a ulaştığında EYS Mod-III operasyon moduna geçer. Yük talebi EDS, RT ve FV arasında optimum olarak paylaşılır. Böylelikle kaynaklar arasındaki optimum güç paylaşımı sağlanır. Bu senaryoda eğim kontrolcüsüne ait akım paylaşım oranının hesaplanmasında BMK kullanılmıştır. $t=16,7$. sn'de EDS'nin SOC değeri %70 seviyesine ulaştığında, sistemin YEK'ten maksimum istifade edebilmesi için tekrar Mod-I işletme moduna geçilir. Burada, yük talebi YEK'ler tarafından karşılanmaktadır. YEK'lerin üretim kapasitelerine göre EDS şarj ve/veya deşarj modunda çalışmaktadır.



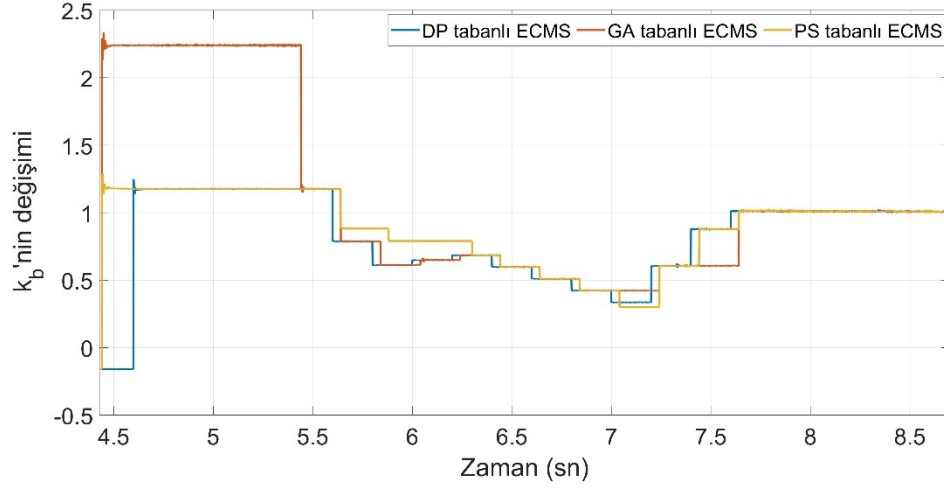
Şekil 4.21: Önerilen EYS'ye dayalı DC mikroşebekenin güç akışı (a) Senaryo I (b) Senaryo II (c) Senaryo III (d) Senaryo IV.

Senaryo II: Şekil 4.21 (b)'de görüldüğü üzere, *Senaryo I*'den farklı olarak $t=4,4$. sn.'de SOC'un çift histerezis kontrolü tarafından belirlenen ($SOC_{min}^d < \%40$) değerinin altına düşmesiyle Mod-II işletme durumuna geçilir. Sistem kararlılığının sürdürülebilmesi için DG devreye girerek EDS'nin deşarj gücünün büyük ölçüde azaltılması sağlanmıştır. Ancak yakıt tüketiminin en aza indirilmesi amacıyla DG ve EDS arasındaki güç paylaşımını sağlayan k_b ve k_d akım paylaşım oranları, DP tabanlı ECMS optimizasyon algoritması tarafından belirlenmiştir.

Senaryo III: Şekil 4.21 (c)'de görüldüğü üzere, *Senaryo II*'den farklı olarak DG'nin yakıt tüketiminin en aza indirilmesinde GA tabanlı ECMS optimizasyon algoritması işletilmiştir. Mikroşebeke yapısı Mod-III işletme modunda işletilirken eğim kontrole ait akım paylaşım oranının belirlenmesinde DMKS yöntemi kullanılmıştır.

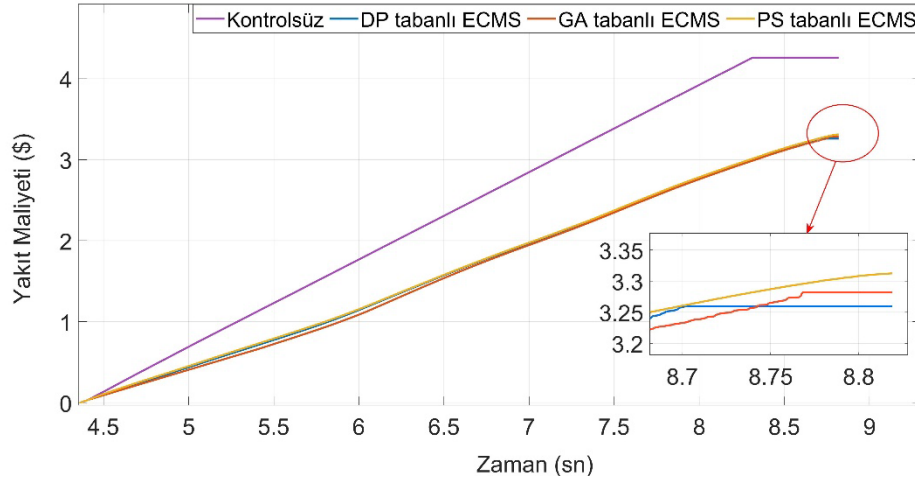
Senaryo IV: Şekil 4.21 (d)'de görüldüğü üzere *Senaryo II*'den farklı olarak DG'nin yakıt tüketiminin en aza indirilmesinde PS tabanlı ECMS optimizasyon algoritması işletilmiştir. Mod-III işletme modunda ise FV, RT ve EDS arasındaki güç paylaşımı için optimum akım paylaşım oranlarının belirlenmesinde BMK yöntemi kullanılmıştır.

Şekil 4.21'de açıkça görüleceği gibi benzetim süresi boyunca Mod-I işletme modu üç farklı zaman diliminde devreye girmiştir. Bu durumda MPPT modunda çalışan YEK'lerden maksimum istifade edilmesi anlamına gelmektedir. Mod-II ise DG'nin devreye alınması durumunda kullanılır. Bu durumda, DG'nin yakıt tüketimini en aza indirmek için ECMS yaklaşımı kullanılmıştır. ECMS'nin optimizasyonu, üç farklı algoritma olan DP, GA ve PS kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ECMS'ye dayalı optimizasyon algoritmaları tarafından belirlenen akım paylaşım oranları Şekil 4.22'de görülmektedir.



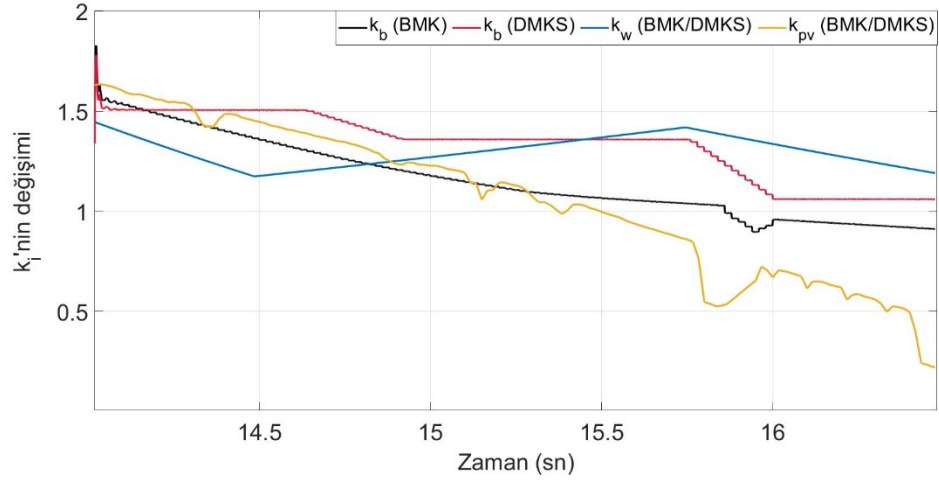
Şekil 4.22: Mod-II işletmede ECMS'ye dayalı akım paylaşım oranının değişimi.

Açıkça bilinmektedir ki DG belirlenen SOC_{min}^d ve SOC_{max}^d sınırlarına göre Mod-II işletme koşullarında devreye alınmaktadır. Sistemin Mod-II'deki yakıt maliyeti performansı karşılaştırmalı olarak Şekil 4.23'te verilmiştir. Buna göre, mikroşebekede ECMS'ye dayalı optimizasyon algoritmalarının kontrolsüz duruma göre yakıt tüketimini önemli ölçüde azalttığı görülmektedir.



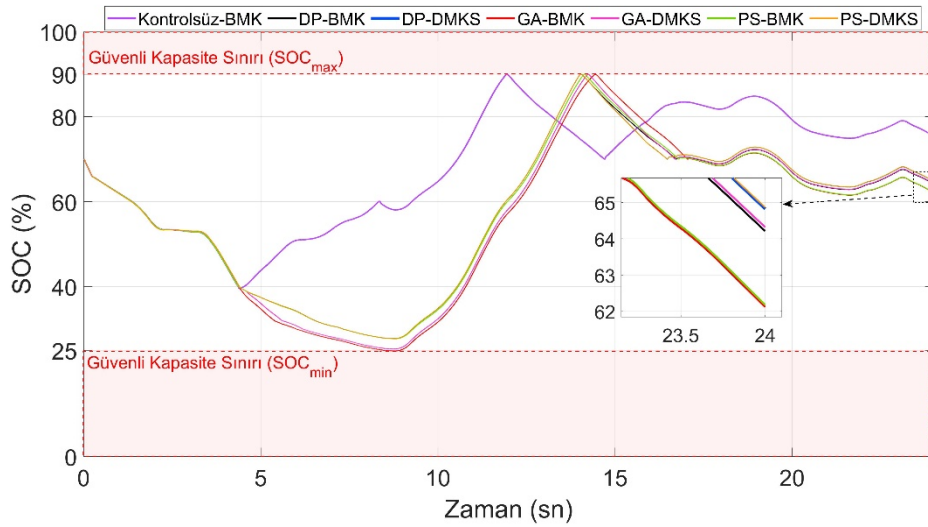
Şekil 4.23: Mod-II işletme koşulunda dizel generatörün yakıt maliyeti performans karşılaştırması.

Mod-III işletme modunda, yük paylaşımı uyarlanabilir eğim kontrolör tarafından gerçekleştirilir. Eğim kontrol akım paylaşım oranlarının optimum şekilde belirlenmesinde BMK ve DMKS yöntemleri ayrı ayrı kullanılmıştır. Elde edilen akım paylaşım oranlarının sonuçları Şekil 4.24'te gösterilmektedir.



Şekil 4.24: Mod-III işletmede akım paylaşım oranının değişimi.

Ele alınan mikroşebekede benzetim süresi boyunca, EDS'nin SOC seviyelerinin değişimi karşılaştırmalı olarak Şekil 4.25'te gösterilmiştir. SOC değerinin %70 seviyesinden başlaması ile birlikte yükün talep ettiği güç, RT ve EDS tarafından karşılanmaktadır. SOC seviyesi %40'ın altına düştüğünde, DG otonom olarak devreye girmiştir. DG, ON/OFF kontrol yönteminde tam kapasiteyle çalıştığından EDS şarj moduna geçmiştir. Şekil 4.25'teki diğer grafiklerde, SOC_{min} seviyesine yaklaşıldığı görülmektedir. Bu seviyenin altına düşülmesi durumunda, kritik yük hariç olmak üzere, EYS yük atma işlemini gerçekleştirir. Bu işlem, gerilim kararlılığının sağlanabilmesi için gereklidir.



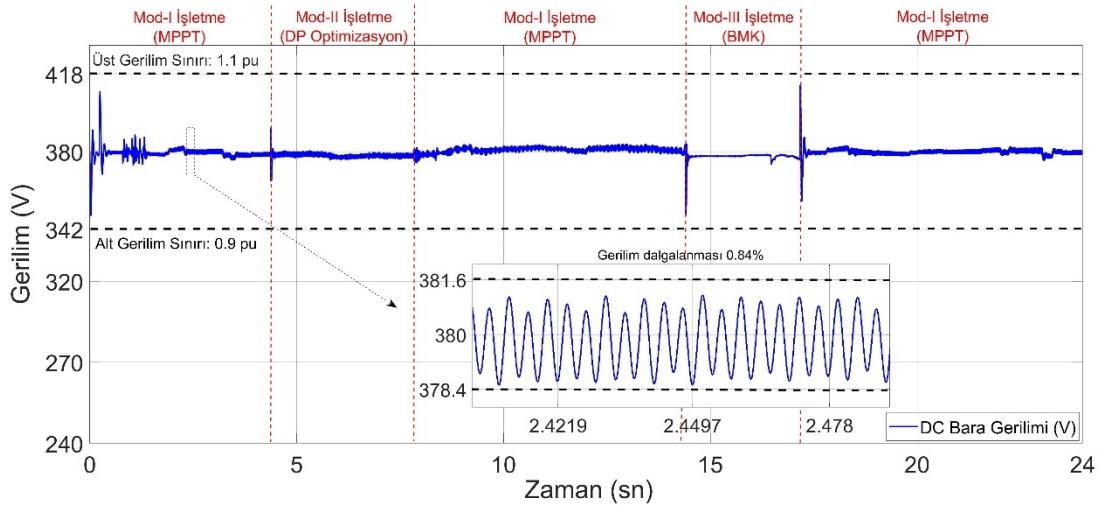
Şekil 4.25: EDS'nin SOC seviyelerindeki değişim grafiği.

Mikroşebeke için önerilen EYS'nin yakıt tüketimine etkisi Tablo 4.2'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Performans kriterleri olarak tüketilen yakıt miktarı, yakıt tüketim maliyeti ve EDS'nin SOC seviyesi kullanılmıştır. Tablo 4.2'den görüldüğü üzere, DG'nin en az yakıt tüketimi DP tabanlı ECMS kullanılarak 2,328 litre olarak hesaplanmış ve bu durumda yakıt maliyeti 3,26 \$ olarak bulunmuştur. EDS'nin şarj durumu da dikkate alındığında, PS tabanlı ECMS-DMKS kombinasyonu ile en yüksek şarj seviyesi %64,87 olarak elde edilmiştir. İkinci en yüksek oran ise DP tabanlı ECMS-DMKS kombinasyonunda %64,83 olarak tespit edilmiştir. Yakıt tasarrufu ve SOC seviyesi birlikte değerlendirildiğinde, DP tabanlı ECMS-DMKS kombinasyonu bu sistem için en uygun durum olarak önerilmektedir.

Tablo 4.2: Mikroşebeke yapısına ait performans karşılaştırması.

EYS/Kriter			Yakıt (L)	Yakıt Maliyeti (\$)	EDS SOC (%)
Mod-I	Mod-II	Mod-III			
MPPT	Kontrolsüz	BMK	3,043	4,2602	70 → 75,49
MPPT	DP tabanlı ECMS	BMK	2,328	3,2595	70 → 64,22
MPPT	DP tabanlı ECMS	DMKS			70 → 64,83
MPPT	PS tabanlı ECMS	BMK	2,366	3,3124	70 → 62,18
MPPT	PS tabanlı ECMS	DMKS			70 → 64,87
MPPT	GA tabanlı ECMS	BMK	2,344	3,2818	70 → 62,12
MPPT	GA tabanlı ECMS	DMKS			70 → 64,32

DC mikroşebeke yapısında baradaki gerilim düşümü ve dalgalanmalarının eşik değerlerine bakmak güç kalitesi açısından gereklidir. IEEE Std1159 ve EN50160 standartlarına göre mikroşebeke yapılarındaki DC bara gerilim salınım değerlerinin eşik seviyeleri 0,9 ve 1,1 pu olarak belirtilmiştir (Van den Broeck ve diğ. 2018). DC bara gerilimi mod geçişleri dâhil olmak üzere alt ve üst limit değerler içerisinde kararlılığını sürdürmektedir. DC bara gerilimi kalıcı durum altında sürekli bir spektruma sahip olan gerilim dalgalanması değeri %0,84'tür. DC bara geriliminin standartlarca öngörülen limit sınırlar içerisinde kaldığı ve kontrol sisteminin bara gerilimini regüle edebildiği Şekil 4.26'da açıkça görülmektedir.



Şekil 4.26: Mikroşebekenin DC bara çıkış gerilimi değişim grafiği.

Sonuç olarak önerilen hiyerarşik kontrollü EYS'nin FV, RT, DG ve EDS kaynaklarından oluşan bir DC mikroşebekede başarılı bir şekilde kullanılabileceği benzetim çalışmalarıyla gösterilmiştir. Bu çalışmada DEK'lerden maksimum faydalanma, minimum yakıt tüketimi ve gerilim kararlılığı hedeflenmiştir. Bu hedefler dikkate alınarak SOC seviyesine bağlı üç farklı operasyon modu tariflenmiştir. Tüm modlarda işletme koşullarına bağlı optimum yük paylaşımı belirleyen bir EYS önerilmiştir.

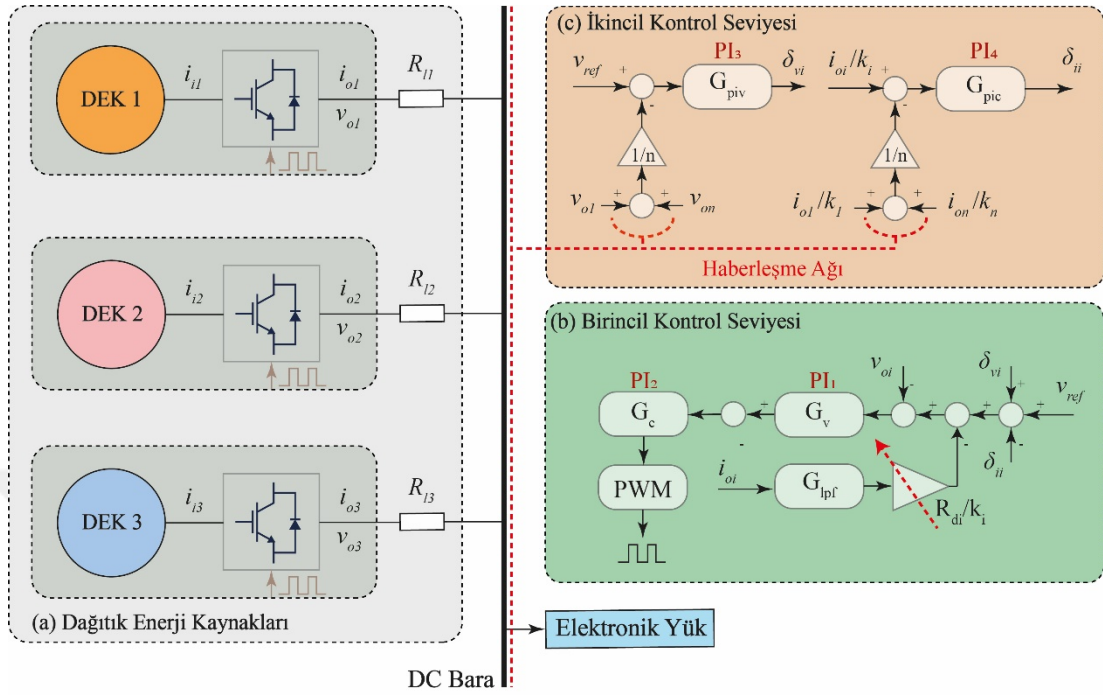
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Deneysel Mikroşebeke Mimarisi ve Test Düzeneği

Mikroşebekede, enerji kalitesinin korunması ve kararlı bir enerji yönetiminin sağlanması için güç elektroniği ara yüzleri ve kontrol devrelerinin olması gerekir. Bu amaçla enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılması ve verimli enerji dönüşümü için güç dönüştürücü tasarımları önemlidir (Song ve diğ. 2021). Son yıllarda, yüksek giriş-çıkış oranına sahip DC-DC dönüştürücüler, mikroşebeke entegrasyonu, şebeke bağlantılı dönüştürücüler, kesintisiz güç kaynakları ve elektrikli araç şarj istasyonları gibi geniş uygulama alanları nedeniyle araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir (Zhang ve diğ. 2021). Mikroşebeke yapılarında kontrol devreleri, güç kalitesi problemlerini çözmek için etkili stratejiler sunar. Gerilim ve frekans kontrolü, aktif ve reaktif gücün dengelenmesi, enerji depolama sistemlerinin yönetimi ve enerji paylaşımı gibi süreçler, kontrol devreleri tarafından izlenir ve ayarlanır. Ayrıca güç faktörünün iyileştirilmesi, güç akışının optimize edilmesi, enerji depolama sistemlerinin kontrolü ve acil durumlarda mikroşebekenin güvenli bir şekilde ana şebekeden ayrılması gibi görevleri de yerine getirir.

Benzetim çalışmalarının deneysel olarak doğrulanması amacıyla DEK birimleri, yük ve kontrol bloğundan oluşan bir şebeke teması oluşturulmuştur. Laboratuvar ölçekli deneysel çalışmanın hiyerarşik kontrol seviyeleri Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Şekil 5.1 (a), DEK birimlerini temsil ederken, Şekil 5.1 (b), hiyerarşik yapının en alt kademesi olan birincil kontrol seviyesini ve DEK’ler arasındaki güç paylaşımını gösterir. Bu süreç ilgili kaynağın akım ve gerilimine bağlı olarak dönüştürücülere kontrol sinyalinin üretilmesiyle gerçekleştirilir. Şekil 5.1 (c) hiyerarşik kontrol yapısının üst seviyesinde bulunan ikincil kontrol seviyesini göstermektedir. Bu kontrol seviyesinde ise dönüştürücü çıkışındaki gerilim farklılıkları ve hat empedanslarından kaynaklanan gerilim saptmaları restore edilir. Dönüştürücü birimleri arasındaki bilgi alışverişi için CANBus haberleşme protokolü kullanılmaktadır. Benzetim çalışmalarından farklı olarak deneysel çalışmalarda

kaynak olarak ana şebeke kullanıldığı için üçüncül kontrol seviyesi bu test düzeneğinde kullanılmamıştır.



Şekil 5.1: Deneysel çalışması gerçekleştirilen DC mikroşebekenin blok şeması (a) DEK, (b) Birincil kontrol seviyesi, (c) İkincil kontrol seviyesi.

