



**HİBRİT MİKRO ŞEBEKELERDE ZEKİ ALGORİTMALAR İLE GÜÇ
KALİTESİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Kemal ÇELİK

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2024

ETİK BEYAN

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

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

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

Kemal ÇELİK

11/01/2024

HİBRİT MİKRO ŞEBEKELERDE ZEKİ ALGORİTMALAR İLE GÜÇ KALİTESİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Kemal ÇELİK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Geleceğin şebeke yapıları olan mikro şebekeler yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitliliği, talep yönetimi, enerji verimliliği ve iletim kolaylığı gibi avantajlarından dolayı birçok araştırmacının ilgi odağındadır. Son dönemde elektrikli araçlar gibi DA yüklerin artmasıyla hibrit mikro şebeke yapıları önem kazanmıştır. Mikro şebekelerin ada modu çalışma gereklilikleri ve mikro şebekelerde enterkonnekte şebekenin sahip olduğu atalet kapasitesinin bulunmaması, bu şebekelerin kararlı çalışmasını etkilemektedir. Ayrıca bu yapıların büyük olması ve çok parçadan oluşması, yerel optimum çalışma ve küresel optimum çalışma şartları arasındaki farkı arttırır. Bu çalışmada, ada modunda çalışan mikro şebekenin, küresel optimum çalışma şartlarını iyileştirmek için hibrit AA/DA bir mikro şebeke tasarlanmıştır. DA barada güneş paneli grubu, batarya enerji depolama sistemi ve dönüştürücüleri yer almaktadır. AA barada ise rüzgâr türbini ve şebeke besleyen evirici, DA bara enerjisini aktarmak için bir şebeke oluşturan evirici ve AA yükler yer almaktadır. Tüm yapının kararlı çalışabilmesi için algoritmalar ve yönetim sistemleri yazılımları ile ara bağlantı parçaları adım adım tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemde DA barada, güneş panellerinin maksimum güç noktası takibi için değiştir-gözle yöntemi tabanlı, parametreleri vektörlerin ağırlıklı ortalaması (INFO) algoritması ile ayarlanmış, doğrusal olmayan oransal-integral (N-PI) denetleyicisi önerilmiştir. Bunun için öncelikle sistem üzerinde INFO algoritması, tilkilerden ilham alan (FOX), fındıkkıran kuşundan ilham alan (NOA), Çernobil felaketinden ilham alan (CDO) ve eski savaş stratejilerinden ilham alan (WSO) optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca önerilen maksimum güç noktası takibi klasik PI kontrol ile karşılaştırılarak üstünlüğü gösterilmiştir. AA bara için düşüş kontrol yöntemi tabanlı, parametreleri geniş çapta INFO algoritması ile ayarlanan, N-PI denetleyicisi önerilmiştir. Yapılan benzetim çalışması vaka analizlerinde, mikro şebekenin çalışabileceği tüm koşullarda, gerilim kararlılığı sağlanmıştır. Sonuç olarak mikro şebekenin darbe değişim koşullarında, sistemin güç kalitesi sınırları içerisinde kaldığı, ayrıca hızlı ve kararlı dinamik davranış sergilediği doğrulanmıştır.

Bilim Kodu : 90544

Anahtar Kelimeler : Mikro şebekeler, doğrusal olmayan oransal-integral (PI) kontrol, zeki algoritmalar, düşüş kontrol

Sayfa Adedi : 153

Danışman : Prof. Dr. Mehmet DEMİRTAŞ

IMPROVING POWER QUALITY WITH INTELLIGENT ALGORITHMS IN HYBRID MICROGRIDS

(Ph.D. Thesis)

Kemal ÇELİK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2024

ABSTRACT

Microgrids, which are considered as future grid structures, have attracted significant attention from researchers due to their advantages such as the diversity of renewable energy sources, demand management, energy efficiency, and ease of transmission. In recent times, the increase in DA loads, such as electric vehicles, has emphasized the importance of hybrid microgrid structures. The operational requirements in island mode of microgrids and the lack of inertia capacity in the interconnected network of microgrids affect their stable operation. Additionally, the size and complexity of these structures increase the difference between local optimum operation and global optimum operation conditions. In this study, a hybrid AC/DC microgrid operating in island mode is designed to improve the global optimum operating conditions of the microgrid. The DC bus includes a solar panel array, a battery energy storage system, and converters. The AC bus, on the other hand, includes a wind turbine and a grid feeding inverter, a grid forming inverter to transfer DC bus energy, and AC loads. Algorithms and management system software, as well as intermediate connection components, are systematically designed for the stable operation of the entire structure. For the DC bus in the designed system, a non-linear proportional-integral (N-PI) controller with a perturb-observe method-based whose parameters tuned with weighted mean of vectors (INFO) algorithm, is proposed for maximum power point tracking of solar panels. Initially, the INFO algorithm is compared with optimization algorithms inspired by foxes (FOX), nutcracker birds (NOA), Chernobyl disaster (CDO), and ancient warfare strategies (WSO) on the system. Additionally, the superiority of the proposed maximum power point tracking is demonstrated by comparing it with classical PI control. For the AC bus, a drop control method-based N-PI controller whose parameters tuned with the INFO algorithm is proposed. In simulation studies and case analyses, voltage stability is ensured under all conditions in which the microgrid can operate. As a result, it is confirmed that the microgrid stays within the power quality limits and exhibits fast and stable dynamic behavior under transient conditions.

Science Code : 90544

Key Words : Micro grids, nonlinear proportional-integral (PI) control, intelligent algorithms, droop control

Page Number : 153

Supervisor : Prof. Dr. Mehmet DEMİRTAŞ

TEŞEKKÜR

Akademik hayatım ve tez sürecim boyunca değerli yönlendirmeleriyle, bilgi ve tecrübesiyle yoluma ışık tutan danışmanım Sayın Prof. Dr. Mehmet DEMİRTAŞ'a, kıymetli görüş ve yorumlarıyla tez çalışmama yol gösteren değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Nihat ÖZTÜRK'e ve Sayın Prof. Dr. Bünyamin TAMYÜREK'e, değerli görüş ve katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. Nihat DALDAL'a, hiçbir zaman değerli fikirlerini ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi İpek ÇETİNBAS'a ve maddi manevi desteğiyle her zaman yanımda olan eşime, aileme ve dostlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. TASARLANAN SİSTEM	15
2.1. Hibrit AA-DA Mikro Şebeke Tasarımı.....	15
2.1.1. DA bara	16
2.1.2. AA bara	36
2.1.3. Ortak bağlantı noktası	49
3. ZEKİ ALGORİTMALAR.....	63
3.1. FOX Algoritması.....	63
3.2. NOA Algoritması	64
3.3. CDO Algoritması	66
3.4. WSO Algoritması.....	67
3.5. INFO Algoritması	68
3.6. Algoritmaların Karşılaştırılması ve DA Bara Kontrol Parametrelerinin Bulunması	73
3.7. AA bara kontrol parametrelerinin INFO algoritması ile bulunması	75
4. BENZETİM ÇALIŞMALARI	79
4.1. DA Bara Analizi.....	79

Sayfa

4.2. AA Bara Analizi.....	106
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	129
KAYNAKLAR.....	133
EKLER.....	142
EK-1. DA bara simülasyon görüntüsü.....	143
EK-2. AA bara simülasyon görüntüsü.....	144
EK-3. Rüzgâr türbini kontrolü simülasyon görüntüsü.....	145
ÖZGEÇMİŞ	146

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Güneş paneli için kullanılan model parametreleri	17
Çizelge 2.2. Batarya enerji depolama sisteminin parametreleri	29
Çizelge 2.3. Batarya dönüştürücüsünün giriş-çıkış parametreleri	34
Çizelge 2.4. Kullanılan sabit mıknatıslı senkron generatörün parametreleri	41
Çizelge 3.1. INFO, FOX, NOA, CDO ve WSO algoritmalarının kısa özeti	63
Çizelge 3.2. INFO, FOX, NOA, CDO ve WSO algoritmalarının performans çıktıları..	75
Çizelge 3.3. INFO algoritması ile elde edilen PI ve N-PI parametreleri	75
Çizelge 3.4. INFO algoritması ile elde edilen kontrol parametreleri	78
Çizelge 4.1. DA bara dönüştürücü parametreleri	79