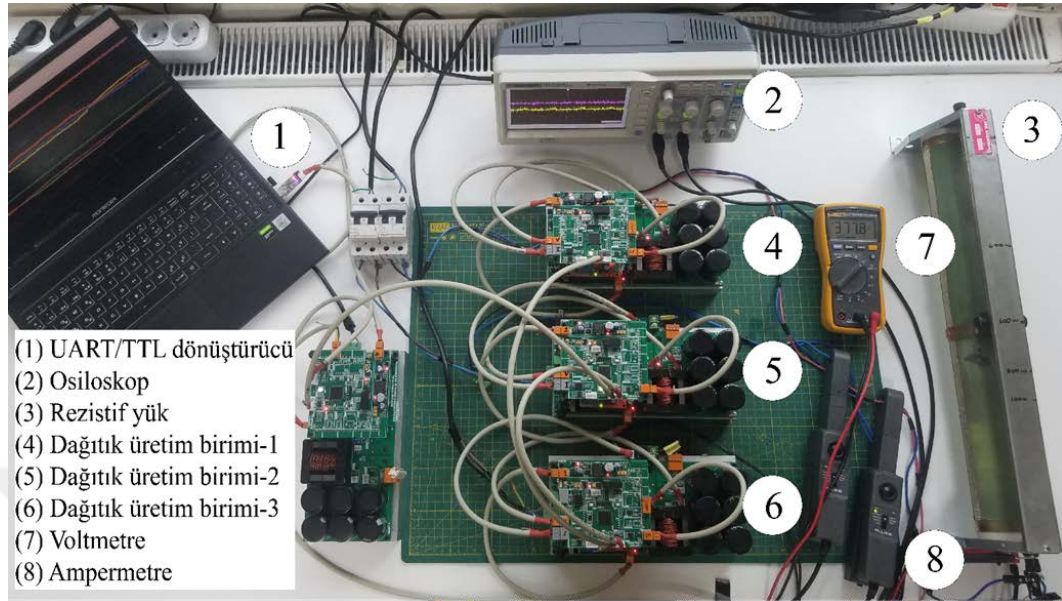
Deneysel çalışmalarda üç özdeş DEK birimi kullanılmış olup sistemin kontrolünde iki seviyeli hiyerarşik enerji yönetimi işletilmiştir. DEK birimlerinin nominal giriş gerilimi 230 V AC ve bara gerilim seviyesi 380 V DC olarak belirlenmiştir. Her bir DEK biriminin gerilim seviyesinin DC bara ile bağlantısında yükselten dönüştürücüler kullanılmıştır. Enerji yönetimi bu dönüştürücüler aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

DC mikroşebeke için laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalar;

- Geleneksel eğim kontrolün incelenmesi,
- Uyarlanabilir eğim kontrolün incelenmesi,
- Farklı akım paylaşım oranlarına göre güç paylaşımının incelenmesi,
- Sistemin referans gerilimin değişimine gösterdiği tepkinin incelenmesi,
- Tak-çalıştır performansının incelenmesi,

şeklinde incelemeler gerçekleştirilerek değerlendirmeler yapılmıştır. Tüm bu incelemelerin deneysel çalışması Şekil 5.2’de görülen laboratuvar ölçekli test

düzeneğinde yapılmıştır. Burada gerçekleştirilen tüm çalışmalarda aynı yük profili ve senaryolar kullanılmıştır.



Şekil 5.2: DC mikroşebeke sisteminin deneysel test düzeneği.

DC-DC dönüştürücülerin doğru bir şekilde tasarlanması ve uygulanması, mikroşebeke sistemlerinin güç akışını optimize etme, enerji verimliliğini artırma ve güç kaynaklarını etkin bir şekilde kullanma yeteneğini belirler. Bu nedenle deneysel çalışmalarda kullanılan DC-DC dönüştürücüler, mikroşebeke yapısının istenen performans hedeflerine ulaşmasını sağlamak için büyük bir öneme sahiptir. Bu amaçla deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere DC-DC dönüştürücü tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir.

5.2 DC-DC Dönüştürücü Tasarımı ve Uygulaması

Mikroşebekede kullanılan FV, RT ve DG gibi kaynaklar bir dönüştürücü vasıtasıyla yük bağlantısına entegre edilir. DC mikroşebekede AC DEK'lerin kullanımı için, doğrultma işlemine tabi tutulmaları gerekir. Ancak, bu işlem sırasında şebeke veya kaynak üzerinde yüksek harmonik akım bileşenleri oluşabilir. Bu nedenle, güç faktörünün 1'e yakın olmasını sağlamak ve harmonik bozunumu azaltmak için güç faktörü düzeltme (PFC) devresi eklenmelidir. Giriş gerilimi, anahtarlama elemanlarının iletim ve kesim süreleri kontrol edilerek belirli bir çıkış gerilimi için

ayarlanır. Sabit frekanslı anahtarlama tekniği, çıkış geriliminin ortalamasını anahtarların iletim süreleri ile kontrol ederek ayarlamayı sağlar (Kaysal ve diğ. 2023b). Bu yöntem PFC işlevinde kullanıldığında, dönüştürücü verimliliğini arttırmayı ve giriş akımı pik değeri­nin azaltılmasını sağlamayı amaçlamaktadır.

Yükselten tip dönüştürücülerin düşük maliyetli, verimli, güvenilir ve kolay entegre edilebilir olması için ileri düzeyde çalışmalar yürütölmektedir. Tek anahtarlı ve transformatörsüz yüksek kazançlı DC-DC dönüştürücüler, yüksek verimlilikleri, düşük maliyetleri ve hafif yapıları nedeniyle daha yaygın kullanım alanına sahiptir. Bu dönüştürücülerin farklı giriş gerilimleri ve çıkış güçleri altında tek bir güç anahtarı kullanılarak kontrol edilmesi, çoklu anahtar topolojilerine göre daha basittir (Qi ve diğ. 2021).

DC mikroşebekelerde kullanılmak üzere, DEK birimleri arasındaki güç paylaşımının istenilen seviyede gerçekleştirilebilmesi için bir DC-DC dönüştürücü gerekmektedir. Bu tez çalışması, FV, RT ve DG gibi DEK'lerin, DC baraya bağlanmasını sağlamak amacıyla bir DC-DC dönüştürücü tasarlanmıştır. Aynı zamanda uygulaması gerçekleştirilen bu dönüştürücü deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.

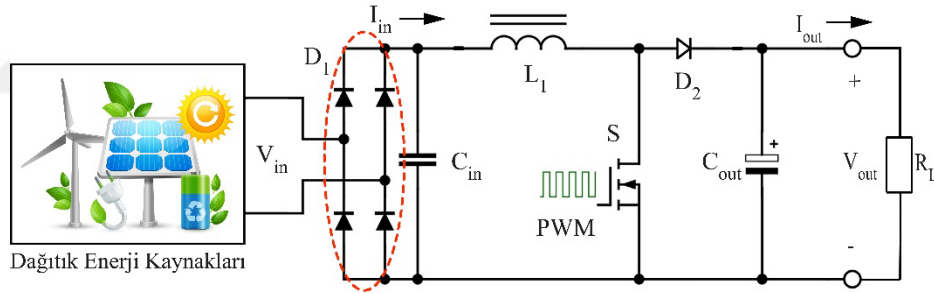
5.2.1 Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

Mikroşebekenin ana şebeke ile entegrasyonu göz önünde bulundurularak dönüştürücülerin çıkış gerilim seviyesi 380 V DC olarak belirlenmiştir. Tasarlanan dönüştürücü 85 V ile 265 V AC giriş gerilimi arasında geniş bir gerilim aralığını kapsamaktadır. Önerilen dönüştürücü 1000 W güç çıkışına sahiptir. Dönüştürücü kontrol modölünde ARM mimarisine sahip STM32F407VG6T mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Bu modölde, DEK birimleri arasında elektriksel büyüklüklerin aktarımını sağlamak amacıyla CANBus haberleşme protokolü kullanılmıştır. Ayrıca modöl üzerindeki UART haberleşme protokolü, DEK birimlerine ait elektriksel verilerin bilgisayar ortamında depolanmasını sağlamaktadır. Dönüştürücüye ait tasarım parametreleri Tablo 5.1'de sunulmuştur.

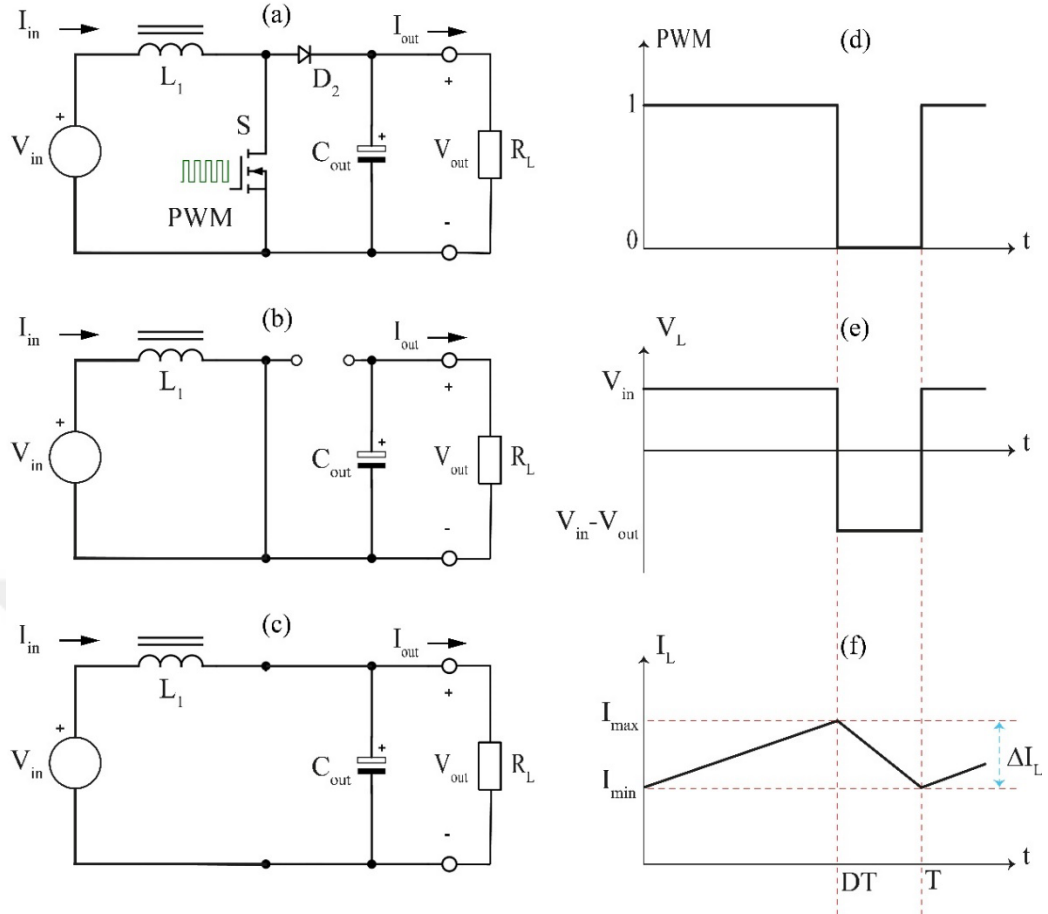
Tablo 5.1: Dönüştürücüye ait tasarım parametreleri.

Tanım	Değer
Giriş gerilim aralığı (V_{in})	85 – 265 V
Çıkış gerilimi (V_{out})	380 V
Maksimum çıkış gerilim dalgalanma oranı ($\Delta V_{out}/V_{out}$)	%1
Maksimum indüktör akım dalgalanma oranı ($\Delta I_L/I_L$)	%10
Çıkış gücü (P_{out})	1000 W
Anahtarlama frekansı (f_s)	200 kHz

Yükselten dönüştürücü, yapısı itibarıyla basit devre tasarımı ve düşük maliyet gibi avantajlara sahiptir. Bu çalışmada ele alınan dönüştürücünün basitleştirilmiş devre şeması Şekil 5.3'te verilmiştir. Yükselten dönüştürücü topolojisinde V_{out} çıkış gerilimi kalıcı durum çalışmada her zaman V_{in} giriş geriliminden daha büyüktür. Dönüştürücü sabitleri olarak L_1 yükselten dönüştürücü indüktörünü, D_1 köprü diyotu ve D_2 yükselten dönüştürücü diyotu, S kontrol edilebilen yarı iletken anahtarı, C_{in} giriş filtre kapasitörünü, C_{out} çıkış filtre kapasitörünü ve R_L yük direncini temsil etmektedir.

**Şekil 5.3:** Dönüştürücünün prensip devre şeması.

İletim ve kesim durumlarına bağlı eşdeğer devre şemaları ve kararlı çalışma rejimine ait dalga biçimleri Şekil 5.4'te verilmiştir. S anahtarı, $f_s = 1/T$ anahtarlama frekansında çalışır ve anahtar iletimde iken görev oranı $D = t_{on}/T$ olarak hesaplanır. Şekil 5.4 (d)'de $0 < t < DT$ zaman aralığında, anahtar iletimdedir ve kaynak tarafından indüktans beslenir. Şekil 5.4 (f)'de görüldüğü gibi, indüktans üzerinden geçen akım lineer olarak artar ve buna bağlı olarak indüktansın enerji seviyesi yükselir. Bu aralıkta, yükün beslenmesi kondansatör tarafından sağlanır. Aynı zamanda Şekil 5.4 (b)'de görüldüğü üzere anahtar iletimdeyken D_2 diyonu ters biaslanmıştır.



Şekil 5.4: (a) DC-DC yükselten dönüştürücü devre şeması, (c) Anahtar kapalı durumda, (b) Anahtar açık durumda, (d) PWM kontrol sinyali, (e) İndüktör gerilimi, (f) İndüktör akımı dalga formları.

Tetikleme sinyali $t = DT$ anında kesilir ve anahtar kesime girer. $DT < t < T$ zaman aralığında V_{in} giriş kaynağı ve indüktansta biriken enerji, D_2 diyodu üzerinden yüke aktarılır. İndüktans üzerinden geçen akım lineer olarak azalırken, enerji seviyesi de düşer. Güç elemanları V_{out} çıkış gerilimine maruz kalır. Bu nedenle karakteristikleri çıkış gerilimine uygun seçilmelidir. Dönüştürücü girişindeki sigorta, köprü doğrultucu ve giriş kondansatörü, giriş akımı hesaplamalarına göre seçilmelidir. İlk olarak, ortalama çıkış akımı (I_{out}) Denklem (5.1)'e göre belirlenmelidir.

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{out}} = \frac{1000}{380} = 2,63 \text{ A} \quad (5.1)$$

Maksimum giriş akımı $I_{in(max)}$ ve nominal giriş akımı I_{in} değerleri dönüştürücünün verimliliği ($\eta = \%97$) ve güç faktörü ($PF = 0,99$) varsayımlarına göre Denklem (5.2) ve Denklem (5.3)'te gösterildiği gibi hesaplanır (Texas Instruments 2016).

$$I_{in(max)} = \frac{\sqrt{2}P_{out}}{\eta V_{in(min)}PF} = \frac{\sqrt{2} \cdot 1000}{0,97 \cdot 85 \cdot 0,99} = 17,33 \text{ A} \quad (5.2)$$

$$I_{in} = \frac{\sqrt{2}P_{out}}{\eta V_{in}PF} = \frac{\sqrt{2} \cdot 1000}{0,97 \cdot 230 \cdot 0,99} = 6,4 \text{ A} \quad (5.3)$$

C_{in} giriş kapasitörü, giriş dalgalanma akımına ve kabul edilebilir bir yüksek frekanslı giriş gerilimi dalgalanmasına göre seçilmelidir. ΔV_{in} yüksek frekanslı giriş gerilim dalgalanması %1 olacak şekilde izin verildiğinde, maksimum giriş kapasitör değeri Denklem (5.4) ve Denklem (5.5)'e göre hesaplanır.

$$\Delta V_{in} = 0,01\sqrt{2}V_{in(min)} = 0,01 \cdot \sqrt{2} \cdot 85 = 1,2 \text{ V} \quad (5.4)$$

$$C_{in} = \frac{\Delta I_L}{8f_s \Delta V_{in}} = \frac{1,73}{8 \cdot 200000 \cdot 1,2} = 0,9 \mu F \quad (5.5)$$

Giriş kapasitörü olarak standart değer olan 1 μF 'lık Y2/X2 film kapasitörü kullanılmıştır. Yükselten dönüştürücünün indüktör değerini etkileyen parametrelerin başında çalışma frekansı, giriş-çıkış gerilim seviyesi, yük direnci, görev oranı, indüktörün çekirdek malzemesi gibi parametreler gelmektedir. ΔI_L indüktör dalgalanma akımı, tüm çalışma koşulları için ortalama indüktör akımının %10'dan fazla olamayacağı varsayımı ele alınmıştır. İndüktörün minimum değeri, D görev oranının %50 kabul edildiği durum için Denklem (5.6) ve Denklem (5.7)'ye göre hesaplanır.

$$\Delta I_L = 0,1I_{in(max)} = 0,1 \cdot 17,33 = 1,73 \text{ A} \quad (5.6)$$

$$L_1 \geq \frac{V_{out}D(1-D)}{f_s \Delta I_L} \quad (5.7)$$

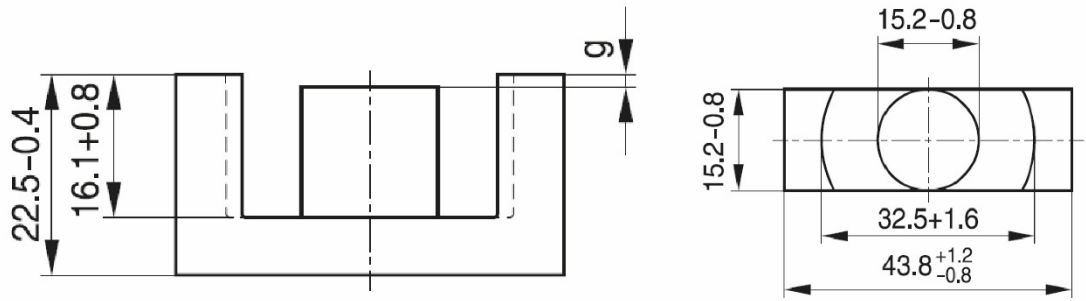
$$L_1 \geq \frac{380 \cdot 0,5 \cdot (1-0,5)}{200000 \cdot 1,73} \geq 274 \mu H$$

Ferrit nüve seçimi yaparken çalışma frekans aralığına dikkat edilmelidir. Dönüştürücüde kullanılacak nüve seçiminde 0,5-300 kHz frekans bandında çalışabilen ferrit çekirdekler içerisinde Epcos Ferrites Ltd. firmasının N87 tipi nüve malzemesi tercih edilmiştir. Çekirdeğin akı yoğunluğu 320 mT değerine ulaşana kadar doyuma girmemektedir. N87 tipi ferrit nüve malzemesinin teknik özellikleri Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2: ETD44 ferrit nüvenin teknik özellikleri.

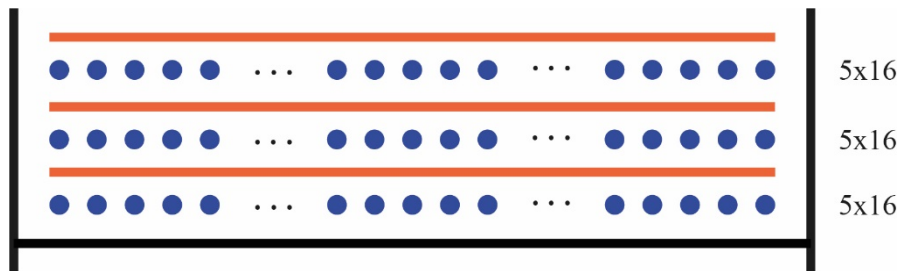
Özellik – ETD44/22/15	Değer
İndüktans faktörü (A_L)	3500 nH
Manyetik yol uzunluğu (l_e)	103 mm
Çekirdek kesit alanı (A_e)	173 mm ²
Etkin manyetik hacim (V_e)	17800 mm ³
Materyal	N27, N87, N95, N97

Şekil 5.5'te fiziksel ölçüleri verilen Epcos Ferrites Ltd. firmasının ETD44/22/15 kodlu E tipi ferrit nüvesi dönüştürücünün indüktörünü oluşturmaktadır (TDK Electronics 2022). Nüvenin 1,5 mm hava aralıklı ve hava aralıksız modeli birleştirilerek indüktans faktörü 194 nH değerine sahip hale getirilmiştir.



Şekil 5.5: Epcos Ferrites Ltd. firmasının ETD44/22/15 kodlu E tipindeki ferrit nüve fiziksel ölçüleri.

Transformatör, 0,5 mm çaplı bakır iletken kullanılarak oluşturulmuştur. 5 adet telin paralel sargısı, akım taşıma kapasitesi ve hesaplanan indüktans değerine göre belirlenmiş olup toplamda 48 sarımdan oluşmaktadır. Şekil 5.6'da gösterilen sarım düzenine göre bir araya getirilen indüktör 330 μ H indüktans değerine sahiptir.



Şekil 5.6: Transformatör sargılarının sarım düzeni.

Çıkış gerilim dalgalanması tüm çalışma koşulları için %1'e sınırlandırıldığı varsayıldığında, minimum hesaplanan çıkış kapasitör değeri Denklem (5.8) kullanılarak elde edilir (Rahman ve diğ. 2016).

$$C_{out} \geq \frac{P_{out}}{2\pi f_{line} \Delta V_{out} V_{out}} \quad (5.8)$$

$$C_{out} \geq \frac{1000}{2\pi \cdot 50 \cdot 3,8 \cdot 380} \geq 2,2 \text{ mF}$$

Denklemde f_{line} , dağıtık üretim biriminin çalışma frekansını ifade etmektedir. Denklem (5.8)'e göre C_{out} çıkış filtre kapasitörü 2,2 mF seçilmiştir. Dönüştürücü için Kendeil Ltd. firmasının 390 $\mu\text{F}/450 \text{ V}$ kapasitörleri seçilmiş olup firmanın veri sayfasından her bir kapasitörün eşdeğer seri direnç (ESR) değeri 0,2 Ω olduğu görülmüştür. Hesaplanan kapasite değerine ulaşmak için 6 adet kapasitör paralel bağlanmıştır. Böylece ESR değerinin 0,033 Ω 'a düşmesiyle daha düşük güç kaybı sağlanmıştır.

5.2.2 Yarı İletken Malzemelerin Seçimi ve Verimlilik Hesapları

Enerji dönüşümü sırasında kaybedilen enerji miktarı, dönüştürücü verimliliğinin bir göstergesi olarak kabul edilir. Dönüştürücülerin verimliliğini artırmak için yüksek verimli komponentler, optimize edilmiş dönüştürücü topolojileri, sıfır gerilim ve sıfır akımda anahtarlama teknikleri, komponentlerin sıcaklık kontrolü gibi yöntemler etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Öyle ki MOSFET gibi anahtarlama elemanlarının parametreleri, dönüştürücülerin performansı ve verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Anahtarlama elemanlarının iç direnci, kapasitif etkileri, anahtarlama hızları, maksimum akım-gerilim değerleri, sıcaklık katsayıları ve gürültü seviyeleri gibi özellikleri dönüştürücü verimliliğini etkilemektedir. Bu nedenle, doğru parametreleri seçmek ve optimize etmek tasarım aşamasında büyük önem taşır. Tasarlanan dönüştürücüde EICSemi Ltd. firmasının D25XB60 köprü tipi doğrultucu diyotu tercih edilmiştir. D_1 köprü doğrultucu diyotunun katalog verileri Tablo 5.3'te sunulmuştur. Diyotta meydana gelen anahtarlama kaybı (P_{D1}) Denklem (5.9) kullanılarak hesaplanmıştır (Texas Instruments 2016).

$$P_{D1} = 2V_{f(D1)} \frac{2}{\pi} I_{in} = 2 \cdot 1,05 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot 6,4 = 8,56 \text{ W} \quad (5.9)$$

Denklemde $V_{f(D1)}$, köprü diyotun maksimum ileri yön gerilimini temsil etmektedir. Diyot üzerinde harcanan güç kaybı 8,56 W olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.3: EICSemi Ltd. firmasının D25XB60 köprü tipi doğrultucu teknik özellikleri.

Maksimum ters tepe gerilimi	Maksimum RMS gerilimi	Maksimum ileri yön gerilimi (diyot başına)	Maksimum ortalama ileri yön akımı
600 V	420 V	1,05 V	25 A

Dönüştürücüde MOSFET sürücüsü olarak Texas Instruments firmasının UCC27511 entegresi kullanılmış ve $V_g = 15\text{ V}$ 'luk bir besleme gerilimi uygulanmıştır. Parazitik indüktans ve kapasitelerin neden olduğu rezonans etkisini azaltmak ve yükselme süresini sınırlamak için harici bir gate sürücü direnci önerilir. Ayrıca kullanılan bu direnç, dönüştürücünün elektromanyetik uyumluluk gereksinimlerini karşılamada yardımcı olacaktır. Bu nedenle, dönüştürücünün gate devresinde $R_g = 1,8\ \Omega$ değerinde bir direnç kullanılmıştır. Benzer şekilde MOSFET'in gate pini ile toprak arasına $10\text{ k}\Omega$ 'luk bir direnç eklenerek gate kapasitesi boşaltılmakta ve yüksek dv/dt kaynaklı tetiklenme durumlarından korunulmaktadır. Infineon Ltd. firmasının IPW65R190C6 MOSFET'i, düşük iç direnç ve kısa miller plato karakteristiği gibi avantajlar nedeniyle anahtarlama elemanı olarak tercih edilmiştir. MOSFET'in karakteristik özellikleri Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4: Infineon Ltd. firmasının IPW65R190C6 MOSFET teknik özellikleri.

$V_{ds(max)}$	$I_{ds(max)}$	$R_{ds(on)}$	C_{rss}	C_{iss}	Q_g	E_{oss}
700 V	20,2 A	0,190 Ω	100 pF	1620 pF	73 nC	5,9 μJ

Tabloda $V_{ds(max)}$ drain-source geriliminin maksimum değerini, $I_{ds(max)}$ drain-source akımının maksimum değerini, $R_{ds(on)}$ iletim durumundaki anahtarlama elemanının iç direncini, C_{rss} gate-drain kapasite değerini, C_{iss} giriş kapasite değerini, Q_g toplam gate şarj değerini ve E_{oss} çıkış kapasitansını şarj etmek için gereken enerji miktarını temsil etmektedir. $I_{ds(rms)}$ Denklem (5.10) ile hesaplanırken, MOSFET'in dinamik kaybı ($P_{s(cond)}$) Denklem (5.11) kullanılarak elde edilir.

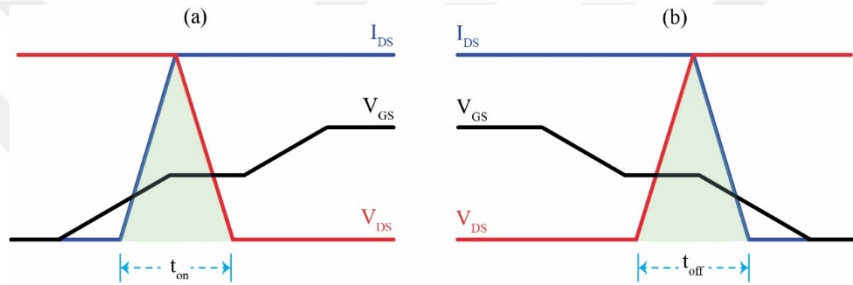
$$I_{ds(rms)} = \frac{P_{out}}{\sqrt{2}V_{in}} \sqrt{2 - \frac{16\sqrt{2}V_{in}}{3\pi V_{out}}} = \frac{1000}{230\sqrt{2}} \sqrt{2 - \frac{16\sqrt{2} \cdot 230}{3\pi \cdot 380}} = 2,27\text{ A} \quad (5.10)$$

$$P_{s(cond)} = I_{ds(rms)}^2 R_{ds(on)} = 2,27^2 \cdot 0,19 = 0,98\text{ W} \quad (5.11)$$

Denklemlerden MOSFET'in dinamik kaybı 0,98 W olarak hesaplanmıştır. Anahtarlama kayıplarını hesaplamak için, bir çevrim boyunca ortalama giriş akımı ($I_{in(avg)}$) bilinmelidir. $I_{in(avg)}$ Denklem (5.12) ile hesaplanır.

$$I_{in(avg)} = \frac{2\sqrt{2}P_{out}}{V_{in}\pi} = \frac{2\sqrt{2} \cdot 1000}{230 \cdot \pi} = 3,91 \text{ A} \quad (5.12)$$

MOSFET'in iletim ve kesim anındaki dalga formları Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Akım ve gerilim değişimi sırasında oluşan üçgen alan anahtarlama kayıplarına karşılık gelir ve bu kayıplar, t_{on} ve t_{off} anahtarlama süreleri dikkate alınarak hesaplanır.



Şekil 5.7: MOSFET'in iletim ve kesim anındaki basitleştirilmiş dalga formları (a) Anahtarın iletim durumu, (b) Anahtarın kesim durumu

Anahtarlama elemanının iletim ve kesim süreleri sırasıyla Denklem (5.13) ve Denklem (5.14) ile hesaplanmıştır.

$$t_{on} = C_{iss}R_g \ln \left(\frac{V_g - V_{th}}{V_g - V_{pl}} \right) + C_{rss}R_g \left(\frac{V_{ds} - V_{pl}}{V_g - V_{pl}} \right) = 7,65 \text{ ns} \quad (5.13)$$

$$t_{off} = C_{rss}R_g \left(\frac{V_{ds} - V_{pl}}{V_{pl}} \right) + C_{iss}R_g \ln \left(\frac{V_{pl}}{V_{th}} \right) = 13,57 \text{ ns} \quad (5.14)$$

Denklemlerde $V_{th} = 3,5 \text{ V}$ gate eşik gerilimini, $V_{pl} = 5,5 \text{ V}$ gate plato gerilimini temsil etmektedir. MOSFET'in anahtarlama güç kaybı hesaplanırken, iletim süresinde meydana gelen güç kaybı ($P_{s(on)}$) Denklem (5.15) ve kesim süresinde meydana gelen güç kaybı ($P_{s(off)}$) Denklem (5.16) kullanılarak hesaplanır.

$$P_{s(on)} = 0,5I_{in(avg)}V_{out}t_{on}f_s \quad (5.15)$$

$$P_{s(on)} = 0,5 \cdot 3,91 \cdot 380 \cdot 8,5 \text{ ns} \cdot 200 \text{ kHz} = 1,14 \text{ W}$$

$$P_{s(off)} = 0,5 I_{in(avg)} V_{out} t_{off} f_s \quad (5.16)$$

$$P_{s(off)} = 0,5 \cdot 3,91 \cdot 380 \cdot 15,08 \text{ ns} \cdot 200 \text{ kHz} = 2,02 \text{ W}$$

Denklemlerden MOSFET'in anahtarlama kaybı 3,16 W olarak hesaplanmıştır. Anahtarlama elemanının çıkış kapasite anahtarlama güç kaybı ($P_{s(oss)}$) Denklem (5.17) ve gate sürme güç kaybı ($P_{s(gate)}$) Denklem (5.18) ile elde edilir.

$$P_{s(oss)} = E_{oss} f_s = 5,9 \text{ uJ} \cdot 200 \text{ kHz} = 1,18 \text{ W} \quad (5.17)$$

$$P_{s(gate)} = V_g Q_g f_s = 15 \cdot 73 \text{ nC} \cdot 200 \text{ kHz} = 0,22 \text{ W} \quad (5.18)$$

Denklemlerden MOSFET'in $P_{s(oss)}$ ve $P_{s(gate)}$ güç kayıpları sırasıyla 1,18W ve 0,22W elde edilir. Buna göre, MOSFET'in toplam güç kaybı (P_s), Denklem (5.19) kullanılarak 5,54 W olarak hesaplanır.

$$P_s = P_{s(cond)} + P_{s(on)} + P_{s(off)} + P_{s(oss)} + P_{s(gate)} = 5,54 \text{ W} \quad (5.19)$$

Yükselten dönüştürücü diyotunun seçimi, sürekli iletim modlu (CCM) yükselten dönüştürücülerde önemli bir tasarım kriteridir. Diyot, yüksek akımda zorlamalı komütasyonlu olduğundan ters toparlanma önemli güç kaybına, gürültüye ve akım yükselmelerine neden olabilir. Ters toparlanma, yüksek anahtarlama frekansı ve güç yoğunluğuna sahip güç kaynakları için bir darboğaz olabilir. Ek olarak, mevcut diyot iletim görev döngüsü oldukça düşük ve ileri yön akımı, ortalama akımla orantılı olarak nispeten yüksektir. Bu nedenle diyot seçiminin ilk kriteri, düşük ters toparlanma yükü ve yüksek bir ileri yön akımında düşük ileri yön gerilimi (V_f)'dir. Bu avantajlarından dolayı, Littelfuse Ltd. firmasının LSIC2SD065A10A Silisyum Karbür (SiC) Schottky diyotu tercih edilmiştir. Bu diyotlar, ters toparlanma yükü (Q_{rr}) yerine kapasitif bir yüke (Q_c) sahip olduğundan, bu diyotların anahtarlama kayıpları ve geri kazanım süreleri silikon ultra hızlı diyotlardan çok daha düşüktür. Bu durum dönüştürücü performansını artıracaktır. Ayrıca, SiC diyotları daha yüksek anahtarlama frekansı tasarımlarına izin verir. Dolayısıyla daha yüksek güç yoğunluğuna sahip dönüştürücüler elde edilmektedir. D_2 yükselten dönüştürücü diyotunun karakteristik özellikleri Tablo 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.5: Littelfuse Ltd. firmasının LSIC2SD065A10A SiC Schottky diyotunun teknik özellikleri.

DC bloklama gerilimi	Sürekli ileri yön akımı	İleri yön gerilimi $V_{f(D2)}$	Kapasitif şarj Q_c
650 V	27 A	1,5 V	30 nC

Yükselten diyotun iletim kaybı ($P_{D2(cond)}$) ve anahtarlama kaybı ($P_{D2(sw)}$) Denklem (5.20) ve Denklem (5.21) ile hesaplanmıştır.

$$P_{D2(cond)} = \frac{P_{out}}{V_{out}} V_{f(D2)} = \frac{1000}{380} \cdot 1,5 = 3,95 \text{ W} \quad (5.20)$$

$$P_{D2(sw)} = 0,5 V_{out} Q_c f_s = 0,5 \cdot 380 \cdot 30 \text{ nC} \cdot 200 \text{ kHz} = 1,14 \text{ W} \quad (5.21)$$

Yükselten dönüştürücü diyotunun toplam güç kaybı, $P_{D2} = 5,09 \text{ W}$ olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, çıkış kapasitörünün güç kaybı hesaplanırken kapasitör etkin akımı ($I_{cout(rms)}$) bilinmelidir. Kapasitör efektif akımı ve kapasitörde harcanan güç (P_{CO}), Denklem (5.22) ve Denklem (5.23) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$I_{cout(rms)} = \sqrt{\frac{8\sqrt{2}P_{out}^2}{3\pi V_{in}V_{out}} - \frac{P_{out}^2}{V_{out}^2}} \quad (5.22)$$

$$I_{cout(rms)} = \sqrt{\frac{8\sqrt{2} \cdot 1000^2}{3\pi \cdot 230 \cdot 380} - \frac{1000^2}{380^2}} = 2,61 \text{ A}$$

$$P_{CO} = I_{cout(rms)}^2 ESR = 2,61^2 \cdot 0,033 = 0,22 \text{ W} \quad (5.23)$$

Yükselten dönüştürücüdeki indüktör sargılarından geçen etkin akımın bilinmesi, indüktörün toplam güç kaybını hesaplamak için gereklidir. Bu tür dönüştürücülerde, giriş akımı genellikle indüktör akımı ile eşdeğerdir. N87 ferrit çekirdeğinin katalog verilerine göre, 200 kHz anahtarlama frekansı, 100 mT tepe manyetik akı yoğunluğu ve 40 °C sıcaklık değerlerindeki güç kaybı (P_v) 230 kW/m³ olarak hesaplanır. Ayrıca iki adet E tipi nüvenin birleştirilmesiyle oluşturulan indüktörün nüve hacmi (V_e) $2 \times 17819 \times 10^{-9} \text{ m}^3$ ve indüktör sargılarının direnci (DCR) 0,07 Ω olduğundan, indüktörün bakır kaybı (P_{copper}) Denklem (5.24) ve indüktörün çekirdek kaybı (P_{core}) Denklem (5.25) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$P_{copper} = I_{in}^2 DCR = 6,4 \cdot 0,07 = 2,87 \text{ W} \quad (5.24)$$

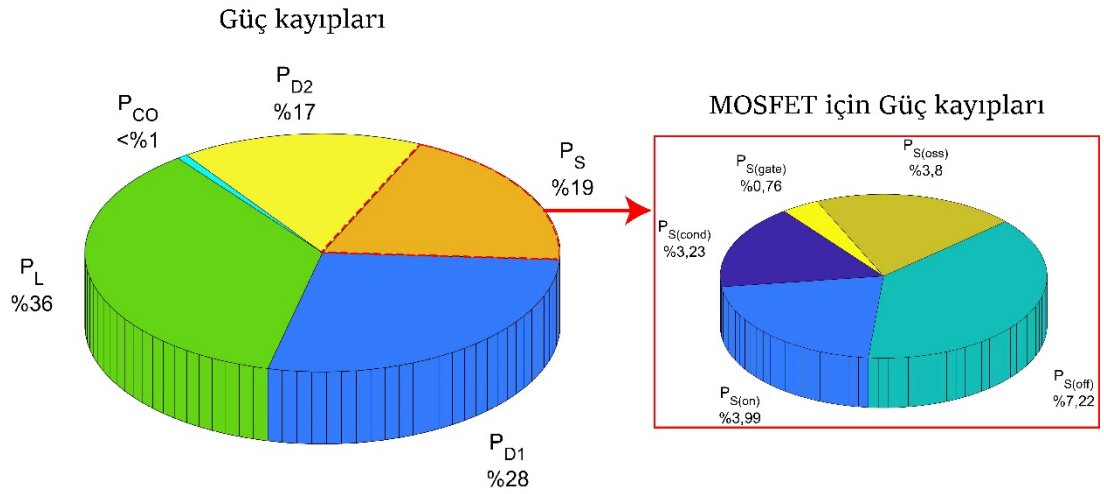
$$P_{core} = P_v V_e = 230 \text{ kW/m}^3 \cdot 35638 \text{ mm}^3 = 8,20 \text{ W} \quad (5.25)$$

Denklemlere dayanarak, indüktörün toplam güç kaybı $P_L = 11,06 \text{ W}$ olarak hesaplanır. Sonuç olarak, dönüştürücünün toplam güç kaybı (P_{loss}), Denklem (5.26) ve dönüştürücü verimi ($\% \eta$) Denklem (5.27) kullanılarak hesaplanır (Qi ve diğ. 2021).

$$P_{loss} = P_L + P_{D1} + P_S + P_{D2} + P_{CO} = 30,47 \text{ W} \quad (5.26)$$

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = \frac{1}{1 + \frac{P_{loss}}{P_{out}}} = \%97,05 \quad (5.27)$$

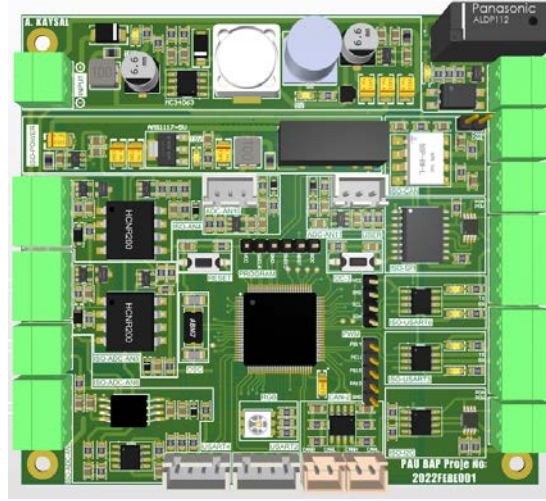
Teorik hesaplamalar sonucunda, dönüştürücünün toplam güç kaybı 30,47 W olarak hesaplanmış ve teorik verimlilik tam yük altında %97,05 olarak elde edilmiştir. Tasarlanan dönüştürücünün güç kayıpları Şekil 5.8'de ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 5.8: Dönüştürücüye ait komponentlerde harcanan teorik güç kayıpları.

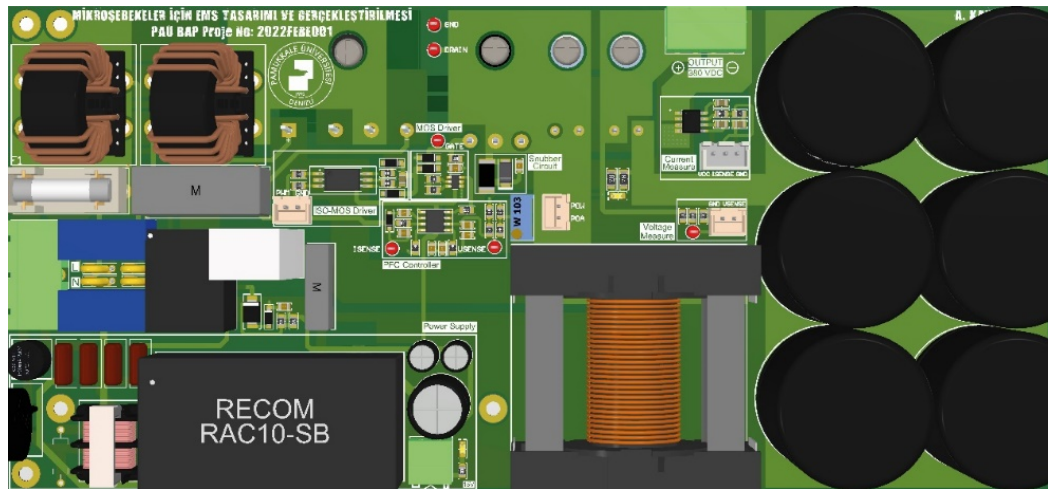
5.2.3 Tasarlanan Dönüştürücü Donanımı ve Kontrolü

Bu çalışmada ele alınan dönüştürücünün devre şeması ve kontrol yapısı Şekil 5.9'da sunulmuştur. Dönüştürücü prototipi, kontrol ve güç modüllerinden oluşmaktadır. Bu modüler yaklaşım ile elektromanyetik girişimlerin azaltılması ve arıza teşhisinin kolaylaştırılması amaçlanmıştır.



Şekil 5.10: Kontrol modülünün 3 boyutlu gösterimi.

DEK birimleri arasında enerji yönetiminin gerçekleştirilebilmesi için dönüştürücü akım ve gerilim değerleri ölçülmelidir. Akım ölçümünde ACS712-05B hall etkiye dayalı izoleli bir akım sensörü ve gerilim ölçümünde ise ACPL-C87 izolasyon entegresi kullanılmıştır. Bu sayede kontrol modülünde olduğu gibi güç modülünde de izolasyon sağlanmıştır. Ayrıca akım ve gerilim verilerinin parazitlerden arındırılması için alçak geçiren filtre tasarımları gerçekleştirilmiştir. Kontrol ve güç modüllerinin enerji ihtiyacı flyback dönüştürücü tarafından karşılanmaktadır. Hem yükselten hem de flyback dönüştürücüde elektromanyetik girişimleri en aza indirmek için EMG filtreleri tasarlanmıştır. Ayrıca güç dönüştürücüsünde PFC işlevini yerine getirmek için UCC28180D kontrol entegresi kullanılmıştır. Dönüştürücüye ait tasarlanan güç modülünün 3 boyutlu şematik gösterimi Şekil 5.11’de verilmiş olup tasarım ayrıntıları ise EK-B’de sunulmuştur.



Şekil 5.11: Güç modülünün 3 boyutlu gösterimi.

Kapalı çevrim kontrol sistemi, sistemin performansını sürekli olarak ölçerek hedeflenen değerlere ulaşmasını sağlamak için gerektiğinde düzeltici önlemler alır. Bu kontrol sistemi, değişikliklere hızlı bir şekilde tepki vererek istikrarlı bir performans sergilemelidir. Kapalı çevrim kontrol için, sistemin transfer fonksiyonu kullanılır. İlk olarak, sistemin dinamiğini tanımlayan matematiksel denklemler elde edilir. Bu denklemler doğrusal veya doğrusallaştırılmış sistemler için sabit katsayılı diferansiyel denklemler şeklinde olabilir. Sistemin transfer fonksiyonu, bu denklemlerin sıfır başlangıç koşulları altında Laplace dönüşümleri alınarak elde edilir. Geri besleme mekanizması aracılığıyla, transfer fonksiyonu kullanılarak sürekli olarak sistemin performansı ölçülür ve gerektiğinde düzeltici önlemler alınarak hedeflenen değerlere ulaşması sağlanır.