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Tasarlanan sistemin blok şeması	16
Şekil 2.2. Güneş panelinin tek diyot eşdeğer devresi	17
Şekil 2.3. Yükselten dönüştürücü modeli	19
Şekil 2.4. Güneş panelinin akım-gerilim ve güç-gerilim grafiği	21
Şekil 2.5. Güneş paneli sisteminin maksimum güç noktası çalışma alanı.....	23
Şekil 2.6. Değiştir-gözle algoritması akış diyagramı.....	24
Şekil 2.7. MATLAB PID tuner aracı ile PID parametrelerinin ayarlanması.....	26
Şekil 2.8. Belirlenen transfer fonksiyonu için PID ve N-PID kontrol simülasyonu.....	26
Şekil 2.9. Simülasyon sonucu elde edilen basamak tepkilerinin karşılaştırması.....	27
Şekil 2.10. Güneş panelinin maksimum güç noktası takibi için sistemin blok şeması...	28
Şekil 2.11. Batarya enerji depolama sisteminin dönüştürücüsü	30
Şekil 2.12. DA bara yönetim sistemi blok şeması	31
Şekil 2.13. DA bara yönetim algoritması.....	33
Şekil 2.14. Ortak bağlantı noktasının blok şeması.....	37
Şekil 2.15. Sabit mıknatıslı senkron generatörün tam eşdeğer devresi.....	39
Şekil 2.16. Sabit mıknatıslı senkron generatörün dq eşdeğer devresi.....	40
Şekil 2.17. Rüzgâr türbininin güç karakteristiği	42
Şekil 2.18. Rüzgâr türbininin dönüştürücü blok şeması	42
Şekil 2.19. Şebeke besleyen eviricinin LC filtre bode diyagramı.....	46
Şekil 2.20. Rüzgâr türbininin maksimum güç noktası takibi kontrol şeması	47
Şekil 2.21. Rüzgâr türbininin reaktif güç kontrol şeması	48
Şekil 2.22. Kaynaklar arası güç aktarımı devre şeması	48
Şekil 2.23. Şebeke oluşturan eviricinin blok şeması.....	50

Şekil	Sayfa
Şekil 2.24. Senkronizasyon için kullanılan kontrolün blok şeması	53
Şekil 2.25. Senkronizasyon algoritması.....	54
Şekil 2.26. Frekans ve gerilim düşüş kontrol karakteristikleri	56
Şekil 2.27. Önerilen AA bara güç paylaşım kontrolünün blok şeması.....	57
Şekil 3.1. FOX algoritmasının sözde kodu	64
Şekil 3.2. NOA algoritmasının sözde kodu	65
Şekil 3.3. CDO algoritmasının sözde kodu.....	66
Şekil 3.4. WSO algoritmasının sözde kodu	68
Şekil 3.5. INFO algoritmasının akış diyagramı	72
Şekil 3.6. PI optimizasyonuna ait performans grafiği.....	74
Şekil 3.7. N-PI optimizasyonuna ait performans grafiği	74
Şekil 3.8. ITAE performans indeksi blok şeması	76
Şekil 3.9. INFO algoritmasına eklenen yardımcı algoritma	77
Şekil 3.10. ITAE performans çıktıları.....	78
Şekil 4.1. Durum 1; güneş paneline uygulanan ısıtım ve sıcaklık grafiği	81
Şekil 4.2. Durum 1; güneş panelinden çekilen güçler	81
Şekil 4.3. Durum 1; kontrolcülerin görev oranları.....	82
Şekil 4.4. Durum 1; güneş paneli gerilimleri.....	83
Şekil 4.5. Durum 2; yük ve kaynaklardan çekilen güçler	84
Şekil 4.6. Durum 2; dönüştürücü görev oranları.....	84
Şekil 4.7. Durum 2; batarya, güneş paneli ve DA bara gerilimleri.....	85
Şekil 4.8. Durum 2; dönüştürücülerin bobin akımları	86
Şekil 4.9. Durum 3; yük ve kaynaklardan çekilen güçler	86
Şekil 4.10. Durum 3; dönüştürücü görev oranları.....	87

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. Durum 3; batarya, güneş paneli ve DA bara gerilimleri.....	88
Şekil 4.12. Durum 3; dönüştürücülerin bobin akımları	88
Şekil 4.13. Durum 4; yük ve kaynaklardan çekilen güçler	89
Şekil 4.14. Durum 4; dönüştürücü görev oranları.....	90
Şekil 4.15. Durum 4; batarya, güneş paneli ve DA bara gerilimleri.....	91
Şekil 4.16. Durum 4; dönüştürücülerin bobin akımları	92
Şekil 4.17. Durum 5; yük ve kaynaklardan çekilen güçler	93
Şekil 4.18. Durum 5; dönüştürücü görev oranları.....	94
Şekil 4.19. Durum 5; batarya, güneş paneli ve DA bara gerilimleri.....	95
Şekil 4.20. Durum 5; dönüştürücülerin bobin akımları	96
Şekil 4.21. Uygulanan ısıtım grafiği	97
Şekil 4.22. Durum 6; yük ve kaynaklardan çekilen güçler	98
Şekil 4.23. Durum 6; dönüştürücü görev oranları.....	99
Şekil 4.24. Durum 6; batarya, güneş paneli ve DA bara gerilimleri.....	100
Şekil 4.25. Durum 6; dönüştürücülerin bobin akımları	101
Şekil 4.26. Durum 7; yük ve kaynaklardan çekilen güçler	102
Şekil 4.27. Durum 7; dönüştürücülerin görev oranları	103
Şekil 4.28. Durum 7; batarya, güneş paneli ve DA bara gerilimleri.....	104
Şekil 4.29. Durum 7; dönüştürücülerin bobin akımları	105
Şekil 4.30. Aktif yük testi; şebeke oluşturan evirici güçleri	106
Şekil 4.31. Aktif yük testi; şebeke besleyen evirici güçleri	107
Şekil 4.32. Aktif yük testi; AA bara gerilimleri.....	108
Şekil 4.33. Aktif yük testi; kontrol parametreleri	109
Şekil 4.34. Aktif yük testi; toplam akım harmoniği.....	110

Şekil	Sayfa
Şekil 4.35. Aktif yük testi; türbin dönüştürücüsü gerilimi ve akımı.....	111
Şekil 4.36. Aktif yük testi; türbin rotor hızı.....	112
Şekil 4.37. Reaktif yük testi; şebeke oluşturan evirici güçleri.....	113
Şekil 4.38. Reaktif yük testi; şebeke besleyen evirici güçleri.....	114
Şekil 4.39. Reaktif yük testi; AA bara gerilimleri	115
Şekil 4.40. Reaktif yük testi; kontrol parametreleri	116
Şekil 4.41. Reaktif yük testi; toplam akım harmoniği	117
Şekil 4.42. Reaktif yük testi; türbin dönüştürücüsü gerilimi ve akımı	118
Şekil 4.43. Reaktif yük testi; türbin rotor hızı	119
Şekil 4.44. Rüzgâr türbinine uygulanan rüzgâr hızı grafiği.....	120
Şekil 4.45. Rüzgâr hızı değişimi testi; şebeke oluşturan evirici güçleri	121
Şekil 4.46. Rüzgar hızı değişimi testi; şebeke besleyen evirici güçleri	122
Şekil 4.47. Rüzgar hızı değişimi testi; AA bara gerilimleri.....	123
Şekil 4.48. Rüzgâr hızı değişimi testi; kontrol parametreleri	124
Şekil 4.49. Rüzgâr hızı değişimi testi; toplam akım harmoniği.....	125
Şekil 4.50. Rüzgâr hızı değişimi testi; türbin dönüştürücüsü gerilimi ve akımı.....	126
Şekil 4.51. Rüzgâr hızı değişimi testi; türbin rotor hızı	127

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
W	Watt
KW	Kilo watt
A	Amper
V	Volt
°C	Derece santigrat
Ω	Ohm
H	Henry
mH	Mili henry
μF	Mikro farad
Hz	Hertz
KHz	Kilo hertz
Vs	Volt saniye
Ah	Amper saat
Nms	Newton metre saniye
Kgm²	Kilogram metre kare
rad/s	Radyan / saniye
pu	Per unit
VAr	Volt amper reaktif
m/s	Metre / saniye
a_1, a_2, a_3	Popülasyon vektöründeki rastgele sayılar
CA	Yakınsama hızı
Rule_{lc}	Yerel arama için güncelleme kuralı
Rule_{ur}	Güncelleme kuralı için güncelleme kuralı
Rule_{vc}	Vektör birleştirme için güncelleme kuralı
v_1, v_2	Rastgele seçilen sayılar
u_l^g	g numaralı nesil için vektör birleştirme
w_1, w_2, w_3	Dalga fonksiyonları