Sistemin genel transfer fonksiyonu oluşturulurken öncelikle UCC28180D'nin dahili kontrol yapısına ilişkin transfer fonksiyonu hesaplanmıştır. Şekil 5.9 (d)'de görüldüğü gibi, dahili kontrolör sabitleri $K1$ ve KFQ kullanılarak dahili döngü faktörleri $M1$ ve $M2$ elde edilmiştir. Kompanzasyon parametreleri, tam yük ve nominal giriş gerilimi kullanılarak optimize edilmiştir. Akım döngüsü kazanç faktörü ($M1$), gerilim döngüsü PWM rampa eğimi ($M2$) ve doğrusal olmayan kazanç değişkeni ($M3$), Denklem (5.28)-(5.31) kullanılarak elde edilmiştir (Texas Instruments 2016).

$$M_1 = 0,313V_{comp} - 0,401 = 0,38 \quad (5.28)$$

$$M_2 = \frac{f_s}{65kHz} 0,1223(V_{comp} - 0,5)^2 = 1,51 \frac{V}{\mu s} \quad (5.29)$$

$$M_3 = \frac{f_s}{65kHz} \cdot \frac{V}{\mu s} \cdot (0,115V_{comp}^2 - 0,175V_{comp} + 0,059) = 1,045 \frac{V}{\mu s} \quad (5.30)$$

$$M_1 M_2 = 0,38 \cdot 1,51 \frac{V}{\mu s} = 0,57 \frac{V}{\mu s} \quad (5.31)$$

Denklemlerde V_{comp} , UCC28180D'nin veri sayfasından alınan kompanzasyon gerilim değeridir. Bu değer, tam yük ve nominal çalışma geriliminde 2,5 V olarak belirlenmiştir. Gerilim transfer fonksiyonu hesaplanırken, gerilim geri besleme (G_{FB}), darbe genişlik modülatörü (G_{PWM}) ve gerilim hata yükselteci (G_{EA}) kazançlarının hesaplanması gerekmektedir. G_{FB} , dönüştürücü çıkışındaki geri besleme devresinden elde edilir ve Denklem (5.32)'ye göre hesaplanır.

$$G_{FB} = \frac{R_{FB2}}{R_{FB1} + R_{FB2}} = \frac{13,3K\Omega}{998K\Omega + 13,3K\Omega} = 0,0132 \quad (5.32)$$

Burada R_{FB1} ve R_{FB2} geri besleme devresine ait direnç değerlerini temsil etmektedir. G_{PWM} 'e ait transfer fonksiyon Denklem (5.33) ve Denklem (5.34) kullanılarak hesaplanır.

$$f_{PWM} = \frac{M_1 M_2 V_{in}^2 K_{FQ}}{2\pi K_1 2,5 R_{sh} V_{out}^3 C_{out}} = 1,1443 \text{ Hz} \quad (5.33)$$

$$G_{PWM} = \frac{M_3 V_{out} / M_1 M_2 \cdot 1V}{1 + s / 2\pi f_{PWM}} = \frac{5000}{s + 7,19} \quad (5.34)$$

Burada R_{sh} , dönüştürücü akımının ölçülmesi amacıyla kullanılan direnç değerini, f_{PWM} PWM sinyalinin karakteristik frekansını, $K_1 = 7$ ve $K_{FQ} = 1/f_s$ olmak üzere dahili kontrolör sabitlerini temsil etmektedir. G_{EA} 'ya ait transfer fonksiyon Denklem (5.35)'ten elde edilir.

$$G_{EA} = g_{mv} \left[\frac{1 + s R_{VCOMP} C_{VCOMP}}{(C_{VCOMP} + C_{VCOMP_P}) s \left[1 + s \left(\frac{R_{VCOMP} C_{VCOMP} C_{VCOMP_P}}{C_{VCOMP} + C_{VCOMP_P}} \right) \right]} \right] \quad (5.35)$$

$$= \frac{7,789 \cdot 10^{-6} s + 5,6 \cdot 10^{-5}}{8,286 \cdot 10^{-8} s^2 + 1,041 \cdot 10^{-5} s}$$

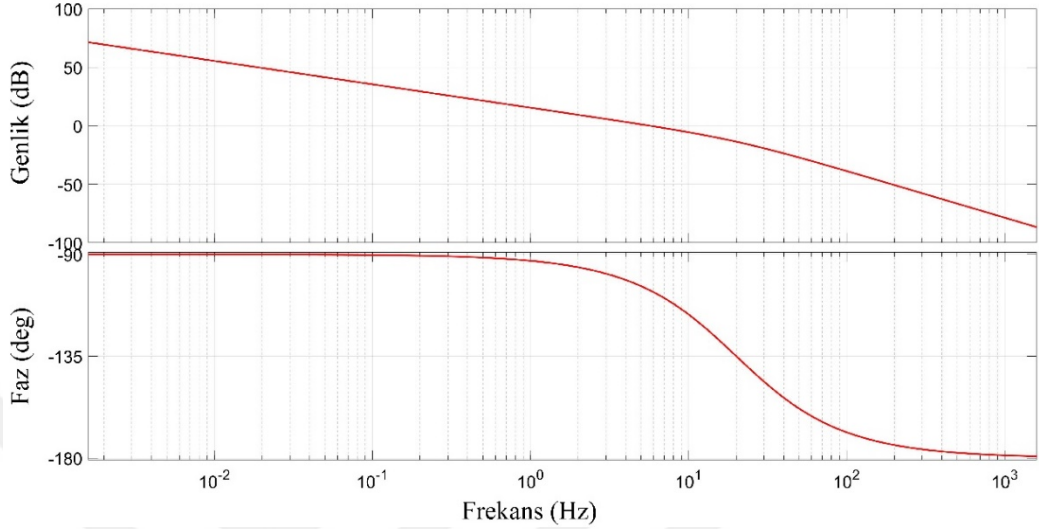
Burada $g_{mv} = 56 \mu S$ iletkenlik kazancını, R_{VCOMP} , C_{VCOMP} ve C_{VCOMP_P} ise kompanzasyon bileşenlerinin değerlerini temsil etmektedir. Bu bileşenler dahili kontrol entegresinin bilgi sayfalarında belirlenen parametrelere göre hesaplanmış ve sırasıyla $14,2 K\Omega$, $10 \mu F$ ve $0,56 \mu F$ olarak elde edilmiştir (Texas Instruments 2016). Sonuç olarak, kontrolörün kapalı çevrim transfer fonksiyonu (G_{VL}) Denklem (5.36) ile ifade edilir.

$$G_{VL} = G_{FB} G_{PWM} G_{EA}$$

$$= \frac{3,3864 \cdot 10^{-4} s + 2,2778 \cdot 10^{-3}}{8,286 \cdot 10^{-8} s^3 + 1,101 \cdot 10^{-5} s^2 + 7,486 \cdot 10^{-5} s} \quad (5.36)$$

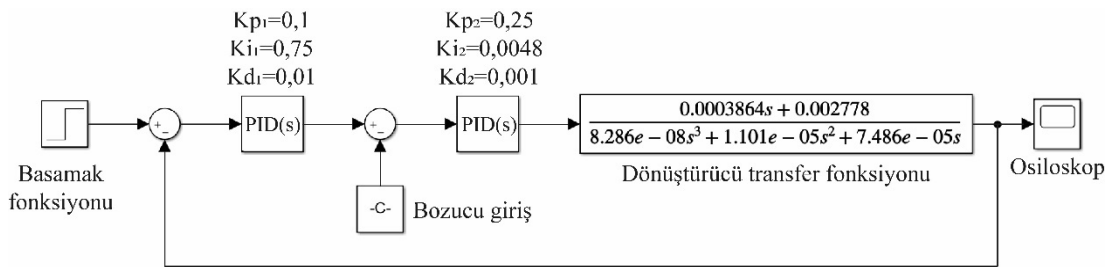
Şekil 5.12'de kapalı çevrim transfer fonksiyonuna ait Bode genlik ve faz eğrileri sunulmuştur. Bu eğrilerden, $G_{VL}(j\omega)$ için alçak frekanslı genlik değeri $20 \log |G_{VL}(j0)| = 71,4 \text{ dB}$ elde edilmiştir. Frekans arttıkça, $s = -7,1894$ 'deki

sıfırın etkisiyle $\omega = 7,1894 \text{ rad/s}$ ($f_{PWM} = 1.1443 \text{ Hz}$) civarında kırılarak genlik azalmaya devam etmiştir. Yüksek frekanslı gürültüyü engellemek ve kazanç genliğini azaltmak için $s = -125.6866$ ($f_{pole} = 20 \text{ Hz}$) 'de bir kutup yerleştirilmiştir.



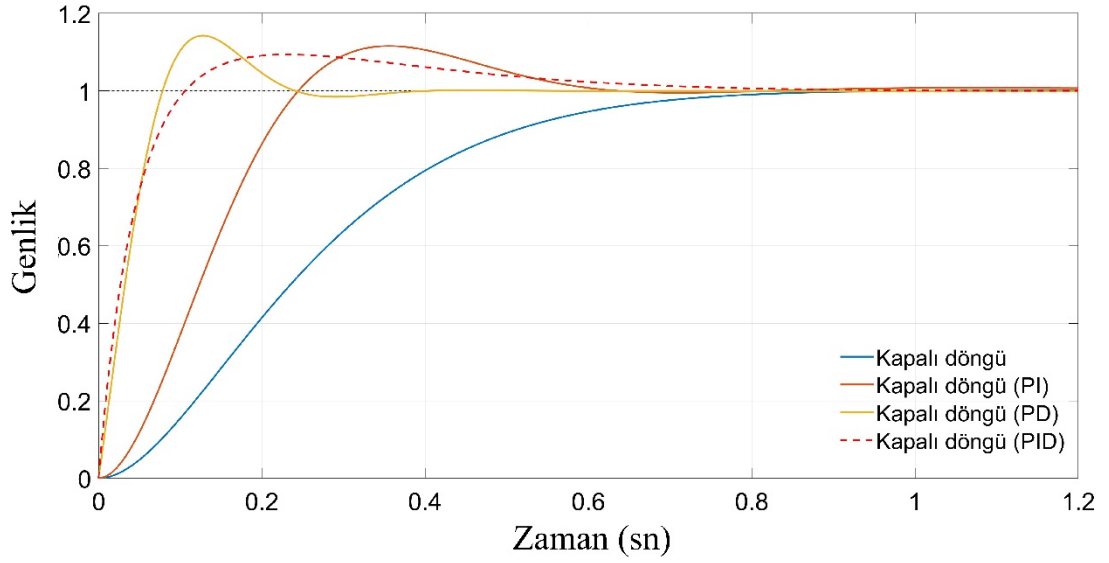
Şekil 5.12: Kapalı çevrim transfer fonksiyonuna ait Bode genlik ve faz eğrileri.

Dahili kontrolör, mikrodenetleyici katında yer alan kaskat PID kontrolörü tarafından belirlenen referans gerilimini kullanır. Tasarlanan dönüştürücünün transfer fonksiyonu ve kapalı çevrim kontrol modeli Şekil 5.13'te gösterilmiştir. Kontrolcü, çıkış gerilimini 380 V'ta sabit tutarak değişken bozucular altında istenilen gücü sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Bu sayede gerilim regülasyonu istenen kararlılıkta sağlanmaktadır.



Şekil 5.13: Tasarlanan dönüştürücünün kapalı çevrim kontrol modeli.

PD denetleyici hata sinyalinin türevini kontrol sinyaline eklediği için hatanın artan veya azalan seyrine karşı denetleyiciye öngörü kazandırır. Böylece kontrol sistemi hızlı değişimleri izleyebilir. Tasarlanan kontrolörün birim basamak cevabı kontrolsüz ve PI, PD ve PID kontrolörlü olarak incelenmiş, performansları Şekil 5.14'te gösterilmiştir.



Şekil 5.14: PI, PD ve PID denetleyicilerin birim basamak cevaba olan tepkileri.

Kontrol metotlarının performans analizi Tablo 5.6’da sunulmuştur. En iyi performans kapalı çevrim PD denetleyicide elde edilmiş olup bu denetleyicinin yükselme zamanı 0,059 sn ve yerleşme zamanı 0,220 sn’dir. Ancak deneysel çalışmalarda kullanılan kapalı çevrim PD denetleyicinin bozucu girişe maruz kalması durumunda kontrol sinyalinde kalıcı durum hatasına neden olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle, dönüştürücü kontrolünde PID denetleyicisi tercih edilmiştir. Böylece kalıcı durum hatası integral terimiyle ve hızlı değişen şartlara uyum sağlayabilmeyi türev terimiyle kazandırılmıştır. Ayrıca PID kontrolörün kullanılmasıyla %9,37’lik aşma değeri ile diğer denetleyici türleri arasında en iyi sonucu vermiştir.

Tablo 5.6: Kontrol metotlarının performans analizi.

Parametreler	Kapalı çevrim	Kapalı çevrim (PI)	Kapalı çevrim (PD)	Kapalı çevrim (PID)
Yükselme zamanı (sn)	0,436	0,165	0,059	0,072
Yerleşme zamanı (sn)	0,721	0,562	0,220	0,625
Aşma (%)	0,623	11,588	14,257	9,374

Bu çalışmada, kaskat PID kontrolörler için en uygun oransal katsayılar $K_{p1} = 0,1$, $K_{p2} = 0,25$, integral katsayıları $K_{i1} = 0,75$, $K_{i2} = 0,0048$ ve türev katsayıları $K_{d1} = 0,01$, $K_{d2} = 0,001$ olarak elde edilmiştir.

5.2.4 DC-DC Dönüştürücü DeneySEL Sonuçları

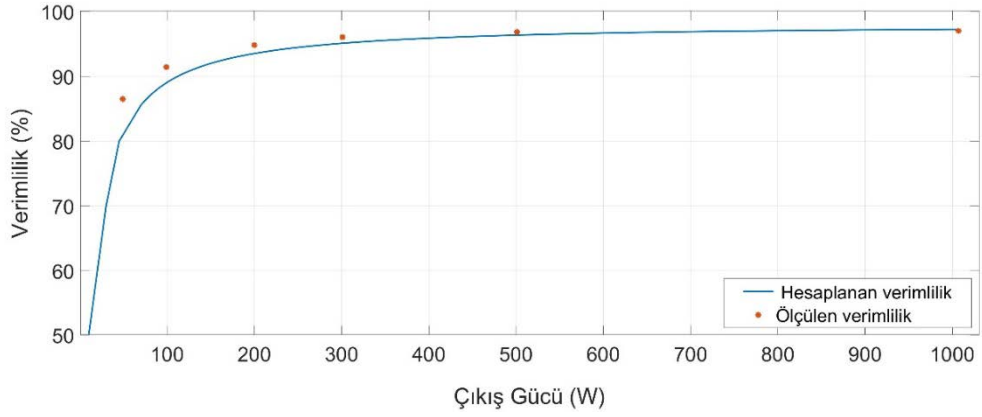
Bu tez çalışması kapsamında, mikroşebeke uygulamalarında enerji yönetimini gerçekleştirmek amacıyla yüksek verimli bir yükselten güç dönüştürücüsü tasarlanmıştır. Tasarlanan dönüştürücü, PFC işlevine sahip olup 1000 W güç değerine, 380 V çıkış gerilimine ve 200 kHz anahtarlama frekansına sahiptir. Dönüştürücünün çıkış gerilimi, mikroşebekenin DC bara gerilimini oluşturmaktadır. Dönüştürücü tasarım aşamasında devre parametreleri, teorik hesaplamalara en yakın şekilde belirlenmeye çalışılmıştır. Tasarlanan güç dönüştürücüsünün test edilmesinde Hioki analizör ve elektronik yük kullanılmıştır.

Prototip dönüştürücünün farklı çalışma koşullarında elde edilen deneysel test sonuçları, Avrupa test standartlarına uygun olarak ölçülmüş ve Tablo 5.7'de sunulmuştur. Tablodaki sonuçlar incelendiğinde, dönüştürücünün yarı yükte %96,83 ve tam yükte %97,02 verimlilik elde ettiği görülmektedir.

Tablo 5.7: Dönüştürücünün deneysel test sonuçları.

Giriş değerleri			Çıkış değerleri			PF	THD (%)	Verimlilik (%)	
$V_{in}(V)$	$I_{in}(A)$	$P_{in}(W)$	$V_{out}(V)$	$I_{out}(A)$	$P_{out}(W)$			Hesp.	Ölç.
228,48	0,348	57	380,41	0,129	49	0,963	5,75	87,01	86,52
228,17	0,521	107	381,38	0,260	99	0,981	5,26	91,56	91,41
227,78	0,957	210	379,86	0,527	200	0,986	4,63	94,30	94,81
227,66	1,401	313	379,52	0,793	301	0,992	3,48	95,06	96,03
227,43	2,290	517	379,57	1,320	501	0,995	2,81	96,23	96,83
226,01	4,601	1038	380,10	2,649	1007	0,998	1,71	97,05	97,02

Çıkış gücüne bağlı olarak, teorik hesaplamalar ve deneysel ölçümlerden elde edilen verim sonuçları, Şekil 5.15'te gösterilmiştir. Deneysel sonuçların teorik hesaplamalarla uyumlu olması, tasarlanan dönüştürücünün doğruluğunu göstermektedir. Örneğin, tam yükte hesaplanan verim %97,05 iken ölçülen verim %97,02'dir. Ayrıca, farklı yüklenme durumları için yapılan deneysel ölçümler, teorik sonuçları doğrulamaktadır.

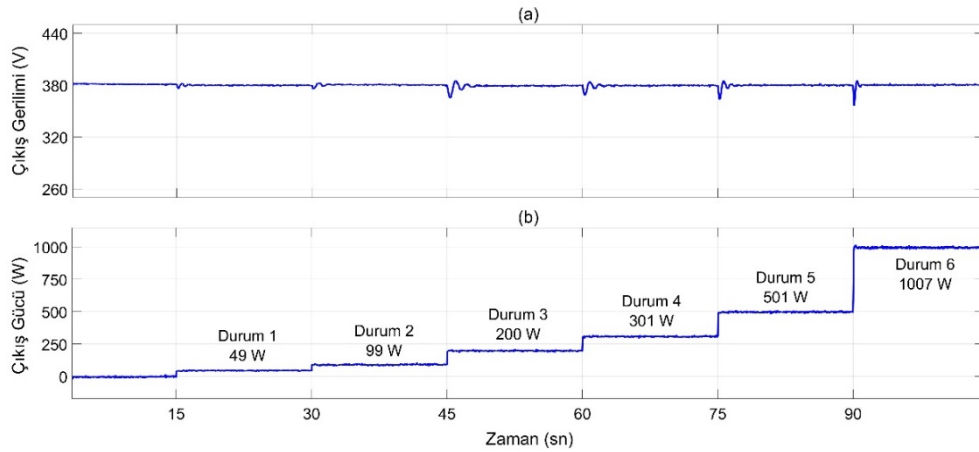


Şekil 5.15: Avrupa standartlarına göre farklı yük koşullarında hesaplanan ve ölçülen verimlilik.

Ayrıca tasarlanan dönüştürücünün verimliliği, yaygın olarak kullanılan Avrupa verimlilik standardına göre de Denklem (5.37) kullanılarak hesaplanmıştır (Turksoy ve diğ. 2021). Buna göre tasarlanan dönüştürücünün EU ağırlıklı verimi %95,89 olarak hesaplanmıştır.

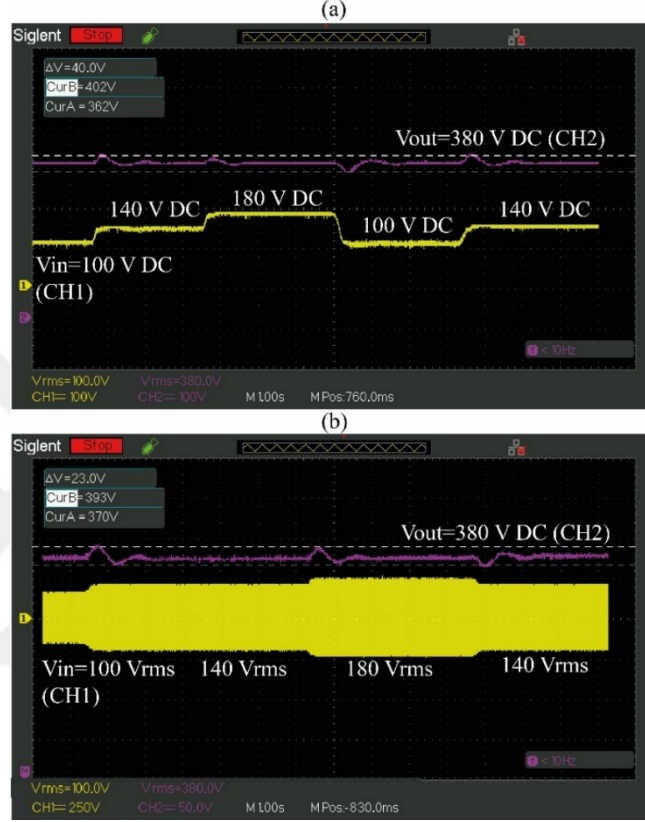
$$EU_{\eta} = 0,03\eta_{5\%} + 0,06\eta_{10\%} + 0,13\eta_{20\%} + 0,1\eta_{30\%} + 0,48\eta_{50\%} + 0,2\eta_{100\%} = \%95,89 \quad (5.37)$$

Dönüştürücünün performansı, Avrupa verimlilik standartlarında belirtilen altı farklı yük koşulunda test edilmiştir. Dönüştürücünün çıkış gücü ve gerilim karakteristiği performansı Şekil 5.16'da verilmiştir. Tasarlanan dönüştürücü, kararlı bir denetleyici özelliğine sahip olup, hem geçici hem de sürekli durum koşullarında çıkış gerilimi 380 V değerinde sabit tutarak talep edilen gücü tam olarak karşılayabilmektedir.



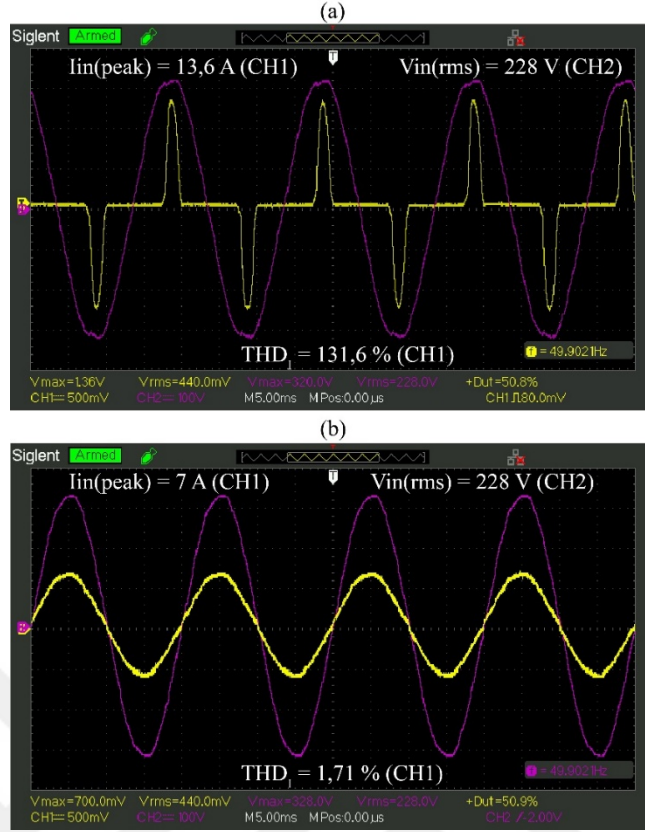
Şekil 5.16: Önerilen dönüştürücünün Avrupa verimlilik standartlarına göre test sonuçları (a) Çıkış gerilimi, (b) Çıkış gücü.

Önerilen dönüştürücünün performansı, AC ve DC giriş gerilimine bağlı olarak incelenmiştir. Farklı DC giriş gerilimleri için elde edilen çıkış gerilimi test sonuçları Şekil 5.17 (a)'da ve değişken AC giriş gerilimleri için ise Şekil 5.17 (b)'de sunulmuştur. Her iki şekilden de görüleceği üzere, tasarlanan dönüştürücü hem DC hem de AC giriş gerilimleri altında çıkış gerilimini 380 V'ta restore edebilmektedir.



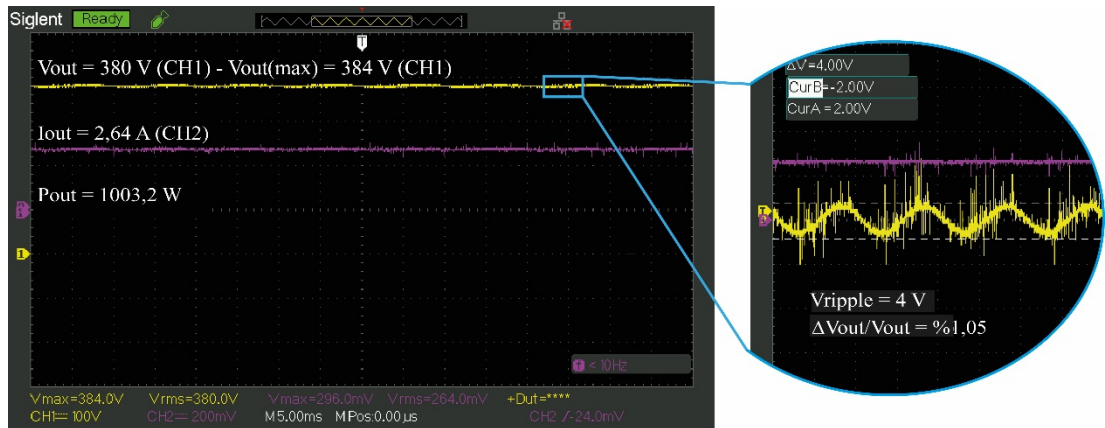
Şekil 5.17: Önerilen dönüştürücünün farklı giriş gerilimlerindeki performansı (CH1 giriş, CH2 çıkış)
 (a) DC giriş, (b) AC giriş.

Tam yük altındaki deneylerde, yük tarafından çekilen akım ve gerilim karakteristikleri, PFC'nin varlığına bağlı olarak incelenmiştir. Deneyler, 1003 W giriş gücü ve 228 V etkin giriş gerilimi koşullarında gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan dönüştürücüde PFC aktif ve PFC pasif olma durumuna karşı tam yükteki giriş akımı ve geriliminin değişimi Şekil 5.18'de verilmiştir. PFC'nin aktif olmadığı durumda, maksimum giriş akımı 13,6 A ve THD değeri %131,6 olarak ölçülmüştür. PFC etkinleştirildiğinde ise maksimum giriş akımı 7 A'e düşmüş ve THD değeri %1,71'e kadar inmiştir. Sonuçlar, PFC'nin etkinleştirilmesiyle maksimum giriş akımında %48,53'lük bir azalma ve harmonik bozulmada %98,70'lik bir iyileşme sağlandığını göstermektedir. Bu sonuçlar, PFC'nin öneminin dönüştürücü performansı üzerindeki olumlu etkilerini göstermektedir.



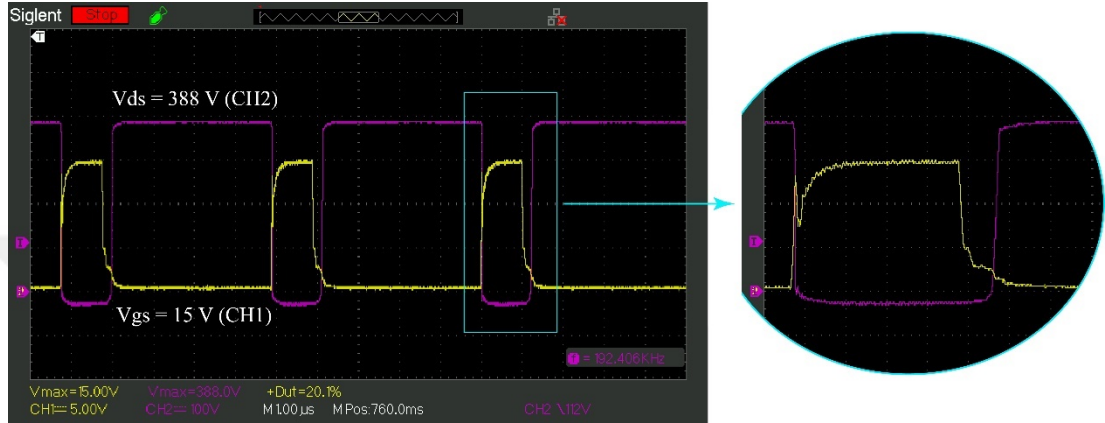
Şekil 5.18: Dönüştürücünün tam yükte giriş akımı (CH1) ve giriş gerilimi (CH2) grafikleri (a) PFC pasif (b) PFC aktif.

Tasarım sürecinde, çıkış gerilim dalgalanmasının %1'den fazla olmayacağı varsayılmıştı. Tam yük altında gerçekleştirilen deneylerde, dönüştürücünün çıkış gerilimi ve çıkış gerilimindeki dalgalanma Şekil 5.19'da sunulmuştur. Çıkış gerilimi 380 V olup maksimum tepe gerilimi 384 V olarak ölçülmüştür. Çıkış gerilimindeki dalgalanma oranı %1,05 olarak belirlenmiştir. Bu değer, tasarımda belirtilen gerilim dalgalanma sınır değerine karşılık gelmektedir.



Şekil 5.19: Dönüştürücü tam yükteyken çıkış gerilimi (CH1) ve çıkış akımı (CH2) grafikleri.

MOSFET'in iletim ve kesim süreleri, dönüştürücünün çıkış geriliminde anahtarlama gürültülerine neden olabilir. Gerilim stresinin minimum seviyeye indirilmesi amacıyla MOSFET'in gate terminaline R_g direnci eklenir. Bu çalışmada R_g değeri $1,8 \Omega$ olarak belirlenmiştir. Bu uygulamaya bağlı MOSFET gate-source ve drain-source terminalleri arasındaki gerilimleri Şekil 5.20'de gösterilmiştir. Böylelikle MOSFET üzerinde önemli bir gerilim stresi oluşmamaktadır.



Şekil 5.20: MOSFET'in gate ve drain terminallerindeki PWM sinyalleri; Vgs gerilimi (CH1) ve Vds gerilimi (CH2).

5.3 Eğim Kontrol Yöntemi

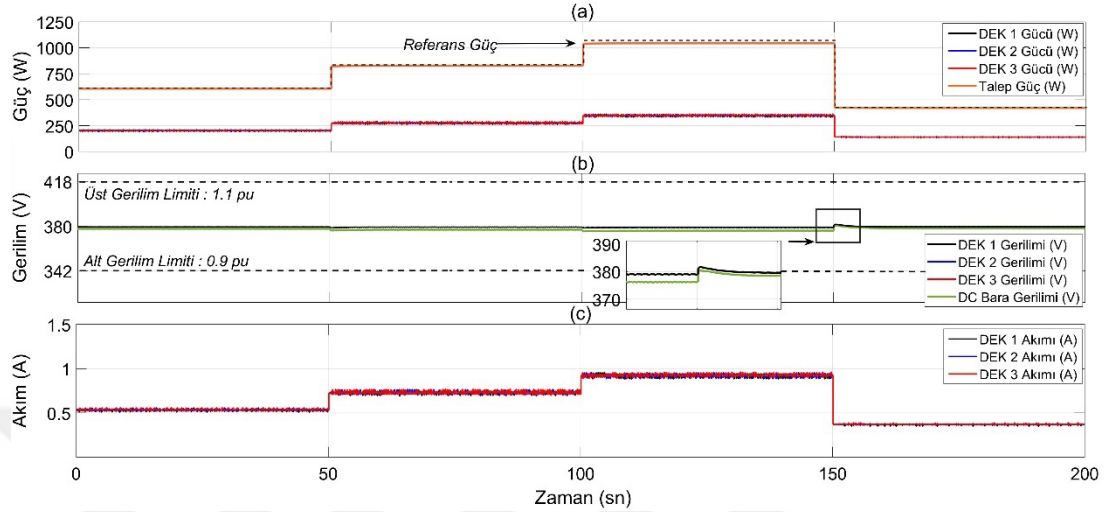
Bu tez çalışması kapsamında oluşturulan laboratuvar ölçekli deneysel çalışma mimarisi Şekil 5.1'de verilmişti. Bu mimaride eşdeğer DEK birimleri, tasarlanan güç dönüştürücüleri ve elektronik yük kullanılmıştır. Deneysel sistemin performansı, geleneksel ve uyarlanabilir eğim kontrol yöntemi kullanılarak değişken yük koşulları altında incelenmiş ve sonuçlar birlikte değerlendirilmiştir.

5.3.1 Geleneksel Eğim Kontrol Yöntemi

Deneysel çalışma için kurulan mikroşebeke mimarisine ait benzetim ve deneysel sonuçları karşılaştırmak için sadece bu alt başlıkta benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonraki başlıkların tamamı deneysel çalışmalar şeklinde olacaktır.

Geleneksel eğim kontrol yönteminde, hat direnç değerleri eşit olarak belirlenmiş ve yük değişimine bağlı benzetim ve deneysel çalışmalar

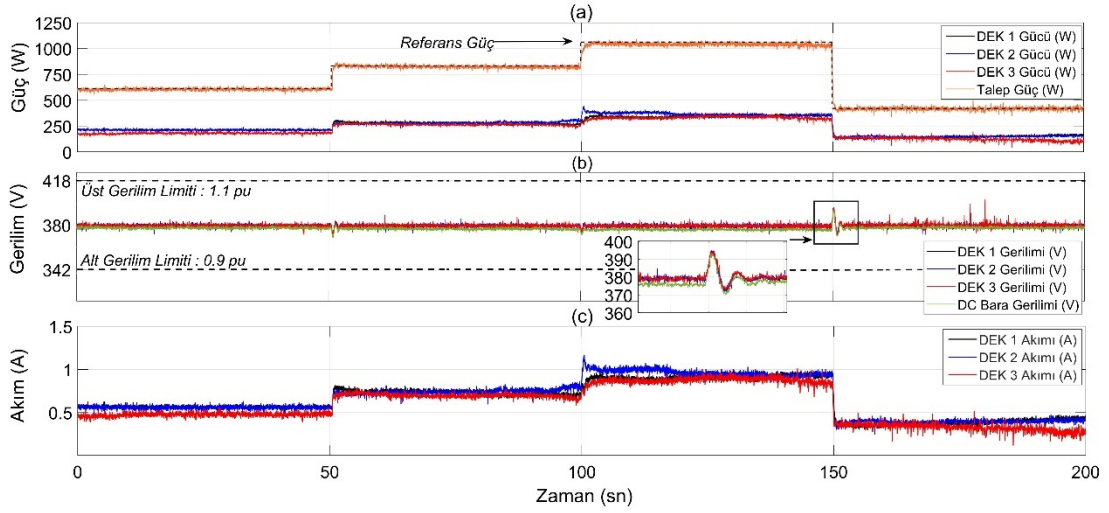
gerçekleştirilmiştir. Hat dirençlerinin değeri $R_l = 3 \Omega$ ve sanal direnç değerleri ise $R_{di} = 1 \Omega$ olarak seçilmiştir. Bu duruma ilişkin güç, çıkış gerilimi ve çıkış akımı benzetim sonuçları Şekil 5.21’de gösterilmiştir.



Şekil 5.21: Geleneksel eğim kontrol yönteminde eşit hat dirençleri kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı.

Sistem başlangıçta 0-50 sn aralığında 612 W rezistif yük ile yüklenmiş ve her bir DEK 202 W güç sağlayarak toplamda yaklaşık olarak 605 W güç aktarmıştır. Benzetim, 50. sn’de 226 W’lık güce sahip rezistif bir yükün devreye girmesiyle devam etmiştir. Bu durumda, DEK’lerin çıkış akımları dengeli bir şekilde dağılırken, DC barada 2,9 V’luk bir gerilim düşüşü gözlenmiştir. Sistemin 100. sn’sinde, yine 226 W’lık rezistif bir yük devreye girmiş ve talep edilen toplam güç 1064 W olmuştur. Yük artışına bağlı olarak DC bara geriliminde 3,8 V’luk bir düşüş meydana gelmiş ve talep edilen güç 1064 W olmasına rağmen yüke aktarılan güç 1043 W ile sınırlı kalmıştır. Son olarak 150. sn’de sistemden 641 W’lık bir yük atılmasıyla, sistem 423 W’lık bir yük ile yüklenmiştir. Benzetim sonuçları, hat dirençleri eşit kabul edildiğinde geleneksel eğim kontrol yönteminin kullanılmasıyla özdeş türdeki üç DEK arasında yüke aktarılan toplam gücün eşit bir şekilde paylaşıldığını göstermiştir. Ancak DC baradan talep edilen güç ve DC bara gerilim regülasyonu tam olarak sağlanamamıştır.

Geleneksel eğim yönteminde hat dirençlerinin eşit olması durumunda benzetim sonuçlarını doğrulamak amacıyla laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalar yapılmış olup sonuçlar Şekil 5.22’de gösterilmiştir.



Şekil 5.22: Geleneksel eğim kontrol yönteminde eşit hat dirençlerine göre deneysel sonuçlar (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı.

Deneysel çalışmalardaki tüm şart ve durumlar benzetim çalışmasıyla eşdeğer olacak şekilde kurgulanmıştır. Benzetim çalışmalarında olduğu gibi, 0-50 sn aralığında sistem 612 W rezistif yük ile yüklenmiştir. DEK 1, DEK 2 ve DEK 3 birimleri sırasıyla 213 W, 211 W ve 180 W güç sağlayarak toplamda 604 W güç aktarımı gerçekleştirmiştir. 50. ve 100. sn'de, 226 W'lık rezistif yükler devreye girmiş ve 100-150 sn aralığında sistemden talep edilen toplam güç 1064 W olmuştur. Her 226 W'lık yük artışında DC bara üzerinde referans gerilime göre 3,2 V ve 4,2 V'luk gerilim düşüşleri meydana gelmiştir. Talep gücün en fazla olduğu zaman aralığında, DEK birimleri sırasıyla 344 W, 359 W ve 342 W güç sağlayarak toplamda 1045 W güç aktarımı gerçekleştirmiştir. Sistem 150. sn'de 641 W'lık bir yük atılmasıyla toplam yük 423 W olmuştur.

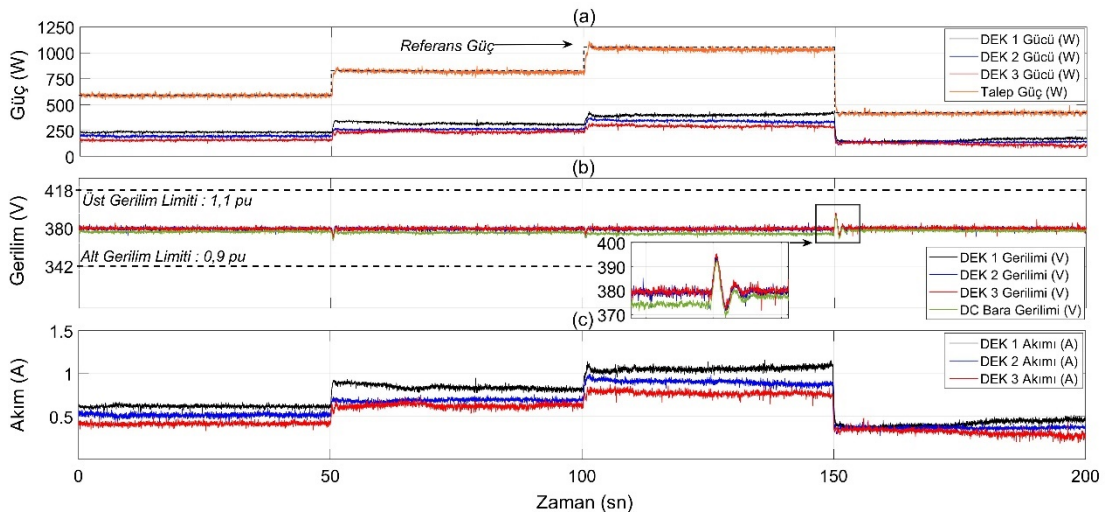
Geleneksel eğim kontrol yöntemi için benzetim ve deneysel çalışma sonuçları Tablo 5.8'de sunulmuştur. Hat dirençleri eşit kabul edildiğinde, benzetim sonuçlarına göre özdeş DEK birimleri yük paylaşımını eşit bir şekilde gerçekleştirmektedir. Bu duruma ilişkin deneysel sonuçlara bakıldığında yük paylaşımı DEK'ler arasında tam olarak eşit paylaşılamamıştır. Örneğin maksimum güç talebi olan 1064 W'ta benzetim sonuçlarına göre DEK'ler arasındaki yük paylaşımı yaklaşık 348 W iken deneysel çalışmada sırasıyla DEK 1 344W, DEK 2 359 W ve DEK 3 342 W olacak şekilde toplamda 1045 W ile sınırlı kalmıştır. Bu durum deneysel çalışmada, sistemi oluşturan kablo, iletim yolları ve bileşenlerin iç dirençleri değişkenlik göstermesinden kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda bu yöntemde DC bara gerilimi nominal değerinin

altında gözlenmiştir. Maksimum gücün talep edildiği durum için nominal gerilim değeri 380 V olması gerekirken deneysel sonuçlara göre DC bara gerilimi 375,8 V'a düşmüştür. Bunun nedeni, hat dirençleri üzerinde meydana gelen gerilim düşümlerinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 5.8: Hat dirençlerinin eşit olduğu durum için geleneksel kontrolün değişken yük talebinde benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin karşılaştırılması.

	Zaman (sn)	Talep güç (W)	Toplam güç (W)	DG1 gücü (W)	DG2 gücü (W)	DG3 gücü (W)	Bara gerilimi (V)	Güç Regülasyonu (%)
Benzetim	0-50	612	605	202	201	202	377,8	98,84
	50-100	838	826	275	275	276	377,1	98,55
	100-150	1064	1043	347	348	348	376,2	97,99
	150-200	423	420	140	140	140	378,4	99,29
Deneysel	0-50	612	604	213	211	180	377,6	98,68
	50-100	838	824	282	280	262	376,8	98,30
	100-150	1064	1045	344	359	342	375,8	98,18
	150-200	423	417	163	155	99	377,4	98,56

Aynı şartlar altında geleneksel eğim kontrol yönteminde farklı hat direncinin kullanıldığı senaryo deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. DEK birimlerinde sırasıyla 4 Ω , 5 Ω ve 6 Ω değerlerinde 5 W güç dayanımına sahip taş dirençler hat direnci olarak kullanılmıştır. Deneysel sonuçlara ilişkin güç, çıkış gerilimi ve çıkış akımı grafikleri Şekil 5.23'te gösterilmiştir.



Şekil 5.23: Geleneksel eğim kontrol yönteminde farklı hat dirençlerinin kullanılmasıyla elde edilen deneysel sonuçlar (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı.

DEK'lerin hat dirençlerinin farklı olması nedeniyle dönüştürücüler arasındaki güç paylaşımında bir miktar farklılıklar gözlenmiştir (bkz. Şekil 5.23 (a)). Örneğin,

100-150 sn aralığında talep edilen 1060 W'lık güç, DEK birimleri tarafından sırasıyla 395 W, 343 W ve 289 W olacak şekilde karşılanmış ve toplamda 1027 W olarak gerçekleşmiştir. Aynı zaman diliminde DC barada 5,9 V'luk bir gerilim düşümü gözlenmiştir (bkz. Şekil 5.23 (b)). Tablo 5.9'da verilen deneysel sonuçlar incelendiğinde, sanal direnç değerleri eşit olmasına rağmen DEK'ler arasındaki yük eşit olarak paylaşılamamıştır. Bu durumun temel sebebi, farklı hat dirençlerinin kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak DEK birimleri güç dağılımını eşit bir şekilde paylaşamamış ve gerilim regülasyonu yetersiz kalmıştır.