Simgeler**Açıklamalar**

l	Popülasyon için rastgele seçim sayısı
N_{INFO}	Vektör numarası
p	Rastgele sayı
w_i	i numaralı vektör ağırlığı
WF	Dalga fonksiyonu
WM	Ağırlıkların ortalaması
x	Karar değişkeni
x_{avg}	Ortalama çözüm
x_{bs}	En iyi çözüm
x_{bt}	İyi çözüm
x_i	Vektörün ortalama pozisyonu
x_{rnd}	Yeni çözüm
x_{ws}	En kötü çözüm
X	Muhtemel çözüm seti
T_{INFO}	Maksimum nesil numarası
T_{max}	Maksimum iterasyon numarası
z_l^g	g 'inci nesildeki ilk vektör
z_2^g	g 'inci nesildeki ikinci vektör
δ	Ağırlıklı ortalama faktörü
ε	Sabit sayı
σ	Skala faktörü
ω	Genleşme faktörü
ϕ	Rastgele sayı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AA	Alternatif akım
DA	Doğru akım
GA	Genetik algoritma
IEEE	Elektrik elektronik mühendisliği enstitüsü
INFO	Vektörlerin ağırlıklı ortalaması

Kısaltmalar**Açıklamalar****ITAE**

Zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali

LQR

Doğrusal ikinci dereceden düzenleyici

N-PI

Doğrusal olmayan oransal integral

N-PID

Doğrusal olmayan oransal integral türev

PD

Oransal türev

PI

Oransal integral

PID

Oransal integral türev

PSO

Parçacık sürü optimizasyonu

THD

Toplam harmonik bozulumu

1. GİRİŞ

Dünya üzerindeki yaşamın fosil yakıtlar gibi sınırlı enerji kaynaklarına bağımlı olması yaşamın ve teknolojik gelişimin olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Bunun yanında fosil yakıtların çevreye verdiği zararlar göz önüne alındığında, bu kaynaklar, dünya üzerindeki yaşamı da tehdit etmektedir. İnsanlığın hem yaşamını sürdürebilmesi hem de gelişebilmesi için daha temiz ve alternatif enerji kaynaklarına ihtiyacı vardır. Bu nedenle yakın gelecekte güneş ve rüzgâr enerjilerini de içeren yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması beklenmektedir. Bilindiği gibi jeotermal enerji haricindeki yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilen enerjilerin tamamı doğrudan ya da dolaylı olarak güneş enerjisi kaynaklıdır. Bu adı geçen alternatif enerji kaynakların çevreye zarar vermemeleri, enerji tüketiminde karbon ayak izini azaltmaları ve sürdürülebilirlik gibi avantajları nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik çalışmalar, gelecek için yaşamsal bir öneme sahiptir [1-3]. Günümüzde kurulum kolaylığı, düşük bakım maliyeti ve çevre dostu olması nedeniyle güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarındandır. Bu nedenle bu kaynakların ana şebekeye katılımı her geçen gün artmaktadır. Bununla beraber bu kaynakların bazı dezavantaj ve zorluklarından dolayı problemler ortaya çıkmaktadır [4-5]. Güneş paneli ve rüzgâr türbini gibi alternatif kaynaklar doğanın öngörülemez yapısından ve değişken meteorolojik olaylardan dolayı değişken bir üretim yapısına sahiptir. Ayrıca güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri, senkron makine temelli kaynakların sahip olduğu büyük kütlelere sahip olmadığından davranışları dinamiktir [6]. Bu alternatif kaynaklar bağlı oldukları şebekenin ortalama ataletini de düşürmektedirler. Şebekedeki atalet depolanmış enerji kapasitesi anlamına gelir. Bu kapasite ise sağlamlığı arttırarak ani değişimleri filtreler. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının, şebeke kalitesini en az seviyede etkilemesi ve şebekeye en iyi şekilde enerji aktarımının yapılabilmesi güncel bir konu olup, literatürde yoğun bir şekilde çalışılmaktadır [7-8].

Güneş ve rüzgâr santralleri, kurulum alanlarının çeşitli olması ve küçük güçlerden büyük güçlere kadar çeşitli ölçeklerde farklı alanlara uygulanabilmektedirler. Bu oluşum dağıtık enerji üretiminin yolunu açmıştır. Dağıtık enerji üretim şekli, enerjinin üretildiği yerde ve yakın çevresinde tüketilmesi esasına dayanır. Böylece iletim ve dağıtım kayıpları azalacağından verimlilik artacaktır [9-11]. Ayrıca güneş paneli ve rüzgâr türbini gibi

kaynakların küçük güçlerde de kurulabilmeleri sayesinde mikro ve nano şebekeler de ortaya çıkmıştır. Böylece akıllı mikro ve nano şebekelere sahip evler ve işletmeler mümkün olmaya başlamıştır. Bu sisteme sahip bir işletmenin tükettiği enerjiyi çatısındaki güneş panelinden karşılaması halinde iletim ve dağıtım kayıpları neredeyse sıfır olacaktır [12-13].

Mikro şebeke yapıları, enerji taşıma verimliliği, şebeke ile bağlantılı veya şebekeden izole çalışabilme kabiliyetleri, temiz enerji kaynaklarının kolay katılımı, fiziksel ve psikolojik olarak talep dengesine katkı sağlamaları nedeniyle tercih edilmektedirler. Bu yapılar bünyesinde güneş paneli ve rüzgâr türbini gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının fazla olmasından dolayı bu kaynakların kötü yanlarından da etkilenmektedir. Bunlara ek olarak, birçok bileşenin beraber çalışması; arıza olasılığının artması, talep dengesizliği ve yük kalitesi, doğa şartları ve teknolojik eksiklikler gibi birçok zorluğa neden olmaktadır. Literatürde, bu problem ve zorluklara çözüm bulmak için yoğun çalışmalar devam etmektedir [14-16].

Mikro şebekeler, şebekeye bağlı çalışabildikleri gibi şebeke ile bağlantısını keserek kendi yüklerine enerji sağlayabilirler. Şebekeyle enerji alışverişinin yapılmadığı bu durum ada modlu çalışma olarak isimlendirilir. Gerektiğinde şebekeye bağlanarak şebekeyle enerji alışverişi de yapabilirler. Bu çalışma şekli de şebeke bağlantılı moddur. Mikro şebekeler şebeke bağlantılı modda çalıştıkları zaman şebekenin toplam ataletini düşürmelerine karşın kendi ataletlerini yükseltmiş olurlar. Bu mikro şebekelerin dinamik durumunu düzenler. Kararsızlıklar azalır ve enerji fazla olduğunda şebekeye aktararak, eksik olduğunda ise şebekeden enerji alarak talep dengesini korurlar [17-19]. Ancak bu yapıların ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması bir noktadan sonra şebekeyi tamamıyla dengesiz bir hale getirebilir. Yapılan araştırmalara göre en iyi durumda yenilenebilir enerji katılımının %70'ten fazla olmaması gerektiği tahmin edilmektedir. Bu nedenle düşük ataletle, daha iyi kontrol mekanizmalarının geliştirilmesi için de çalışmalar hız kesmeden devam etmektedir. Literatürde bu yönde, enerji depolama yöntemleri, şebeke yapıları, güç elektroniği topolojileri, yeni nesil kontrol yöntemleri ve yapay zekâ ile çalışmalar yapılmaktadır [20-22].

Mikro şebekelerin her durumda kararlılığını koruması gereklidir. Çünkü güç kalitesinin sağlanamaması durumunda önemli yüklerin beslenememesi ya da arızalanması ile

işletmeler ve hatta ülkelerin elektrik şebekeleri ciddi kayıplar verebilir. Mikro şebekelerin kararlılığını arttırmanın bir yolu kaynakların hibrit kullanımıdır. Kaynakların farklı türde olması, enerjinin srekliğinin korunmasına katkı sağlayabilir. Diğer bir seçenek enerji depolama sistemlerinin mikro şebekeye dâhil edilmesidir. Depolanabilen enerji kapasitesi hem hızlı değişimleri filtreler hem de daha uzun periyotlardaki enerji eksikliğini karşılayabilir [23-24]. Ancak depolama sistemleri pahalı yapılar oldukları için istenilen büyüklükte kurulumlar mümkün olamayabilir. Bu nedenle, optimum bir sistemin kurulması için bu yapıların çeşitli kontrol teknikleri ile eş güdümlü çalışması gereklidir [25].