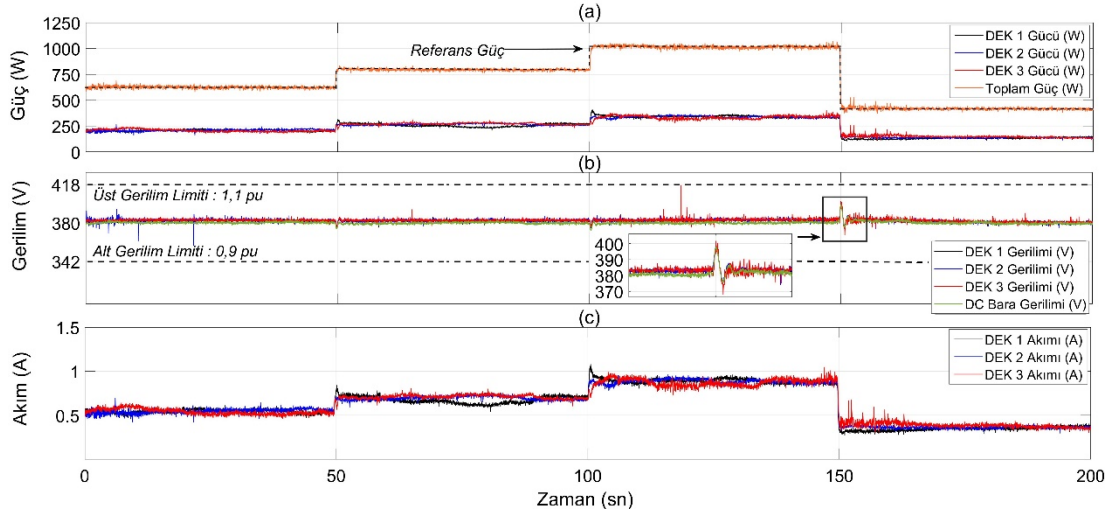
Tablo 5.9: Geleneksel eğim kontrol yönteminde farklı hat dirençlerine bağlı deneysel sonuçlar.

Zaman (sn)	Talep güç (W)	Toplam güç (W)	DG1 gücü (W)	DG2 gücü (W)	DG3 gücü (W)	Bara gerilimi (V)	Güç Regülasyonu (%)
0-50	598	588	235	194	159	376,8	98,30
50-100	835	816	320	263	233	375,5	97,67
100-150	1060	1027	395	343	289	374,1	96,77
150-200	417	412	149	140	123	377,5	98,79

5.3.2 Uyarlanabilir Eğim Kontrolü

Uyarlanabilir eğim kontrol yöntemine ilişkin deneysel çalışmalar geleneksel eğim kontrol yöntemindeki yük profili ve senaryolar dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Böylelikle her iki kontrol yönteminin karşılaştırmalı olarak performans analizi yapılmıştır. Uyarlanabilir eğim kontrol yönteminde eşit hat dirençlerinin kullanıldığı durum için güç, çıkış gerilimi ve çıkış akımı deneysel sonuç grafikleri Şekil 5.24'te sunulmuştur.

Şekil 5.24 (a)'da açıkça görüleceği üzere sistemi oluşturan kablolar, iletim yolları ve bileşenlerin iç dirençlerinin farklılık göstermesi durumunda bile, geleneksel yöntemle kıyasla güç paylaşımı DEK'ler arasında eşit bir şekilde gerçekleşmiştir. Örneğin, maksimum güç talebi olan 1020 W, DEK'ler arasında yaklaşık 340 W olarak eşit bir şekilde paylaşılmıştır. Aynı zamanda, deney süresi boyunca farklı yüklenme durumlarında DC bara gerilimi, referans gerilim olan 380 V'a restore edilmiştir. Uyarlanabilir eğim kontrol için deneysel sonuçlar Tablo 5.10'da ayrıntılı olarak sunulmuştur. Deneysel sonuçlar, uyarlanabilir kontrol yönteminin güç ve gerilim regülasyonunu yüksek başarımla sağladığını göstermektedir.



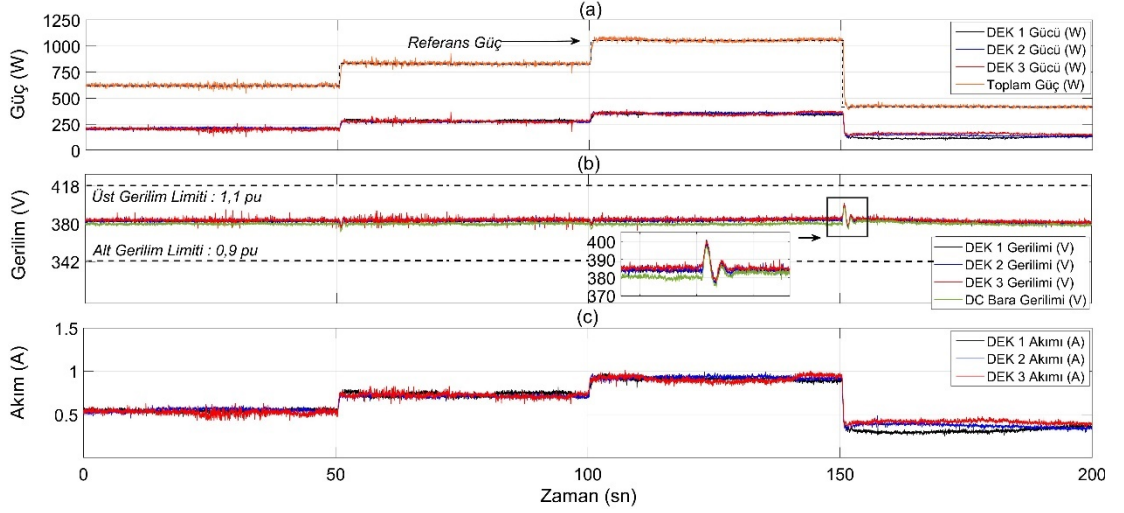
Şekil 5.24: Uyarlanabilir eğim kontrol yönteminde eşit hat dirençleri kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı.

Tablo 5.10: Uyarlanabilir eğim kontrol yönteminde eşit hat dirençlerine bağlı deneysel sonuçlar.

Zaman (sn)	Talep güç (W)	Toplam güç (W)	DG1 gücü (W)	DG2 gücü (W)	DG3 gücü (W)	Bara gerilimi (V)	Güç Regülasyonu (%)
0-50	621	621	216	208	197	380,3	100
50-100	798	796	265	262	269	379,6	99,75
100-150	1020	1019	338	340	341	379,8	99,90
150-200	416	415	139	137	139	379,7	99,76

Uyarlanabilir eğim kontrol yönteminde her bir DEK'in hat dirençlerinin farklı olması durumu için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yine hat dirençleri olarak DEK 1, DEK 2 ve DEK 3 için sırasıyla 4 Ω , 5 Ω ve 6 Ω değerlerinde 5 W güç dayanımına sahip taş dirençler kullanılmıştır. Deneysel çalışmalara ilişkin güç, çıkış gerilimi ve çıkış akımı grafikleri Şekil 5.25'te sunulmuştur.

Her bir DEK birimine farklı hat dirençleri eklenmesi durumunda geleneksel yöntemin aksine dönüştürücüler arasında dengeli bir güç paylaşımının gerçekleştiği Şekil 5.25 (a)'dan açıkça görülmektedir. Örneğin, talep gücünün en yüksek olduğu 100-150 sn zaman aralığında, 1053 W'lık güç, DEK'ler tarafından sırasıyla 350 W, 356 W ve 349 W şeklinde karşılanmıştır. Aynı zaman diliminde DC bara gerilimi, referans gerilim olan 380 V'a restore edilmiştir. DC bara geriliminin değişim grafiği Şekil 5.25 (b)'de görülmektedir. Şekil 5.25 (c)'ye bakıldığında dönüştürücü çıkış akımları, geleneksel kontrol yönteminin aksine her bir DEK arasında eşit bir şekilde paylaşılmıştır. Böylelikle, akım paylaşım doğruluğu artırılmış ve dönüştürücülerin çıkış gerilimleri, referans gerilime restore edilmiştir.



Şekil 5.25: Uyarlanabilir eğim kontrol yönteminde farklı hat dirençlerinin kullanılmasıyla elde edilen deneysel sonuçlar (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı.

Ele alınan senaryolar altında elde edilen deneysel çalışma sonuçları Tablo 5.11'de detaylı bir şekilde verilmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki, bu yöntemde DC bara gerilimi referans gerilime restore edilmiş ve sistemin talep ettiği güç DEK'ler tarafından tam olarak karşılanmıştır.

Tablo 5.11: Uyarlanabilir eğim kontrol yönteminde farklı hat dirençlerine bağlı deneysel sonuçlar.

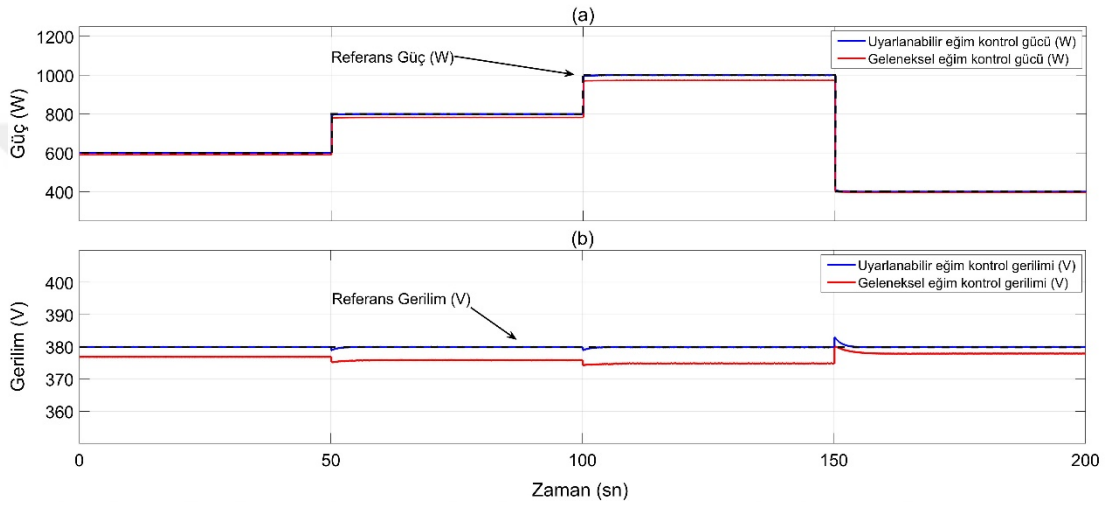
Zaman (sn)	Talep güç (W)	Toplam güç (W)	DG1 gücü (W)	DG2 gücü (W)	DG3 gücü (W)	Bara gerilimi (V)	Güç Regülasyonu (%)
0-50	622	621	208	207	206	379,8	99,84
50-100	832	831	274	276	281	379,7	99,88
100-150	1053	1055	350	356	349	380,2	100
150-200	415	414	130	132	152	379,5	99,76

Sonuç olarak uyarlanabilir eğim kontrol yöntemi, geleneksel yöntemle göre daha iyi bir performans göstererek DC bara gerilim restorasyonu ve akım paylaşım doğruluğu açısından daha iyi sonuçlar vermiştir.

5.3.3 Kontrolörlerin Karşılaştırılması ve Değerlendirmeler

Geleneksel ve uyarlanabilir eğim kontrol yönteminin performans karşılaştırması için farklı hat dirençlerinin ele alındığı senaryonun benzetim sonuçları Şekil 5.26'da verilmiştir. Benzetim çalışmasında talep gücün en yüksek olduğu 100-150 sn aralığında geleneksel eğim kontrolünün DC bara gerilimi 374,9 V iken,

uyarlanabilir eğim kontrolünde 380 V'tur. Bu da göstermektedir ki, geleneksel eğim kontrolünde bara gerilimi referans gerilime oturmazken, uyarlanabilir eğim kontrolü tam olarak 380 V olan referans DC bara gerilimini yakalamaktadır. Talep gücün 1000 W olarak belirlendiği 100-150 sn aralığında geleneksel eğim kontrolü 974 W güç sağlarken, uyarlanabilir eğim kontrolü talep gücü tam olarak karşılamaktadır. Bu sonuçlara göre, uyarlanabilir eğim kontrolü güç aktarımında geleneksel yöntemle göre %2,6 ve DC baranın gerilim regülasyonunda ise %1,34 daha iyi bir performans göstermiştir.



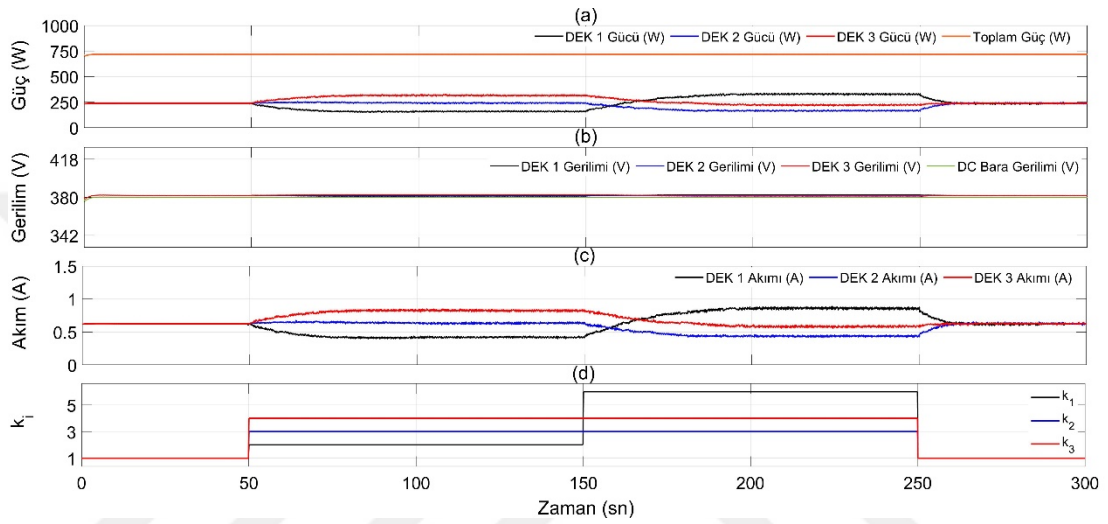
Şekil 5.26: Geleneksel ve uyarlanabilir eğim kontrolörlerin performans karşılaştırması (a) Çıkış gücü, (b) DC bara gerilimi.

Sonuç olarak uyarlanabilir eğim kontrol yönteminin, DC bara gerilim kararlılığını daha iyi sağladığı açıkça görülmektedir. Bu nedenle, uyarlanabilir eğim kontrolünün geleneksel eğim kontrolüne göre talep gücü karşılamadaki performansı daha iyidir.

5.4 Farklı Akım Paylaşım Oranlarına Göre Güç Paylaşımı

Bu başlık altında, uyarlanabilir kontrol yönteminin farklı akım paylaşım oranlarındaki performansını gözlemlemek için benzetim ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, uyarlanabilir yöntem için k_i akım paylaşım oranları 1 olarak seçilmiş ve talep yükü tüm DEK birimleri arasında eşit olarak paylaştırılmıştı. DEK birimleri için seçilen akım paylaşım oranları, her bir kaynağın yüke aktaracağı gücü belirlemektedir. Talep edilen güç 717 W olarak kabul

edilmiş ve bu güç dağılımının nasıl gerçekleştirildiği farklı akım paylaşım oranlarının seçildiği senaryolar altında incelenecektir. Gerçekleştirilen benzetim ve deneysel çalışmalarda akım paylaşım oranları; 0-50 sn zaman aralığında $i_{o1}:i_{o2}:i_{o3} = 1:1:1$, 50-150 sn zaman aralığında $i_{o1}:i_{o2}:i_{o3} = 2:3:4$, 150-250 sn aralığında bu oranlar $i_{o1}:i_{o2}:i_{o3} = 6:3:4$ ve 250-300 sn aralığında ise tekrar $i_{o1}:i_{o2}:i_{o3} = 1:1:1$ şeklinde belirlenmiştir. Farklı akım paylaşım oranlarına sahip sistemin benzetim sonuçları Şekil 5.27’de görülmektedir.

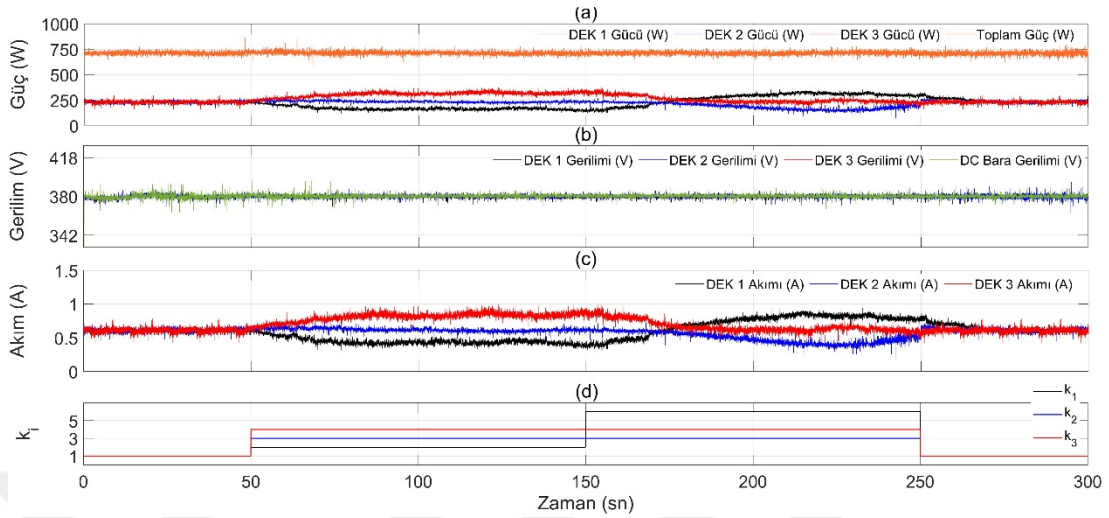


Şekil 5.27: DC baraya bağlı dönüştürücüler arasındaki farklı akım paylaşım oranlarına göre benzetim sonuçları (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı, (d) Akım paylaşım oranları.

İlk 50 sn süre boyunca DEK birimleri arasındaki güç paylaşımı dengeli ve her bir kaynak 239 W'lık yük ile yüklenmiştir. 50-150 sn aralığında akım paylaşım oranları değiştiği için, DEK 1, DEK 2 ve DEK 3 tarafından aktarılan güç değerleri sırasıyla 159 W, 237 W ve 320 W olarak gerçekleşmiştir. Benzetimin 150-250 sn aralığında akım paylaşım oranları tekrar değiştiği için, güç değerleri sırasıyla 322 W, 171 W ve 223 W olmuştur. Benzetimin son aşamasında, akım paylaşım oranları tekrar 1 olarak seçilmiş ve güç paylaşımı dönüştürücüler arasında 239 W olarak dengeli bir şekilde dağıtılmıştır. Tüm senaryolarda talep edilen 717 W'lık güç akım paylaşım oranlarına göre DEK'ler arasında paylaştırılarak güç talebi karşılanmıştır. Referans bara gerilimi Şekil 5.27 (b)'de verilmiş olup DC bara gerilimi referans gerilim olan 380 V'ta başarılı bir şekilde restore edilmiştir.

Uyarlanabilir eğim kontrolünün farklı akım paylaşım oranlarına bağlı DEK birimleri arasındaki güç paylaşımının deneysel doğrulaması, benzetim

çalışmalarındaki senaryolar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel test sonuçları Şekil 5.28'de gösterilmiştir.



Şekil 5.28: DC baraya bağlı dönüştürücüler arasındaki farklı akım paylaşım oranlarına göre deneysel sonuçlar (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı ve (d) Akım paylaşım oranı grafikleri.

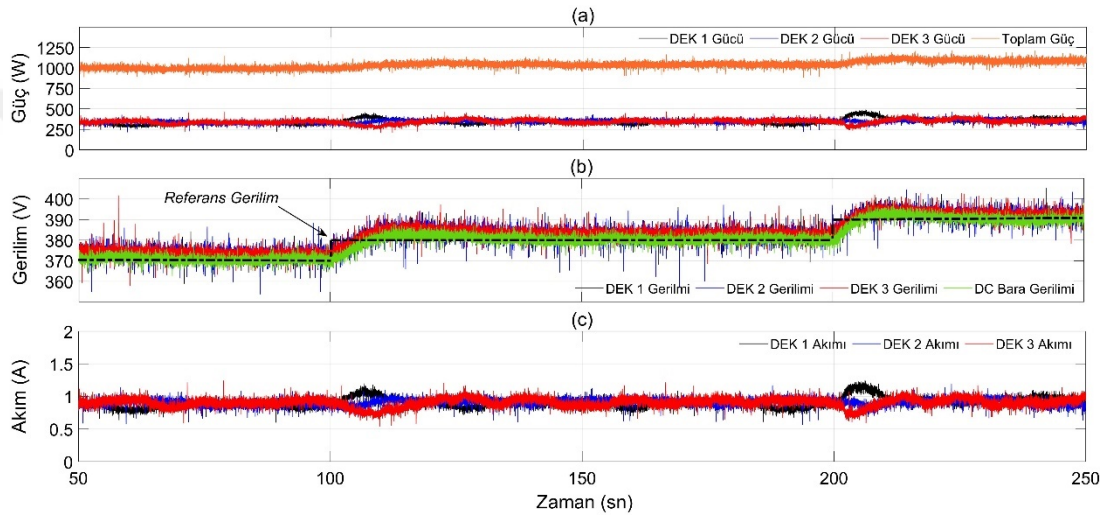
Şekil 5.28 (a)'da görüldüğü üzere, DEK birimlerinin akım paylaşım oranlarına göre güç paylaşımını gerçekleştirmekte ve talep güç tam olarak karşılanmaktadır. Benzer şekilde benzetim sonuçlarında olduğu gibi deneysel test süresi boyunca, DC bara gerilimi 380 V'ta kararlı kalmıştır (bkz. Şekil 5.28 (b)). 717 W'lık talep yükü deneysel çalışma boyunca sürekli olarak beslenmeye devam edilmiştir. Yapılan çalışmanın benzetim ve deneysel sonuçları Tablo 5.12'de verilmiştir. Tablo 5.12'ye bakıldığında belirlenen senaryo eşliğinde güç paylaşımlarının dönüştürücülerin akım paylaşım oranınca dağıtıldığı gözlenmiştir. Aynı zamanda deneysel sonuçlar, benzetim çalışmalarıyla neredeyse birebir örtüşmektedir.

Tablo 5.12: Farklı akım paylaşım oranlarına göre benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar.