Mikro şebeke topolojilerinde sıklıkla kullanılan bir yapı da hibrit AA-DA bara yapısıdır. Bu yapıda DA kaynaklar ve yükler ile AA kaynaklar ve yüklerin bulunduğu iki enerji bağlantı noktası vardır. Böylece hem elektrikli araçlar gibi DA hem de asenkron makineler gibi AA yüklerin yaygın olduğu günümüzde enerji dönüşüm aşamaları azaltılmış olur. Gerektiği durumda AA baradan DA baraya veya DA baradan AA baraya enerji akışı çift yönlü olarak sağlanır. Çift yönlü bu enerji dönüşümü tasarımı verimi arttırıcı bir yapıya sahiptir [26-27]. Bu yapıda güneş paneli ve batarya enerji depolama sistemi gibi kaynaklar DA baraya bağlanırken, senkron ve asenkron generatör gibi AA kaynaklar ise AA baraya bağlanırlar. AA bara ile DA bara arasındaki enerji dönüşümünü eviriciler sağlar. Evirici yapıları aslında DA enerjiyi AA enerjiye dönüştürürler. Ancak aynı yapılar kontrol tekniğinin değiştirilmesi ile AA enerjiyi DA enerjiye dönüştürerek doğrultucu şeklinde çalışabilirler. Bu avantaj hibrit mikro şebekelerde enerji akışının iki yönde gerçekleşmesine olanak tanır [28]. Aynı durum batarya enerji depolama sistemleri için de geçerlidir. Bataryanın şarj olması gereken durumda enerjinin baradan bataryaya doğru akması, sistemi beslemesi gerektiği durumda ise bataryadan baraya doğru akması gerekmektedir. Burada enerji çeşidinden ziyade DA enerjinin yönü ve büyüklüğü değişiklik göstermektedir. Ayrıca DA dönüştürücülerin kontrolü, kontrol parametreleri daha az olduğu için AA dönüştürücülerine göre daha kolaydır [29]. Bunun yanında bir mikro şebekede maksimum faydayı sağlamamız gereken kaynaklar vardır. Literatürde bu faydayı sağlamak için yapılan çalışmalar arasında maksimum güç noktası takibi teknikleri veya algoritmaları bulunmaktadır [30]. Hem güneş paneli için hem de rzđâr türbini için kullanılabilen algoritmalar olmasına karşın, kaynak yapıları birbirinden çok farklı olduğu için çok farklı yöntemler de mevcuttur. Ortak kullanılan yöntemler genellikle model gerektirmeyen değiştir-gözle, tepe tırmanışı veya meta sezgisel yöntemler gibi tekniklerdir.

Ancak farklı olarak güneş panelleri için açık devre gerilimi, kısa devre akımı veya analitik yöntemler kullanılırken, rüzgâr türbinleri için uç hız kontrolü veya optimal tork kontrolü gibi yöntemler mevcuttur [31-32]. Bu kontrol yöntemleri kaynak ile bara arasına bağlanan güç elektroniği dönüştürücülerine uygulanmaktadır. Örneğin güneş panelinin maksimum güç noktası takibini sağlamak için DA-DA bir dönüştürücü kullanılabilir. Ayrıca doğrudan AA baraya bağlantı yapılabilen DA-AA maksimum güç noktası takibi dönüştürücü yapıları da geliştirilmiştir. Yine rüzgâr türbininin maksimum güç noktası takibini sağlarken, kontrollü doğrultucular evirici yapılarıyla, kontrolsüz doğrultucular DA-DA dönüştürücü yapılarıyla ya da kontrolsüz doğrultucu, DA-DA dönüştürücü ve ardından evirici yapısı birlikte kullanılarak, hem DA baraya hem de AA baraya enerji aktarabilirler. Kontrollü doğrultucu-kontrollü evirici yapılarıyla kontrol edildiklerine rüzgâr türbinlerinin vektör kontrolü sağlanabilir. Bu teknik daha karmaşık olmasına karşın daha başarılı bir kontrol sağlar [33-34]. Rüzgâr türbinleri AA baraya bağlandıklarında maksimum güç sağlamaları gerektiği için genellikle şebeke besleyen evirici adı verilen bir topoloji kullanılır. Bu eviriciler gerilim kontrollü eviricilerdir. Ancak akım kaynağı gibi kontrol edilirler. Genellikle aktif güç sağlarlar ve reaktif güç çıkışları sıfıra ayarlanır. Böylece maksimum aktif güç takibi şeklinde çalışırlar. Bu çalışma şeklinde gerilim ve frekans düzenlemesi yoktur. Sistemin empedansı ne olursa olsun maksimum güç enjekte etmeye çalıştıkları için gerilim ve frekans değişebilir. Bu nedenle yalnız çalıştırılmazlar. Bir şebekeye veya şebeke şartlarını koruyabilen bir kaynağa paralel bağlı çalışabilirler. Bu durum maksimum güç noktası takibi şeklinde çalışan güneş paneli dönüştürücülerini gibi diğer dönüştürücülerde de geçerlidir. Bu nedenle mikro şebekelerin ada modu çalışmalarında, maksimum güç noktası takibi yapmak zorunda olan dönüştürücülerle, gerilim düzenlemesinin sağlanması için gerilim referansına sahip başka dönüştürücüler, birlikte bağlanmalıdır [35-36]. Yine mikro şebeke ada modu gibi maksimum güç noktası takibinin yapıldığı izole sistemlerde, eğer üretilen enerji talep edilen enerjiden fazlaysa gerilim ve makine tabanlı kaynaklar mevcutsa frekans artmaya başlar. Ana dönüştürücü bu durumu düzenleyemez. Çünkü ana dönüştürücü gerilim seviyelerini değiştirse dahi kaynaklar aynı gücü sağlamak için gerilimi (veya frekansı) arttırırlar. Bunun için fazla enerjinin aktarılabilceği bir alan gereklidir. Böylece enerji depolama sistemleri veya şebeke bağlantılı çalışma kendi içlerinde bazı sorunlar olsa da iyi birer seçenektir. Bazı çalışmalarda da bu fazla enerji aktif yüklerde harcanır. Bu yükler işe yarar yük olmasalar da regülasyona katkı sağlarlar. Bu çalışma şekli verimsiz bir çalışmadır, ancak gerekli olduğu durumda asıl yüklerin arızalanmasını engelleyecekse acil durum senaryosu olarak

bir seçenek olabilir. Diğer bir acil durum seçeneği maksimum güç noktası takibi modundan çıkmak olabilir. Bunun için dönüştürücülerin ikincil bir senaryoya sahip olmaları gerekir. Güneş panelleri için referans gerilimlerinin değiştirilmesi veya rüzgâr türbinlerinin kanat açılarının değiştirilmesi örnek olarak verilebilir [37].

Dönüştürücülerin paralel bağlantısında da çeşitli zorluklar mevcuttur. Maksimum güç noktası takibi durumunda çalışmayan dönüştürücülerde güç paylaşımının yapılması örnek olarak verilebilir. Birden fazla dönüştürücü paralel bağlandıklarında dönüştürücülerin ve kaynaklarının güçleri birbirinden farklı olabilir. Ayrıca dönüştürücü ve kaynaklar birbirinden uzak olabilir. Bu durumda güç paylaşımını neye göre yapacakları ayrı bir çalışma konusudur. Burada haberleşme kullanan sistemler daha güvenilir olsa da bunun da sınırları vardır. Özellikle sistemlerin çoğalması ve karmaşıklaşması haberleşme güvenliğini tehlikeye atabilir. Siber saldırılar da diğer bir tehlikedir [38-40]. Ancak bunların yanında haberleşme maliyeti arttırdığı için alternatif çözümler üzerine yoğun çalışmalar devam etmektedir. Düşüş kontrol (droop kontrol) şebekelerde en yaygın kullanılan güç paylaşım yöntemidir. Çünkü herhangi bir haberleşmeye ihtiyaç duymamaktadır. Ancak gerilim ve frekans düzenlemeleri biraz zayıftır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye dâhil olması bu problemi arttırmaktadır. Yine de DA kaynaklar için de AA kaynaklar içinde kullanılabilir [41]. AA baraya paralel bağlanan güç elektroniği cihazları şebeke izleyen veya şebeke oluşturan şeklinde çalışmaktadırlar. Şebeke izleyen eviriciler aktif ve reaktif güç paylaşımı yapan gerilim kontrollü akım kaynağı gibi kontrol edilen eviricilerdir. Bu nedenle gerilim düzenlemesi sağlamazlar. Ancak reaktif güç desteği de sağlarlar. Şebeke oluşturan eviriciler ise aktif güç, reaktif güç, gerilim ve faz açısı gibi kontrolleri sağlayarak şebekeye destek olurlar veya diğer eviricilerin paralel bağlanmasına imkân tanırırlar. Bu eviricilerin iç akım kontrol döngüsü, ara gerilim kontrol döngüsü, sanal empedans kontrol döngüsü gibi iç döngüleri olabilir. Ancak dış gerilim ve frekans döngüleriyle kontrol etmek de mümkündür. Şebeke oluşturan eviriciler genellikle düşüş kontrolü ve sanal senkron makine temelli kontrol yöntemleri ile kontrol edilir. Ancak bunun dışında yeni yöntemler üzerindeki çalışmalar devam etmektedir. Ayrıca şebeke oluşturan evirici çalışmaları son yılların popüler çalışma alanlarından [42].

Tüm bahsettiğimiz gerilim, frekans, aktif ve reaktif güç kontrolü için gerekli yapılar çok katmanlı bir kontrol oluşturmaktadır. Bu katmanlarda iç içe geçmiş kontrol döngüleri yer almaktadır. Bu kontrol döngülerinde ise sıklıkla, kullanımı kolay olması ve yeterli

seviyede başarı sağlaması nedeniyle oransal-integral-türev (PID) denetleyici veya varyasyonları (PI, PD) kullanılır. Bununla beraber literatürde doğrusal ikinci dereceden düzenleyici (LQR), kesir dereceli PID kontrol, gürbüz kontrol ve kayan kipli kontrol gibi üzerinde çalışılan ve şebeke oluşturan eviricilere uygulanan birçok yöntem mevcuttur. Ayrıca bulanık mantık, yapay sinir ağları, akıllı ve meta sezgisel algoritmalar gibi daha akıllı yöntemler üzerindeki çalışmalar da mikro şebekelerin her katmanında hız kesmeden devam etmektedir.

Problemin durumu

Buraya kadar ifade edildiği gibi mikro şebekeler temiz enerji ihtiyacına, yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme katılımına ve talep dengesinin sağlanmasına katkıda bulunan yapılardır. Bu nedenle mikro şebeke çalışmaları günümüz ve gelecekteki enerji ihtiyacının karşılanmasında büyük öneme sahiptir. Ancak bahsedildiği gibi mikro şebeke yapılarının sorunsuz çalışması ve güç kalitesinin garanti edilmesi gereklidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken doğası nedeniyle en uygun sistemin tasarlanması ve en uygun şekilde kontrol edilmesi bir problem olarak tanımlanmaktadır.

Hibrit AA-DA mikro şebekelerde hem DA bara hem de AA bara bulunduğu için kontrol işlemi diğer yapılara göre karmaşıktır. Enerji seviyelerinin dönüşümü ile birlikte kaynak geriliminin türü de değişmektedir. Bu tür sistemlerde maksimum güç noktası takibi dönüştürücülerinin yer almasından dolayı gerilim regülasyonu, yine sistemde makine temelli güç kaynakları varsa frekans regülasyonu problemleri daha fazladır. Hibrit mikro şebeke ada modunda çalışıyorsa bu problemler şebekenin sahip olduğu büyük kapasite yoksunluğundan dolayı daha da artacaktır. Bu problemler ile mikro şebekenin yapısının büyük olması ve birçok parçadan oluşması bir mikro şebekenin otonom çalışmasını ve güç kalitesini sağlamasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca mikro şebeke boyutlarının büyük ve maliyetli olması sadece araştırma amacıyla kurulmalarını da zorlaştırmaktadır. MATLAB gibi programlarda da simülasyonu üzerinde çalışmak, sistemin matematiksel yükünden dolayı, simülasyon zamanının uzamasına ve çok iyi bilgisayarların kullanılmasını gerektirmektedir. Bu ihtiyaçlar karşılansa bile yine de tüm mikro şebeke çalışmalarının gerçek zamanlı simülasyonu sağlanamayabilir. Bu nedenle araştırmacılar mikro şebeke yapıları üzerindeki küçük bölümlerde çalışmayı tercih ederler. Ancak farklı çalışmalarda elde edilen en iyi sonuçların mikro şebekenin tamamına uygulanması ve küresel en iyi

çalışma şeklinin geliştirilmesi için genel sistem üzerindeki çalışmaların da artırılması gerekmektedir.

Hibrit AA-DA mikro şebekenin DA barasında gerilim düzenlemesi esastır. Bunun yanında yenilenebilir enerji kaynaklarında maksimum gücü sağlamak gereklidir. Bu iki durumu sağlayabilmek için enerji depolama sistemleri kullanılmalıdır. Maksimum güç noktası takibini sağlarken ise açık devre gerilimi, kısa devre akımı, değiştir-gözle, artırımı iletkenlik, eğri uydurma, tablo yöntemi, analitik yöntemler, artırımı direnç, kapasitör düşüşü, kayan kipli kontrol, bulanık mantık, yapay sinir ağları ve meta sezgisel algoritmalar gibi birçok yöntem literatürde çalışılmaktadır [43]. Bu çalışmalarda maksimum gücü en verimli şekilde korumak, her koşulda dinamik tepkiyi arttırmak, gölgeli havalarda küresel maksimum gücü belirleyip takip edebilmek gibi değişik hedeflere ulaşılmaya çalışılmaktadır. Maksimum güç noktası takibi yöntemleri için verimliliğin önemli olması kadar kolay uygulanabilir olması da gereklidir. Bu nedenle bir modele dayalı olmayan ve ölçüm verileri kullanan değiştir-gözle yöntemi, artırımı iletkenlik, tepe tırmanışı, artırımı direnç ve beta yöntemi gibi yöntemler halen geliştirilmektedir [44-46]. Örneğin değiştir-gözle yönteminin kötü yanı sabit adımla ilerlemesi ve bu nedenle dinamik davranışının yavaş olmasıdır. Bu da dinamik hava koşullarında verim kaybına neden olur. Yöntemin eksik yönlerinin düzeltilmesi için literatürde değiştirilmiş bir değiştir-gözle tekniği önerilmiştir. Bu teknik uyarlanabilir izleme yapısına sahiptir. Böylece maksimum güç noktasını daha hızlı arar. Diğer yandan maksimum güç noktası çevresinde oluşan salınımları da engelleyebilir. Bunu sağlamak için PI kontrolcüsü kullanılır. Böylece değiştir-gözle tekniğinin dinamik tepkisi artırılır [47]. Güneş panellerinin çalışma koşulları geniş bir yelpazede değiştiğinden ayarlanan PI veya PID parametreleri koşullardan etkilenir ve performansı düşer. Bunun için parametrelerin değiştirilmesi gerekebilir. Literatürde bu sorunun üstesinden gelmek için uyarlanabilir PID parametreleri ile değiştir-gözle yöntemi kontrol edilmiştir. Böylece her çalışma durumunda PID kontrolcüsünün performansı maksimuma çıkarılmıştır. Bununla birlikte değiştir-gözle tekniğinin dinamik performansı artmıştır [48]. Güneş paneli sisteminin izleme hızı ve verimliliğinin iyi olabilmesi için PID parametrelerinin de iyi seçilmiş olması gerekir. Güneş paneli sistemleri doğrusal olmadığı için parametreleri optimize etmek en ideal çözümdür. Literatürde PI kontrolcü ile çalışan değiştir-gözle yöntemi için genetik aloritmaya sahip bir optimizasyon senaryosu önerilmiştir. Böylece parametre kaynaklı sorunlar en aza indirilir [49]. Sistem maksimum güç noktasından çok uzakta olduğunda

sabit adımla yaklaşım zaman almaktadır. Adımı büyütmek tepe noktasında salınımın artmasına neden olmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için literatürde beta yöntemi adı verilen bir yöntem önerilmiştir. Beta ısımadan bağımsız ve sıcaklığa bağlı hesaplanan bir değerdir. İlk aşamada sistem bu parametreye yaklaşmaya çalışır. Böylece hatanın büyük kısmı düzeltilir. Ardından değiştir-gözle gibi bir yöntem ile hassas düzenleme sağlanır. Bu maksimum güç noktasına daha hızlı ulaşma ile sonuçlanır. Dinamik koşullarda enerji verimi artar [50].