	Zaman (sn)	Talep güç (W)	Toplam güç (W)	DG1 gücü (W)	DG2 gücü (W)	DG3 gücü (W)	Bara gerilimi (V)	Güç Regülasyonu (%)
Benzetim	0-50	717	717	239	239	239	380	100
	50-150		716	159	237	320	379,9	99,86
	150-250		716	322	171	223	379,9	99,86
	250-300		717	239	239	239	380	100
Deneysel	0-50	717	717	239	238	240	380	100
	50-150		715	170	227	318	379,6	99,72
	150-250		714	318	155	241	379,4	99,58
	250-300		717	237	239	241	380	100

5.5 Referans Gerilim Değişiminin İncelenmesi

Sistemin gerilim referans değeri şimdiye kadar gerçekleştirilen çalışmalarda 380 V olarak belirlenmişti. Sabit yük altında sistemin referans gerilim değişimine karşı tepkisini gözlemlemek amacıyla referans gerilim sırasıyla 370 V, 380 V ve 390 V olarak seçilmiştir. Sistemde DEK birimlerinin akım paylaşım oranları 1 olacak şekilde belirlenmiştir. Test süresi boyunca direnç değeri 138 Ω olan rezistif bir yük kullanılmıştır. DC bara referans geriliminin değişimine göre güç, çıkış gerilimi ve çıkış akımı deneysel sonuçları Şekil 5.29'da gösterilmiştir.



Şekil 5.29: DC bara referans geriliminin değişimine göre elde edilen deneysel sonuçlar (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı.

İlk olarak, 50-100 sn aralığında gerilim referansı 370 V olarak belirlenmiştir. DEK 1, DEK 2 ve DEK 3 sırasıyla 321 W, 334 W ve 338 W'lık yük ile yüklenerek toplamda 993 W'lık talep yük tam olarak karşılanmıştır. Aynı zamanda DC bara gerilimi, referans gerilim olan 370 V'ta restore edilmiştir.

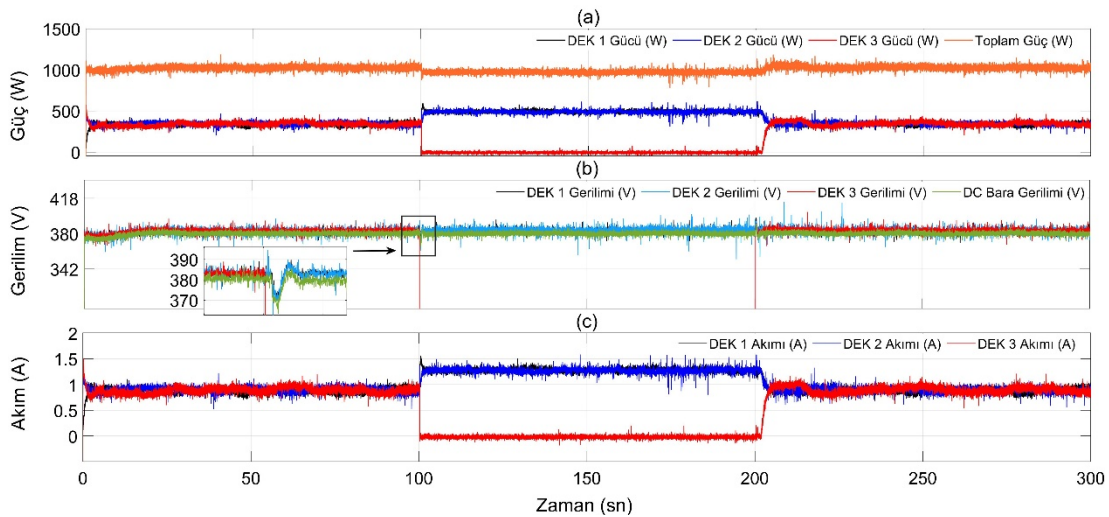
İkinci olarak, 100-200 sn aralığında gerilim referansı 380 V olarak belirlenmiştir. Bu süre boyunca, DEK birimlerinin akım paylaşım oranları değişmediği için dengeli güç paylaşımı sürdürülmüştür. Her bir DEK birimi sırasıyla 337 W, 353 W ve 351 W'lık yük ile yüklenmiştir. Ancak gerilim referansının 380 V'ta yükselmesiyle çıkış gücünde 48 W'lık bir artış gözlenmiştir. Aynı zamanda DC bara gerilimi, referans gerilim olan 380 V'ta restore edilmiştir.

Son olarak, 200-300 sn aralığında gerilim referansı 390 V olarak seçilmiştir. Bu süre boyunca, DEK birimleri sırasıyla 367 W, 355 W ve 368 W'lık yük ile yüklenerek toplamda çıkış gücü 1090 W olarak gözlenmiştir. İlk duruma kıyasla çıkış gücünde, gerilim referansının 390 V'a yükselmesiyle 97 W'lık bir artış gözlenmiştir.

Sonuç olarak, Şekil 5.29 (b)'de görüldüğü gibi üç farklı referans gerilimi altında incelenmiş olup tüm durumlarda DC bara geriliminin referans bara gerilimine ulaştığı gözlenmiştir. Sonuçlar, sistemin referans DC bara geriliminin değişimine hızlı bir şekilde adapte olduğu ve bara geriliminin referans değere başarılı bir şekilde restore edildiğini göstermektedir. Ayrıca adım referans gerilimi değiştiğinde, bara geriliminin restore edilen yeni gerilim değerinde sabit kaldığı görülmüştür.

5.6 Tak-Çalıştır Performansının İncelenmesi

DEK birimlerinin herhangi birisinin arıza veya benzer bir durum nedeniyle DC baradan ayrılması halinde sistemin davranışı incelenmiştir. Her bir DEK biriminin akım paylaşım oranları 1 olarak seçilmiştir. Kontrol şemasının tak-çalıştır performansının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen testlere ait deneysel sonuçlar Şekil 5.30'da verilmiştir.



Şekil 5.30: DEK 3 biriminin bağlantısının kesilmesi ve yeniden bağlanması durumlarında (a) Güç, (b) Çıkış gerilimi, (c) Çıkış akımı grafikleri.

0-100 sn aralığında, 1024 W olan talep gücü, DEK birimleri arasında sırasıyla 338 W, 345 W ve 341 W olarak paylaşılmıştır. Bu zaman diliminde DC bara gerilimi

379,9 V olarak ölçülmüştür. 100. sn'de, DEK 3 devre dışı bırakılmıştır. Bu durumda DEK 3'ün karşıladığı güç, DEK 1 492 W ve DEK 2 487 W ile yüklenerek talep güç karşılanmıştır. DC bara gerilimi 370 V'a kadar düşmüş ancak kısa süre içinde referans bara gerilimine ulaşarak kararlılığını sürdürmüştür. DEK 3, 200. sn'de yeniden devreye alınmıştır. Bu durumda talep güç, DEK birimleri arasında sırasıyla 341 W, 342 W ve 344 W olarak dengeli bir şekilde paylaşılmıştır.

Sonuç olarak, her bir DEK biriminde bağımsız DC-DC dönüştürücünün kullanılması sistemin modülerliğini arttırmaktadır. Böylelikle şebekeye yeni DEK'lerin bağlanması ve/veya çıkması durumunda bile sistem kararlı bir şekilde çalışmasını sürdürmektedir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, fotovoltaik, rüzgâr türbini, dizel generatör ve enerji depolama sistemini barındıran DC mikroşebeke sistemi için üç seviyeli hiyerarşik dağıtılmış kontrol yaklaşımına sahip bir enerji yönetim sistemi önerilmiş ve sistemin benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımda birincil kontrol seviyesi, gerilim ve akım kontrol döngüleri kullanılarak dağıtık üretim birimleri arasında yük paylaşımı gerçekleştirmektedir. İkincil kontrol seviyesi, DC bara gerilim restorasyonunun sağlanması ve akım paylaşım doğruluğunun eşzamanlı olarak arttırılması için kullanılır. Üçüncül kontrol seviyesi ise optimizasyon algoritmaları tarafından uyarlanabilir eğim katsayılarını belirleyerek sistemin optimizasyonu ve işletme maliyetinin en aza indirilmesini sağlar.

Bu kontrol yapısının işletilmesi, hibrit sistemin enerji talebini değişken yük koşulları altında otonom olarak optimum şekilde yönetecek bir strateji önerilmiştir. EYS’de Mod-I, Mod-II ve Mod-III olmak üzere üç çalışma stratejisi belirlenmiştir. Mod-I’de YEK’lerin MPPT operasyonda çalışması sağlanmıştır. Mod-II işletme durumunda DG’nin, yakıt tüketimi ve karbon salınımının en aza indirilmesi amacıyla ECMS tabanlı DP, GA ve PS algoritmaları kullanılmıştır. Mod-III işletme durumunda ise DG’ye ihtiyaç duyulmayıp DEK’ler arasındaki güç akışı, BMK ve DMKS kullanılarak optimize edilmiştir. Mikroşebeke için önerilen EYS’de tüketilen yakıt miktarı ve maliyetinin minimizasyonu, EDS’den optimum yararlanma performans kriterleri olarak dikkate alınmıştır. DG’nin minimum yakıt tüketimi DP tabanlı ECMS işletildiğinde 2,328 L olarak hesaplanmış ve bu durumdaki yakıt maliyeti 3,26 \$ olarak bulunmuştur. DG’nin kontrolsüz çalışma durumuna göre yakıt tüketiminde %23,5’lik bir iyileşme sağlanmıştır. EDS’nin şarj durumu dikkate alındığında en yüksek şarj seviyesi %64,87 ile PS tabanlı ECMS-DMKS kombinasyonunda sağlanmıştır. Yakıt minimizasyonu ve SOC seviyesi birlikte değerlendirildiğinde en iyi sonuç DP tabanlı ECMS-DMKS kombinasyonu olduğu görülmektedir.

YEK’lerin yönetimi bakımından önemli bir rol oynayan güç dönüştürücüleri, mikroşebeke yapısını oluşturan DEK birimleri ile DC bara arasında gerilimin uygunlaştırılmasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca DEK’lerden yüke aktarılan enerjinin kontrol edilmesinde de önemli görev üstlenirler. Tez çalışması

kapsamında mikroşebeke uygulamaları için, yüksek verimli PFC yükselten tip dönüştürücüler imal edilmiş ve deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Tasarlanan dönüştürücünün girişine tam dalga doğrultucu devresi ve filtreler eklenerek AC çıkışlı DEK birimlerinde de kullanıma uygun hale getirilmiştir. Dönüştürücü, 380 V DC çıkış geriliminde 1000 W güç sağlayabilmektedir. Yüksek bir verimliliğe sahip olup tam yükte verimi %97,02 ölçülmüştür. Ayrıca dönüştürücü, Avrupa verimlilik standardına göre test edilmiş ve verimi %95,89 olarak elde edilmiştir. Tam yük altında yapılan testlerde dönüştürücünün THD_r'si %1,71 ve güç faktörü 0,998 olarak ölçülmüştür. Bu dönüştürücüdeki THD_r değeri EN 6100-3-2 D Sınıfı Limitler (A) standartlarına göre belirlenen limitlerin altındadır. Tasarlanan dönüştürücü mikroşebeke uygulamalarında enerji yönetiminin yüksek verimle yapılmasına olanak sağlayacak şekilde kullanılabilir.

Deneysel çalışmalarda üç özdeş DEK birimi, yük ve kontrol bloğundan oluşan bir şebeke yapısı oluşturulmuştur. DEK'ler arasında güç paylaşımının gerçekleştirilmesi amacıyla iki seviyeli hiyerarşik enerji yönetim sistemi işletilmiştir. DC mikroşebeke için laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalarda; geleneksel eğim kontrolü, uyarlanabilir eğim kontrolü, farklı akım paylaşım oranlarına göre güç paylaşımı, sistemin referans gerilimin değişimine gösterdiği tepki ve sistemin tak-çalıştır performansının incelenmesi konuları sistematik olarak ele alınmış ve değerlendirmeler yapılmıştır.

Deneysel sistemin performans incelemesinde ilk olarak geleneksel eğim kontrol yöntemi kullanılmış ve bu yöntemin performansı ortaya konulmuştur. Geleneksel eğim kontrol yönteminde DC bara geriliminin restorasyonu tam olarak sağlanamamış ve referans DC bara geriliminin bir miktar altında kalmıştır. Bu nedenle yük paylaşımı DEK'ler arasında eşit paylaşılamamış ve talep gücü karşılamada yetersiz kalmıştır. Bu durum geleneksel eğim kontrol yönteminin kısıtları arasındadır. Bu kısıtların üstesinden gelmek için uyarlanabilir eğim kontrol yöntemi önerilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan DC mikroşebeke referans bara gerilimi 380 V ve talep güç 1000 W için geleneksel ve uyarlanabilir eğim kontrol yönteminin performansları incelenmiştir. Geleneksel eğim kontrolünde DC bara gerilimi 374,9 V iken, uyarlanabilir eğim kontrolünde 380 V'tur. Bu sonuçlar göstermektedir ki, geleneksel eğim kontrolünde bara gerilimi referans gerilime oturmazken, uyarlanabilir eğim

kontrolü tam olarak 380 V olan referans DC bara gerilimini yakalamaktadır. Talep gücü karşılama performansına bakıldığında geleneksel eğim kontrolü 974 W güç sağlarken, uyarlanabilir eğim kontrol talep güç olan 1000 W'ı tam olarak karşılamaktadır. Bu sonuçlara göre, uyarlanabilir eğim kontrolü güç aktarımında geleneksel yöntemle göre %2,6 ve DC baranın gerilim regülasyonunda ise %1,34 daha iyi bir performans göstermiştir. Sonuç olarak uyarlanabilir eğim kontrol yönteminin, DC bara gerilim kararlılığını daha iyi sağladığı açıkça görülmektedir. Bu nedenle, uyarlanabilir eğim kontrolünün geleneksel eğim kontrolüne göre talep gücü karşılamadaki performansı daha iyidir.

DEK birimleri için seçilen akım paylaşım oranları, her bir kaynağın yüke aktaracağı gücü belirlemektedir. Deneylerde talep güç 717 W olarak kabul edilmiş ve uyarlanabilir kontrol yönteminin performansı farklı akım paylaşım oranlarına göre incelenmiştir. Tüm senaryolarda DC bara gerilimi referans gerilim olan 380 V'ta başarılı bir şekilde restore edilmiş ve talep güç akım paylaşım oranlarına göre DEK'ler arasında paylaştırılmıştır.

Önerilen DC mikroşebeke deney test düzeneğinde sabit yük altında sistemin referans gerilim değişimine karşı tepkisi incelenmiştir. Bu amaçla DC bara referans gerilimi sırasıyla 370 V, 380 V ve 390 V olarak seçilmiştir. Üç farklı referans gerilimi altında yapılan deneylerde tüm durumlar için DC bara gerilimi referans bara gerilimine ulaşmıştır.

Son olarak sistemin tak-çalıştır performansı değerlendirilmiştir. DEK birimlerinin herhangi birisinin arıza veya benzer bir durum nedeniyle DC baradan ayrılması halinde sistemin davranışı incelenmiştir. Özdeş DEK birimlerinden herhangi birisi belirli bir zaman aralığında devre dışı bırakılmış ve sonra yeniden devreye alınmıştır. Devreden çıkan DEK'in karşıladığı güç, diğer DEK birimleri tarafından başarıyla sağlanmıştır. Böylelikle sistemin modülerliği artırılarak şebekeye yeni DEK'lerin bağlanması ve/veya çıkması durumunda sistemin kararlılığı sürdürülmüştür.

Sonuçlar, DC mikroşebeke için önerilen enerji yönetim sisteminin güç akışını optimum, otonom ve kararlı bir şekilde yöneteceğini göstermektedir. Aynı zamanda bu mikroşebeke sistemi tak-çalıştır esnekliğine sahiptir ve kırsal bölgelere, endüstriyel alanlara enerji sağlamak için uygulanabilir.

Gelecek alışmalar için benzetimi yapılan hiyerarşık üç seviyeli dağıtılmış kontrol yaklaşımına sahip EYS'nin gerçek zamanlı deneysel çalışmaları yapılabilir. Tasarlanan DC mikroşebekenin AC ana şebeke ile bağlantı entegrasyonu çalışılabilir. Ayrıca hibrit elektrikli araç, yakıt hücreleri ve ultra kapasitör gibi daha fazla DEK sisteme eklenerek şebeke davranışları incelenebilir.



7. KAYNAKLAR

Aghdam, F. H., Kalantari, N. T. and Ravadanegh, S. N., "Reconfiguration-based hierarchical energy management in multimicrogrid systems considering power losses, reliability index, and voltage enhancement", *Turk J Electr Eng Co*, 28 (5), 2433-2447, doi:10.3906/elk-1907-114, (2020).

Aguera-Perez, A., Palomares-Salas, J. C., de la Rosa, J. J. G. and Florencias-Oliveros, O., "Weather forecasts for microgrid energy management: Review, discussion and recommendations", *Appl Energ*, 228, 265-278, doi:10.1016/j.apenergy.2018.06.087, (2018).

Arefifar, S. A., Ordonez, M. and Mohamed, Y. A.-R., "Energy management in multi-microgrid systems—Development and assessment", *IEEE Transactions on Power Systems*, 32 (2), 910-922, (2016).

Babaiahgari, B., Ullah, M. H. and Park, J.-D., "Coordinated control and dynamic optimization in DC microgrid systems", *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 113, 832-841, (2019).

Beus, M., Banis, F., Pandžić, H. and Poulsen, N. K., "Three-level hierarchical microgrid control—model development and laboratory implementation", *Electric Power Systems Research*, 189, 106758, (2020).

Bukar, A. L., Tan, C. W. and Lau, K. Y., "Optimal sizing of an autonomous photovoltaic/wind/battery/diesel generator microgrid using grasshopper optimization algorithm", *Solar Energy*, 188, 685-696, (2019).

Bukar, A. L., Tan, C. W., Yiew, L. K., Ayop, R. and Tan, W.-S., "A rule-based energy management scheme for long-term optimal capacity planning of grid-independent microgrid optimized by multi-objective grasshopper optimization algorithm", *Energy Conversion Management*, 221, 113161, (2020).

Chaudhary, G., Lamb, J. J., Burheim, O. S. and Austbø, B., "Review of energy storage and energy management system control strategies in microgrids", *Energies*, 14 (16), 4929, (2021).

Choi, J., Shin, Y., Choi, M., Park, W.-K. and Lee, I.-W., "Robust control of a microgrid energy storage system using various approaches", *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10 (3), 2702-2712, (2018).

Das, C. K., Bass, O., Kothapalli, G., Mahmoud, T. S. and Habibi, D., "Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement,

sizing, operation, and power quality", *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 91, 1205-1230, (2018).

De Santis, E., Rizzi, A. and Sadeghian, A., "Hierarchical genetic optimization of a fuzzy logic system for energy flows management in microgrids", *Applied Soft Computing*, 60, 135-149, (2017).

Demirçalı, A., "Design and implementation of modular energy management system for electric vehicles ", Ph.D. Thesis, University of Pamukkale, Denizli, (2021).

Dogan, A., "Optimum sitting and sizing of WTs, FVs, ESSs and EVCSs using hybrid soccer league competition-pattern search algorithm", *Engineering Science Technology*, 24 (3), 795-805, (2021).

Dong, H., Zhao, Z., Fu, J., Liu, J., Li, J., Liang, K. and Zhou, Q., "Experiment and simulation investigation on energy management of a gasoline vehicle and hybrid turbocharger optimization based on equivalent consumption minimization strategy", *Energy Conversion Management*, 226, 113518, (2020).

Dong, W., Yang, Q., Fang, X. and Ruan, W., "Adaptive optimal fuzzy logic based energy management in multi-energy microgrid considering operational uncertainties", *Applied Soft Computing*, 98, 106882, (2021).

El-Bidairi, K. S., Nguyen, H. D., Mahmoud, T. S., Jayasinghe, S. and Guerrero, J. M., "Optimal sizing of battery energy storage systems for dynamic frequency control in an islanded microgrid: a case study of Flinders Island, Australia", *Energy*, 195, 117059, (2020).

Elmouatamid, A., Ouladsine, R., Bakhouya, M., El Kamoun, N., Khaidar, M. and Zine-Dine, K., "Review of control and energy management approaches in micro-grid systems", *Energies*, 14 (1), 168, (2020).

Eriksen, R., "Energy transition outlook 2022 [online]", (13 Mayıs 2023), <https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/>, (2022).

Feroldi, D. and Zumoffen, D., "Sizing methodology for hybrid systems based on multiple renewable power sources integrated to the energy management strategy", *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (16), 8609-8620, (2014).

Fodhil, F., Hamidat, A. and Nadjemi, O., "Potential, optimization and sensitivity analysis of photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system for rural electrification in Algeria", *Energy*, 169, 613-624, (2019).

Hamad, A. A. and El-Saadany, E. F., "Multi-agent supervisory control for optimal economic dispatch in DC microgrids", *Sustainable Cities Society*, 27, 129-136, (2016).

Han, Y., Chen, W., Li, Q., Yang, H., Zare, F. and Zheng, Y., "Two-level energy management strategy for FV-Fuel cell-battery-based DC microgrid", *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (35), 19395-19404, (2019a).

Han, Y., Zhang, G., Li, Q., You, Z., Chen, W. and Liu, H., "Hierarchical energy management for FV/hydrogen/battery island DC microgrid", *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (11), 5507-5516, (2019b).

Hasankhani, A. and Hakimi, S. M., "Stochastic energy management of smart microgrid with intermittent renewable energy resources in electricity market", *Energy*, 219, 119668, (2021).

Hatziargyriou, N., *Microgrids: architectures and control*, John Wiley & Sons, (2014).

Hatziargyriou, N., Jenkins, N., Strbac, G., Lopes, J. P., Ruela, J. and Engler, A., "Microgrids-large scale integration of micro-generation to low voltage grids", *1st International Conference on the Integration of Renewable Energy Sources and Distributed Energy Resources*, 1-8, (2004).

Hijjo, M., Felgner, F. and Frey, G., "FV-Battery-Diesel microgrid layout design based on stochastic optimization", *6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, 30-35, (2017).

Hjalmarsson, J., Thomas, K. and Boström, C., "Service stacking using energy storage systems for grid applications—A review", *Journal of Energy Storage*, 60, 106639, (2023).