Rüzgâr türbini için önerilen maksimum güç noktası takibi yöntemlerinde, kanat açısı kontrolü ve kanat açısının kontrol edilemediği durumlarda ise mekanik olarak optimum çalışma noktasının izlenmesi şekline dayalı yöntemler mevcuttur. Güneş panellerinde olduğu gibi değiştir-gözle yöntemi modelden bağımsız olduğu için sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak rüzgâr türbinlerinin dinamik tepkisi daha düşük olduğu için sabit adım sınırlılıkları rüzgâr türbinlerinde daha büyük bir sorundur. Bu nedenle literatürde değişken adımlı değiştir-gözle yöntemi sabit mıknatıslı senkron generatöre sahip bir rüzgâr türbini için önerilmiştir. Güç ve mekanik hız ölçümü ve buna bağlı olarak rüzgâr hızı tahminine dayanan bir yöntem oluşturulmuştur. Buna göre güç hız grafiği sektörlere bölünür. Her sektör adımı farklı ayarlanır. Maksimum güç noktasına yakın olan adımlar daha küçük daha uzak olan adımlar ise daha büyüktür. Böylece kontrolün dinamik performansı artırılır [51]. Ancak modele bağlı olan yöntemler daha başarılı bir takip sağlayabilir. Literatürde optimal tork kontrolü yöntemi makinenin güç-tork eğrisine göre tork referansı elde ederek maksimum güç noktasına karşılık gelen torku takip edebilir. Aslında q eksenı akımı tork ile orantılı olduğu için akım referansları çıkarılır ve akım referansı takip edilir. Böylece maksimum güç noktası takibi daha hızlı bir tepkiye sahiptir, ancak buradaki temel zorluk vektör kontrolüdür [52]. Yine vektör kontrolü ile başka bir çalışmada uç hız oranı kontrolüne dayalı kayan kipli kontrol önerilmiştir. Uç hız yöntemi rüzgâr hızı, kanat uzunluğu ve optimal hız oranı adı verilen bir sabitten oluşmaktadır. Bu sabit türbinlere göre değişkenlik gösterebilir, ancak genellikle 8,1 alınır. Simülasyon testlerinde sistemin dinamik performansı çok yüksektir ve rüzgâr hızı değişimlerine çok iyi yanıt vermektedir. Buradaki temel sorun rüzgâr hızının ölçümü olabilir [53]. Vektör kontrolü yapılmadığında kontrol daha kolay olmakla birlikte d bileşeni akımı çekileceği için daha verimsiz bir çalışma olur. Ancak küçük güçlü sistemlerde karmaşıklıktan kurtulmak vektör kontrolün getirisine tercih edilmektedir. Bu nedenle literatürde bir çalışmada rotor hızına dayalı bulanık mantık denetleyicisi ile maksimum güç noktası takibi

önerilmiştir. Bu çalışmada kontrolsüz doğrultucu, yükselten dönüştürücü ve şebeke bağlantılı bir evirici kullanılmıştır. Çalışmanın dinamik tepkisinin ve kararlılığının başarılı olduğu ve maksimum gücü takip edebildiği gösterilmiştir [54].

Maksimum güç noktası takibi ile kontrol edilen güneş paneline sahip DA bara ile maksimum güç noktası takibi yapılarak kontrol edilen rüzgâr türbinine sahip AA baranın birleştirilebilmesi için bir eviriciye ihtiyaç vardır. Bu mikro şebeke yapısı ada modunda çalışacağı ve şebeke referanslarını sağlayan başka dönüştürücü bulunmadığı için bu eviricinin şebeke oluşturan evirici şeklinde çalışması gerekmektedir. Literatürde sanal senkron makine temelli kontrol edilen bir şebeke oluşturan evirici, şebeke izleyen evirici ile birlikte çalıştırılmıştır. Ada modu durumunda çalıştırılan sistemde gerilim ve frekans düzenlemesi şebeke oluşturan evirici tarafından sağlanmıştır. Bu evirici senkron makine denklemlerinden faydalanarak kontrol edilir. Örneğin DA hattın kontrolü senkron makinenin rotoru gibi modellenir. DA kapasitörü ise ataleti oluşturur [55]. Şebeke oluşturan eviricilerin ada modu durumunda bir mikro şebekede güç paylaşımlarını sağlamak için literatürde Lyapunov tabanlı bir kontrol önerilmiştir. Buradaki amaç belirlenen bir referans gerilimini tüm eviricilerin takip etmesidir. İkinci sistem durumu olarak çıkış akımı belirlenmiştir. Bu sayede eviricilerin dolaşım akımı sorunları da azaltılmıştır [56]. Düşüş kontrolü iletişimsiz güç paylaşımı için yaygın kullanılan bir yöntemdir. Ancak hat empedansının reaktif olması ilkesine dayanır. Eğer direnç değeri fazlaysa sistemin kontrol başarısı düşer. Bunun için literatürde önerilen, reaktansı ve direnç oranını dikkate alan ve aktif-reaktif güç yerine aktif reaktif akımı kullanan bir düşüş kontrol yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem daha geniş hat empedansı bölgesinde daha başarılı sonuç sergiler. Ayrıca akım kontrolü sağlandığından kısa devre durumlarında da daha güvenli bir çalışma sunar [57]. Düşüş kontrolü basit olmasıyla beraber oransal bir kontrol olması nedeniyle yüksek geçici tepkiye sahiptir. Değişim durumlarında salınımlar oluşmaktadır. Bu salınımları azaltmak için literatürde düşüş kontrolüne integral ve türev özellikleri de eklenmiştir. Böylece PID kontrollü düşüş benzeri bir yöntem sunulmuştur. Bunu sağlamak için aktif güç kontrol edilirken frekans yerine faz açısı kontrol edilmiş ve aktif güç düşüş denkleminde integral ve türev katsayıları eklenmiştir. Reaktif güç düşüş denkleminde ise türev katsayısı eklenmiştir. Çalışmada küçük sinyal modeli ile türev katsayıları ayarlandığında düşüş kontrolünün salınımlarının büyük oranda azaldığı görülmüştür [58].

Literatürde ve sektörde PID kontrol yaygın kullanılan bir yöntemdir. Kolay olması ve hata düzeltmede etkili olması rağbet görmesini sağlamaktadır. PID kontrolden daha etkili denetleyiciler mevcuttur. Ancak uygulama zorlukları da daha yüksektir. Basitlik olarak PID kontrole çok yakın ancak PID kontrolden daha başarılı performans sergileyen ve doğrusal olmayan PID (N-PID) olarak adlandırılan bir yöntem literatürde önerilmiştir. Buradaki amaç hataya bağlı kalarak hataya daha değişken bir yaklaşım sağlamaktır. Hata fonksiyonu doğrusal olmayan bir biçimde değiştirilir. Örneğin hata üstel bir fonksiyon ile çarpılır. Böylece hata büyükse yakınsama adımı daha büyük olacaktır. Hata küçükse yakınsama adımı daha küçüktür. Bu hataya hızlı yaklaşmayı ve aynı zamanda hata çevresinde daha hassas bir kontrol sağlamaya olanak tanır. Burada temel iki zorluk olabilir. İlki fonksiyonu seçmek, ikincisi ise N-PID parametrelerini ayarlamaktır [59]. Bu sorunları çözmek için matematiksel bir yöntem mevcut değildir. Fonksiyonun uygulanışı kolay olduğu için kolayca test edilebilir. Parametreler ise PID kontrolde olduğu gibi ampirik yada sezgisel tabanlı algoritmalar ile tespit edilebilir. N-PID literatürde, sabit mıknatıslı senkron generatör kontrolünde genellikle kanat açısı ayarlamada klasik PID'ye alternatif olarak sunulmaktadır. Literatürde rüzgâr türbini kanat açısı için hiperbolik sekant fonksiyonuna dayalı birleştirilmiş N-P ve N-PID kontrolü önerilmiştir. Değişken hızlarda ve nominal hızlardan uzaklaştıkça klasik PID kontrole göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir [60]. Üç kanatlı değişken hızlı rüzgâr türbininin kanat açılarını ayarlamak için hiperbolik sekant fonksiyonuna dayalı N-PID kontrol yöntemi önerilmiştir. Kontrolcü parametreleri kısıtlı aktif küme algoritmasıyla birleştirilmiş bir gradyan iniş yöntemi ile ayarlanmıştır. Özellikle nominal hızlardan uzaklaştıkça N-PID kontrolünün klasik PID'ye göre üstün olduğu gözlenmiştir [61]. Hibrit güneş ve rüzgâr enerjisi maksimum güç noktası takibi kontrolü için klasik PID ile N-PID kontrolün karşılaştırması yer almaktadır. Her iki denetleyici için de PID parametreleri Genetik algoritma ile ayarlanmıştır. N-PID kontrolcüsünün daha başarılı sonuçlar sergilediği ve bu konuda daha fazla araştırma yapılmasına yönelik motive edici bir yöntem olduğu gösterilmiştir [62].

N-PID kontrolcüsünün parametrelerinin ayarlanması zorluğunun üstesinden gelmek için meta sezgisel algoritmalar literatürde sıkça kullanılmaktadır. Neredeyse algoritmaların hepsi parametreleri iyileştirse de bazı algoritmalar performans açısından daha iyi olabilmektedir. Örneğin güneş paneli sisteminin maksimum güç noktası takibi için bir N-PID kontrolcüsü önerilmiş ve parametreleri de parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve genetik algoritma (GA) ile ayrı ayrı ayarlanmıştır. Detaylı karşılaştırmalar sonucunda PSO

ile ayarlanan N-PID çalışması, klasik değiştir gözle yöntemine göre %26,9; artırılmış iletkenlik yöntemine göre %15,5; GA ile ayarlanan PID yöntemine göre %0,83 ve PSO ile ayarlanan PID yöntemine göre %0,7 güç kaybı iyileştirmesi sağlamıştır [63]. Başka bir çalışmada elektrikli bir aracın dinamik performansını geliştirmek ve güç tüketimini azaltmak için Covid19 optimizasyon algoritmasına dayalı otomatik ayarlı N-PID kontrol yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemin, doğrusal hız testinde sabit ayarlı N-PID ve klasik PID'den %83 daha hızlı yerleşme süresine sahip olduğu görülmüştür [64]. Güneş paneli sisteminin maksimum güç noktası takibi için yapılan bir çalışmada öğretme-öğrenme yöntemine dayalı optimizasyon ile ayarlanan bir N-PID denetleyicisi önerilmiştir. N-PID kontroldeki özellik sadece integral hatasının $\cosh(k0.e)$ fonksiyonu ile çarpılmasıdır. Kapsamlı bir şekilde araştırılan çalışmada önerilen yöntem değiştir-gözle, artırılmış iletkenlik ve klasik PID kontrol ile karşılaştırılmıştır. Yapılan vaka çalışmalarında önerilen yöntem, PID kontrole göre güç kaybını minimum %16,46; maksimum %99,97 iyileştirmiştir. Artırılmış iletkenlik ve değiştir-gözle yöntemleri, PID kontrolden daha düşük performans sergilemiştir [65].

Geçtiğimiz yılda yayınlanan bir çalışmada INFO adı verilen, ağırlıklı ortalama yaklaşımından ilham alan, popülasyon tabanlı bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritma 48 matematiksel fonksiyona ve 5 mühendislik problemine uygulanmış, 6 iyi bilinen ve 9 gelişmiş algoritma ile toplamda 15 güncel algoritma ile karşılaştırılmıştır. Yapılan detaylı istatistiksel analizler sonucunda INFO algoritmasının üstün başarısı gösterilmiştir [66]. Kısa zamanda literatürde 290'dan fazla kere test edilen bu algoritma yenilenebilir enerji sistemleri için de çeşitli problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Örneğin rüzgâr enerji santrallerinin varlığında IEEE 30 ve 57 baralı enerji sistemlerinin optimal güç akışı sorununu çözmek için INFO algoritması kullanılmıştır. Toplam üretim maliyetini minimuma indirerek başarısını göstermiştir [67]. Aşırı dinamik hava koşullarında rüzgâr gücünün gerçek zamanlı tahmini yapılan bir çalışmada, güç dağıtımının çözümü ve güç salınımlarının azaltılmasında INFO algoritması uygulanmıştır. Bu aşırı şartlarda güç kontrol performansı etkili bir şekilde iyileştirilmiştir [68]. Güneş panellerini modellemenin ve güç tahmininin önemli bir parçası olan güneş paneli parametrelerinin tahmini için INFO algoritması önerilmiştir. Tek diyot, çift diyot, integral ve kesirli modeller üzerinde test edilen algoritma diğer birçok güncel algoritma ile karşılaştırılmış ve daha başarılı bulunmuştur [69]. Bu çalışmalar ve literatürdeki diğer çalışmalar bu algoritmanın optimum

N-PID parametrelerinin çözümünde hızlı ve etkili sonuçlar bulacağı yönündeki motivasyonumuzu arttırmaktadır.

Araştırmanın amacı

Bu çalışmada başlangıçta tartışılan ve literatür araştırmasında bahsedilen problemler üzerinde çalışmalar yürütebilmek için ada modunda çalışan bir hibrit AA-DA mikro şebeke yapısı tasarlanmıştır. Bu yapıyı kurmak için bilgisayar benzetimi ve gerçek uygulamalar olmak üzere iki seçenek mevcuttur. Her iki durumunda simülasyon ve uygulama aşamaları için zorlukları bulunmaktadır. Ancak benzetim çalışmaları ne kadar zor olsa da daha az maliyetlidir. Bu nedenle ilk aşamada MATLAB/Simulink benzetim tasarımında karar kılınmıştır. Mikro şebeke kurulumundaki diğer bir problem birçok bağımsız parçanın ve yapılan bağımsız araştırmaların bir araya getirilerek birleştirilmesinde ve optimum çalıştırılmasında gerekli olan ara malzemelerdir. Bu bağlayıcı malzemeler güç elektroniği elemanları, kontrol teknikleri ve yazılım teknikleridir. Bu kadar büyük bir yapıda doğrusallık bozulmaktadır. Sistem geniş çalışma alanlarında hareket etmektedir. Bu durum sabit kontrol parametrelerinin performansını düşürmekte hatta kontrol dışına çıkarmaktadır. Ayrıca böyle bir sistemin güç kalitesini koruyabilmesi için her durumun dikkate alınması gereklidir. Bu, sistemin kontrol yazılımlarının büyümesine ve tepkilerinin yavaşlamasına neden olur.

Bu çalışmanın ilk amacı sistemin otonom çalışması ve tüm bileşenlerin optimum birleştirilmesi için gerekli kontrol tekniği, güç elektroniği yapısı ve yazılımlarının oluşturulmasıdır. Özellikle otonom çalışmada ve durum geçişlerinde ara bağlantı algoritmalarının tasarlanması sistem bütünlüğünü korumak için önemlidir. Amaç ayrı ayrı iyi çalışan sistemlerin birleştirilerek minimum arıza oranı ile maksimum verimi elde edebilecek sistem tasarımını sağlamaktır. Bunun için ara bağlantı sistem tasarımları ve algoritmaları önerilmiştir. Çalışmanın ikinci amacı dinamik tepkiyi arttırmaktır. Bu, özellikle güneş paneli sistemi gibi maksimum faydanın alınması gereken bileşenlerde, hava şartlarının aşırı değişken olduğu zamanlarda verim kaybının düşürülmesine imkân sağlar. Hava şartlarının dinamik olmasının, olağan bir durum olduğu dikkate alınırsa kontrolcünün dinamik tepkisinin artması küresel verimi oldukça yükseltir. Bu dinamik tepki artışı, değiştir-gözle tekniğine uygulanmış N-PI kontrol ile sağlanmıştır. N-PI kontrolün ilk özelliği dinamik tepkiyi arttırmasıdır. Çalışmanın üçüncü amacı güç kalitesini sağlamak ve

korumaktır. Güç kalitesini etkileyen şartlarda, sistemin denge noktasına geri gelmesi ve bu noktayı koruması, yükler için hayati öneme sahiptir. Özellikle ada modunda çalışan mikro şebekenin güç üretiminde veya talebinde yaşanan en küçük değişim, atalet eksikliğinden dolayı dengesiz salınımlara, kalite koşullarının dışına çıkılmasına ve yüklerin arızalanmasına yol açabilmektedir. Bu kalite, DA barada, batarya enerji depolama sistemi için, önerilen DA bara yönetim algoritması ile kontrol edilerek sağlanmıştır. AA barada ise şebeke oluşturan eviricinin düşüş kontrolü ile sağlanmıştır. Çalışmanın dördüncü amacı ise çalışmayı bir adım ileri taşımak için sabit kontrol parametrelerinin sistemin geniş aralığındaki performans düşüşünü iyileştirmektir. Bunun için sistemde oluşan hata durumuna göre daha dinamik tepki veren N-PI kontrolcüsü düşüş kontrole uygulanmış ve sistemin geniş aralığında INFO algoritması ile optimize edilmiştir. Böylece N-PI ve INFO algoritması değiştir-gözle ve düşüş kontrole uygulanarak hem dinamik tepki arttırılmış hem sistemin çalışma sınırları genişletilmiştir.