Hu, Y. and Solana, P., "Optimization of a hybrid diesel-wind generation plant with operational options", *Renewable Energy*, 51, 364-372, (2013).

International Renewable Energy Agency, "Perspectives for the energy transition: investment needs for a low-carbon energy system [online]", (13 May 2023), <https://www.irena.org/publications/2017/Mar/Perspectives-for-the-energy-transition-Investment-needs-for-a-low-carbon-energy-system>, (2017).

Jamal, S., Tan, N. M. and Pasupuleti, J., "A review of energy management and power management systems for microgrid and nanogrid applications", *Sustainability*, 13 (18), 10331, (2021).

Jayachandran, M. and Ravi, G., "Decentralized model predictive hierarchical control strategy for islanded AC microgrids", *Electric Power Systems Research*, 170, 92-100, (2019).

Kabalıcı, E., Bayındır, R. and Tür, M., *Microgrids and distributed energy systems*, Ankara: Nobel (2021).

Kaysal, A., Koroglu, S. and Oguz, Y., "Design and implementation of high-efficiency converter for DC microgrid applications", *Electrica*, (in press) (2023a).

Kaysal, A., Köroğlu, S. and Oğuz, Y., "Hierarchical energy management system with multiple operation modes for hybrid DC microgrid", *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 141, 108149, (2022a).

Kaysal, A., Köroğlu, S. and Oğuz, Y., "Self-tuning fuzzy PID controller design and energy management in DC microgrid: Standalone and grid connected mode", *Celal Bayar University Journal of Science*, 18 (1), 41-51, (2022b).

Kaysal, A., Köroğlu, S., Oğuz, Y. and Kaysal, K., "Design and experimental implementation of DC-DC converter based self-tuning fuzzy PI controller", *Journal of the Faculty of Engineering Architecture of Gazi University*, 38 (1), 483-495, (2023b).

Kaysal, K., Hocaoglu, F. and Kaysal, A., "Design and experimental implementation of passive battery management systems using ARM-based microprocessors", *Gazi University Journal of Science Part C: Design Technology and Culture*, 9 (1), 26-39, (2021).

Keyhani, A. and Marwali, M., *Smart power grids 2011*, Berlin: Springer, (2011).

Kreishan, M. Z. and Zobaa, A. F., "Allocation of Dump Load in Islanded Microgrid Using the Mixed-Integer Distributed Ant Colony Optimization", *IEEE Systems Journal*, 16 (2), 2568-2579, (2021).

Kundur, P. S., *Power system stability and control*, Surrey, British Columbia: McGraw-Hill Education, (1994).

Kusakana, K., "Operation cost minimization of photovoltaic–diesel–battery hybrid systems", *Energy*, 85, 645-653, (2015).

Laxman, B., Annamraju, A. and Srikanth, N. V., "A grey wolf optimized fuzzy logic based MPPT for shaded solar photovoltaic systems in microgrids", *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (18), 10653-10665, (2021).

Lenhart, S. and Araújo, K., "Microgrid decision-making by public power utilities in the United States: A critical assessment of adoption and technological profiles", *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 139, 110692, (2021).

Lewis, R. M. and Torczon, V., "Pattern search methods for linearly constrained minimization", *SIAM Journal on Optimization*, 10 (3), 917-941, (2000).

Li, Q., Yang, H., Han, Y., Li, M. and Chen, W., "A state machine strategy based on droop control for an energy management system of PEMFC-battery-supercapacitor hybrid tramway", *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (36), 16148-16159, (2016).

Li, Y. and Nejabatkhah, F., "Overview of control, integration and energy management of microgrids", *Journal of Modern Power Systems Clean Energy*, 2 (3), 212-222, (2014).

Li, Z., Zang, C., Zeng, P., Yu, H. and Li, S., "Fully distributed hierarchical control of parallel grid-supporting inverters in islanded AC microgrids", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14 (2), 679-690, (2017).

Liu, W., Zhuang, P., Liang, H., Peng, J. and Huang, Z., "Distributed economic dispatch in microgrids based on cooperative reinforcement learning", *IEEE Transactions on Neural Networks Learning Systems*, 29 (6), 2192-2203, (2018).

Lu, X., Guerrero, J. M., Sun, K. and Vasquez, J. C., "An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29 (4), 1800-1812, (2014).

Lu, X., Xia, S., Sun, G., Hu, J., Zou, W., Zhou, Q., Shahidehpour, M. and Chan, K. W., "Hierarchical distributed control approach for multiple on-site DERs coordinated operation in microgrid", *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 129, 106864, (2021).

Mao, M., Cui, L., Zhang, Q., Guo, K., Zhou, L. and Huang, H., "Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies", *Energy Reports*, 6, 1312-1327, (2020).

Mosa, M. A. and Ali, A., "Energy management system of low voltage dc microgrid using mixed-integer nonlinear programming and a global optimization technique", *Electric Power Systems Research*, 192, 106971, (2021).

Nabi, B. and Seyedtabaie, S., "Fast distributed control design for DC linked microgrids", *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 122, 106221, (2020).

Nabiyev, V. V., *Artificial intelligence: strategy games, pattern recognition, natural language processing*, Ankara: Seçkin Yayıncılık, (2016).

Nemati, M., Braun, M. and Tenbohlen, S., "Optimization of unit commitment and economic dispatch in microgrids based on genetic algorithm and mixed integer linear programming", *Appl Energ*, 210, 944-963, (2018).

Onori, S., Serrao, L. and Rizzoni, G., *Hybrid electric vehicles: Energy management strategies*, London: Springer, (2016).

Ortiz, L., González, J. W., Gutierrez, L. B. and Llanes-Santiago, O., "A review on control and fault-tolerant control systems of AC/DC microgrids", *Heliyon*, 6 (8), e04799, (2020).

Paganelli, G., "Design and control of a traction chain for thermal and electric parallel hybrid vehicle", Ph.D. Thesis, University of Valenciennes, Valenciennes, (1999).

Palizban, O. and Kauhaniemi, K., "Hierarchical control structure in microgrids with distributed generation: Island and grid-connected mode", *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 44, 797-813, (2015).

Peng, H., Li, J., Thul, A., Deng, K., Ünlübayir, C., Löwenstein, L. and Hameyer, K., "A scalable, causal, adaptive rule-based energy management for fuel cell hybrid railway vehicles learned from results of dynamic programming", *ETransportation*, 4, 100057, (2020).

Pourbehzadi, M., Niknam, T., Aghaei, J., Mokryani, G., Shafie-khah, M. and Catalão, J. P., "Optimal operation of hybrid AC/DC microgrids under uncertainty of renewable energy resources: A comprehensive review",

International Journal of Electrical Power Energy Systems, 109, 139-159, (2019).

Qi, Q., Ghaderi, D. and Guerrero, J. M., "Sliding mode controller-based switched-capacitor-based high DC gain and low voltage stress DC-DC boost converter for photovoltaic applications", *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 125, 106496, (2021).

Raghavan, A., Maan, P. and Shenoy, A. K., "Optimization of day-ahead energy storage system scheduling in microgrid using genetic algorithm and particle swarm optimization", *IEEE Access*, 8, 173068-173078, (2020).

Rahman, S., Stückler, F. and Siu, K., "PFC boost converter design guide and application report [online]", (13 May 2023), www.infineon.com/dgdl/InfineonApplicationNote_PFCCCMBoostConverterDesignGuide-AN-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d4624a56eed8014a62c75a923b05, (2016).

Rezk, H., Nassef, A. M., Abdelkareem, M. A., Alami, A. H. and Fathy, A., "Comparison among various energy management strategies for reducing hydrogen consumption in a hybrid fuel cell/supercapacitor/battery system", *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (8), 6110-6126, (2021).

Rosini, A., Labella, A., Bonfiglio, A., Procopio, R. and Guerrero, J. M., "A review of reactive power sharing control techniques for islanded microgrids", *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 141, 110745, (2021).

Shuai, Z., Fang, J., Ning, F. and Shen, Z. J., "Hierarchical structure and bus voltage control of DC microgrid", *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 82, 3670-3682, (2018).

Singh, B., Pal, C., Mukherjee, V., Tiwari, P. and Yadav, M. K., "Distributed generation planning from power system performances viewpoints: A taxonomical survey", *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 75, 1472-1492, (2017).

Singh, D. and Singh, B., "Investigating the impact of data normalization on classification performance", *Applied Soft Computing*, 97, 105524, (2020).

Sinha, S. and Bajpai, P., "Power management of hybrid energy storage system in a standalone DC microgrid", *Journal of Energy Storage*, 30, 101523, (2020).

Song, L., Duan, S., Wang, T. and Liu, X., "A simplified flying capacitor voltage control strategy for hybrid clamped three-level boost converter in

photovoltaic system", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69 (8), 8004-8014, (2021).

Stornelli, V., Mutillo, M., De Rubeis, T. and Nardi, I., "A new simplified five-parameter estimation method for single-diode model of photovoltaic panels", *Energies*, 12 (22), 4271, (2019).

Sukumar, S., Mokhlis, H., Mekhilef, S., Naidu, K. and Karimi, M., "Mix-mode energy management strategy and battery sizing for economic operation of grid-tied microgrid", *Energy*, 118, 1322-1333, (2017).

Suresh, V., Pachauri, N. and Vigneysh, T., "Decentralized control strategy for fuel cell/FV/BESS based microgrid using modified fractional order PI controller", *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (5), 4417-4436, (2021).

Tabatabaei, N. M., Kabalcı, E., Bizon, N. and Hasan, M. A., *Microgrid architecture, control and protection methods*, Springer Cham, (2018).

TDK Electronics, "ETD 44/22/15 Core and accessories [online]", (13 Mayıs 2023), https://search.tdk.com/search?site=FBNXDO0R&charset=UTF-8&group=tdk_hq_en&design=tdkcom-en&query=etd44, (2022).

Texas Instruments, "UCC28180 programmable frequency, continuous conduction mode, boost power factor correction controller [online]", (13 Mayıs 2023), <https://www.ti.com/product/UCC28180?keyMatch=UCC28180D&tisearch=search-everything&usecase=OPN>, (2016).

Tezel Özturan, A., *Optimizasyon ve matlab uygulamaları*, Ankara: Nobel (2019).

Thirunavukkarasu, G. S., Seyedmahmoudian, M., Jamei, E., Horan, B., Mekhilef, S. and Stojcevski, A., "Role of optimization techniques in microgrid energy management systems—A review", *Energy Strategy Reviews*, 43, 100899, (2022).

Turksoy, O., Yilmaz, U. and Teke, A., "Efficient AC-DC power factor corrected boost converter design for battery charger in electric vehicles", *Energy*, 221, 119765, (2021).

US Energy Office, "2030: A national vision for electricity's second 100 years [online]", (13 Mayıs 2023), <https://www.energy.gov/oe/articles/grid-2030-national-vision-electricitys-second-100-years>, (2003).

Van den Broeck, G., Stuyts, J. and Driesen, J., "A critical review of power quality standards and definitions applied to DC microgrids", *Appl Energ*, 229, 281-288, (2018).

Vandoorn, T. L., Vasquez, J. C., De Kooning, J., Guerrero, J. M. and Vandevelde, L., "Microgrids: Hierarchical control and an overview of the control and reserve management strategies", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7 (4), 42-55, (2013).

Wu, B., Lang, Y., Zargari, N. and Kouro, S., *Power conversion and control of wind energy systems*, John Wiley & Sons, (2011).

Yamashita, D. Y., Vechiu, I. and Gaubert, J.-P., "A review of hierarchical control for building microgrids", *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 118, 109523, (2020).

Yang, J., Yuan, W., Sun, Y., Han, H., Hou, X. and Guerrero, J. M., "A novel quasi-master-slave control frame for FV-storage independent microgrid", *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 97, 262-274, (2018).

Yuan, M., Fu, Y., Mi, Y., Li, Z. and Wang, C., "Hierarchical control of DC microgrid with dynamical load power sharing", *Appl Energ*, 239, 1-11, (2019).

Zadeh, L., "Information and control", *Information and Control*, 8, 338-353, (1965).

Zhang, G., Zheng, P., Yu, S., Trinh, H. and Shi, P., "Controllability analysis and verification for high-order dc-dc converters using switched linear systems theory", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36 (8), 9678-9688, (2021).

Zhang, L., Zheng, H., Hu, Q., Su, B. and Lyu, L., "An adaptive droop control strategy for islanded microgrid based on improved particle swarm optimization", *IEEE Access*, 8, 3579-3593, (2019).

Zhang, W., Li, J., Xu, L. and Ouyang, M., "Optimization for a fuel cell/battery/capacity tram with equivalent consumption minimization strategy", *Energy Conversion Management*, 134, 59-69, (2017).

Zia, M. F., Elbouchikhi, E. and Benbouzid, M., "Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects", *Appl Energ*, 222, 1033-1055, (2018).



EKLER

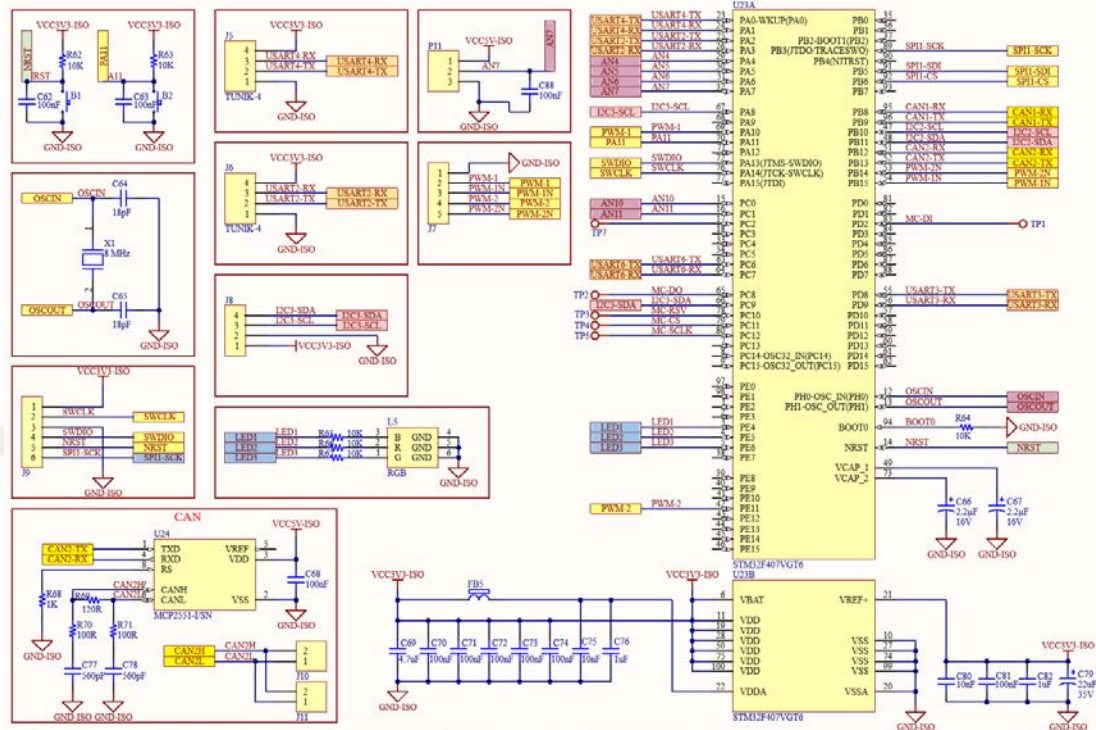
8. EKLER

EK A Bulanık Mantık Tabanlı EYS Kuralları

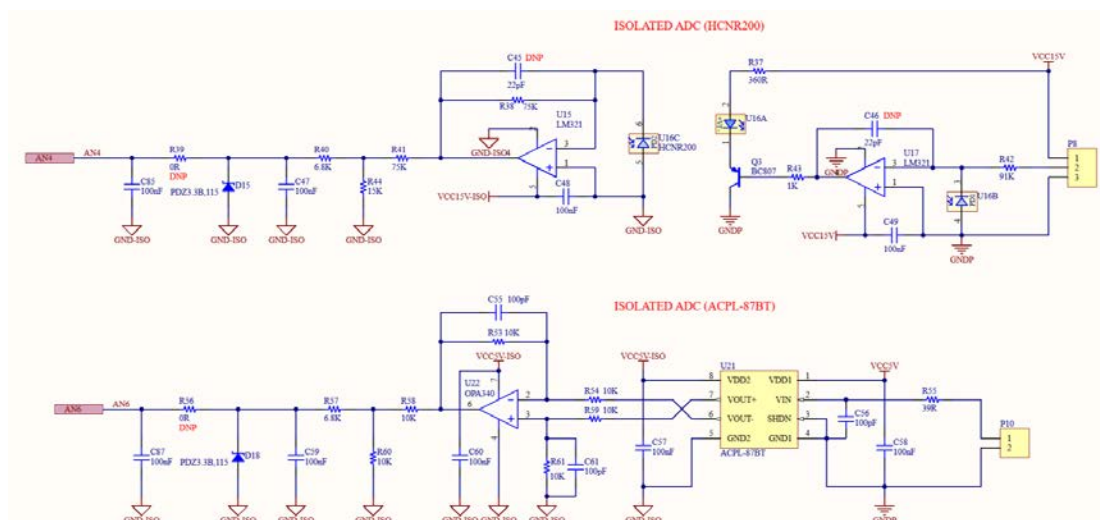
Tablo A.1: Bulanık mantık tabanlı EYS kurallarının ifadesi.

1	$(PL==D) \& (SOC==D) \Rightarrow (PB==D)$
2	$(PL==D) \& (SOC==O) \Rightarrow (PB==O)$
3	$(PL==D) \& (SOC==Y) \Rightarrow (PB==Y)$
4	$(PL==O) \& (SOC==D) \Rightarrow (PB==D)$
5	$(PL==O) \& (SOC==O) \Rightarrow (PB==O)$
6	$(PL==O) \& (SOC==Y) \Rightarrow (PB==\text{ÇY})$
7	$(PL==Y) \& (SOC==D) \Rightarrow (PB==D)$
8	$(PL==Y) \& (SOC==O) \Rightarrow (PB==Y)$
9	$(PL==Y) \& (SOC==Y) \Rightarrow (PB==\text{ÇY})$
10	$(PL==\text{ÇY}) \& (SOC==D) \Rightarrow (PB==O)$
11	$(PL==\text{ÇY}) \& (SOC==O) \Rightarrow (PB==Y)$
12	$(PL==\text{ÇY}) \& (SOC==Y) \Rightarrow (PB==\text{ÇY})$

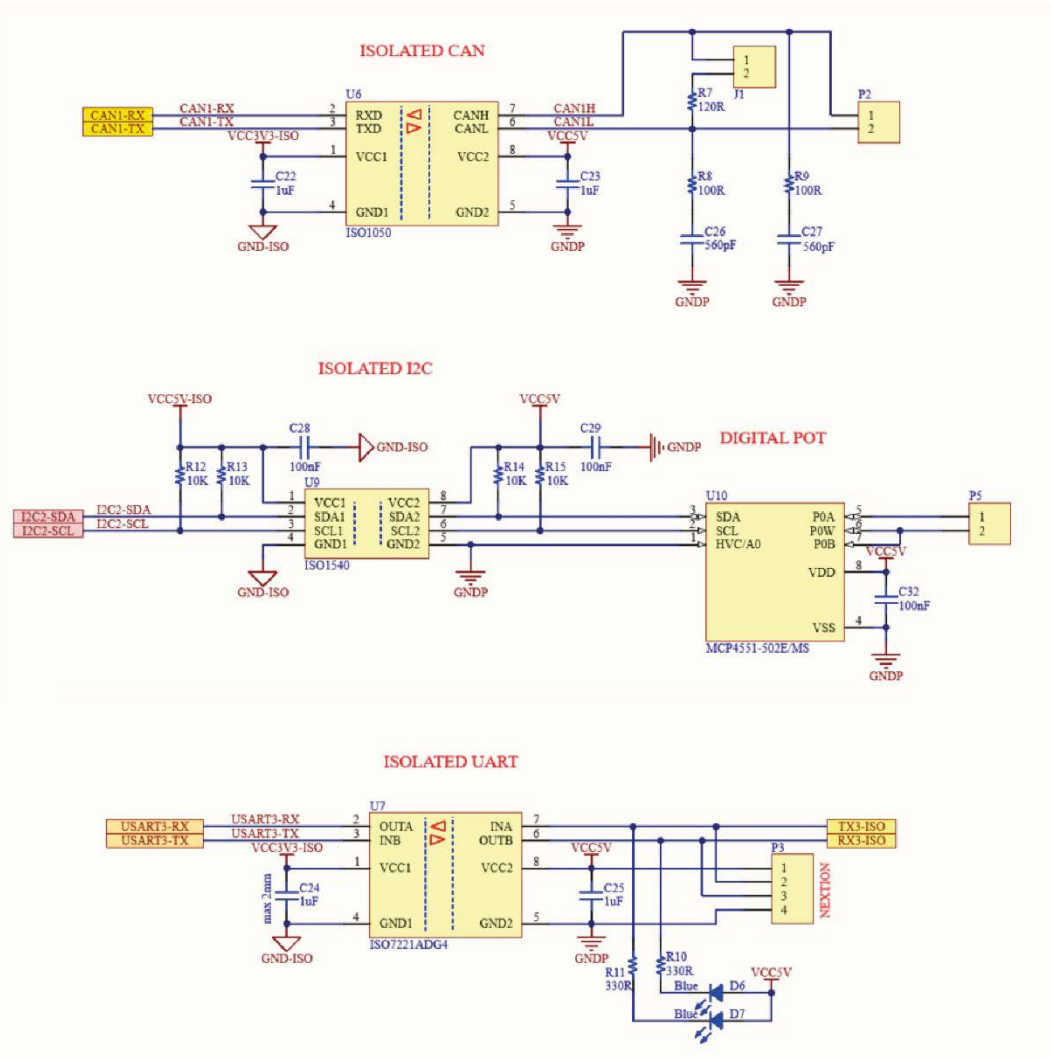
EK B DC-DC Dönüştürücü Tasarım Detayları



Şekil B.1:Kontrol modülü üzerindeki mikrodenetleyicinin giriş çıkış pinleri.



Şekil B.2: Kontrol modülü üzerindeki izole akım-gerilim devreleri.



Şekil B.3: Kontrol modülü üzerindeki izole haberleşme devreleri.