Araştırmanın önemi

Bu çalışma için ana hedef; ada modu hibrit AA-DA mikro şebekenin geniş çalışma koşullarında kararlı çalışması, güç kalitesini koruması, dinamik tepkisinin iyileştirilerek veriminin arttırılması ve mikro şebeke yapısının birçok parçasının birleştirme zorluklarının üstesinden gelerek hem bu noktadaki bilgi eksikliğinin giderilmesi hem de bundan sonraki çalışmalar için zemin hazırlamasıdır. Bu sistemin simülasyon tarafını kurmanın zorluğu, günümüzdeki son nesil işlemcili bilgisayarlar kullanılmasına rağmen istenen tüm özelliklerin dahil edilememesi ve istenen hızda çalıştırılamamasıdır. Örneğin bu tez çalışması için rüzgâr türbininin vektör kontrolü de simülasyon ortamında tasarlanıp, çalıştırılıp başarılı bir şekilde parametre optimizasyonu sağlanmış olmasına rağmen, çalışmanın büyüklüğünden dolayı tüm sistemin içerisine dahil edilememiştir. Eklendiğinde tüm simülasyon çalışmaz hale gelmektedir. Bu nedenle rüzgâr türbini maksimum güç noktası takibi kontrolü, kontrolsüz doğrultucu ve DA-DA dönüştürücü yapısıyla sağlanmıştır. Sistemin bütününi kurmaya çalışmamızın ve tam bir mikro şebeke tasarlamamızın amacı ise ayrı ayrı optimize edilen kontrol parametrelerinin sistemin birleştirilmesi halinde performanslarının düşmesidir. Çünkü bağımsız çalışan sistem parçaları birbirini etkilemektedir. Bu nedenle sistemin tamamının kurulup küresel optimum parametrelerin bulunması küresel verimi arttırmaktadır.

Özetle bu çalışmada küresel sistem kontrolünün verimini arttırmak için hibrit AA-DA mikro şebekenin ada modu çalışması ele alınmıştır. DA barada maksimum güç noktası takibi ile çalışan bir güneş paneli grubu ve hem şarj hem deşarj modunda çalışabilen bir batarya enerji depolama sistemi mevcuttur. AA barada şebeke besleyen modda çalışan bir eviriciye bağlı rüzgâr türbini ve şebeke koşullarını sağlamak için DA baradan aldığı enerjii AA baraya aktaran, şebeke oluşturan modda çalışan bir evirici yer almaktadır. Güneş paneli maksimum güç noktası takibi için değiştir-gözle yöntemi tabanlı INFO algoritması ile optimize edilmiş N-PI kontrol önerilmiştir. Buradaki amaç dinamik tepkinin artırılması ve dinamik hava koşullarında verimin iyileştirilmesidir. Şebeke oluşturan evirici güç paylaşım referanslarının oluşturulması için faz açısına bağlı düşüş kontrolü önerilmiştir. Referanslara hızlı yaklaşan ve daha az aşım sergileyen N-PI algoritması INFO algoritması ile geniş ölçekte optimize edilerek düşüş kontrole uygulanmıştır. Buradaki amaç dinamik tepkinin geliştirilmesinin yanı sıra aşım değerlerini düşürmek ve sistemin daha geniş çalışma koşullarında güç kalitesi sınırları içerisinde kalmasını sağlamaktır. Rüzgâr türbini maksimum güç noktası, PI kontrol ile takip edilmiştir. Ayrıca rüzgâr türbini reaktif güç kontrolü de PI kontrol ile sağlanmıştır. Bunlarla beraber DA barada batarya sisteminin şarj moduna veya deşarj moduna geçmesi, güneş panelinin maksimum güç noktası takibi modunda yada acil durum senaryosu olarak regülasyon modu çalışmasına geçmesi gibi durumları otomatik takip eden DA bara yönetim algoritmaları tasarlanmıştır. AA barada ise sistemin otomatik çalışıp, senkronizasyon koşullarının sağlanıp, senkronizasyona girmesi daha sonra güç paylaşımını otonom yapabilmesi için yönetim ve kontrol algoritmaları tasarlanmıştır.

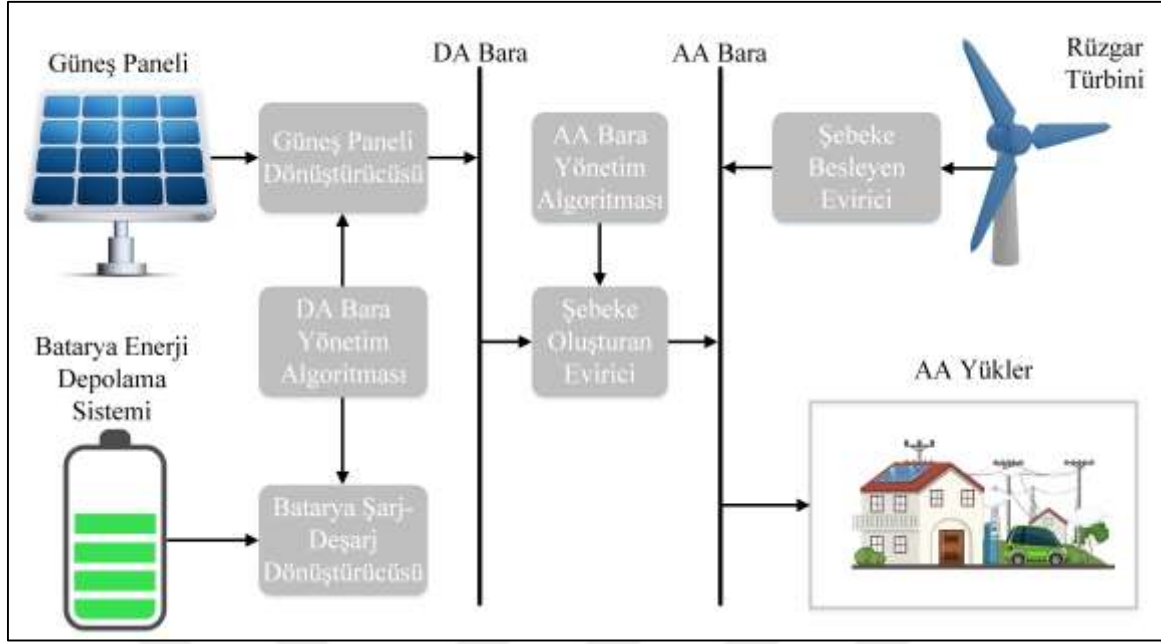
2. TASARLANAN SİSTEM

Problem üzerinde çalışmak için hem DA bara hem de AA bara içeren hibrit mikro şebeke modeli tasarlanmıştır. Buradaki amaç hem mikro şebeke çalışmalarını tüm sistem üzerinde bütün olarak yürütebilmek hem de gelecek çalışmalar için altyapı sağlamaktır. Sistem büyüklüğü ve karmaşıklığı simülasyon modellerinin çalışmasını zorlaştırmaktadır. Bu da daha güçlü bilgisayar gereksinimini arttırmaktadır. Bilgisayar ve analiz teknolojilerindeki gelişmeler bu tür büyük sistem çalışmalarını ancak mümkün kılmaktadır. Bu nedenle mikro şebeke çalışmalarının bütün konularını incelemek de mümkün olamamaktadır.

Mikro şebeke sistemi ada modunda yani şebekeden bağımsız olarak kurulmuştur. Şebekeden bağımsız modda çalışmanın en büyük problemi gerilim ve frekansın fazla dinamik olmasıdır. Eğer makine temelli bir yapı yoksa eviricilerin sabit frekans üretmesinden dolayı frekans yerine faz açısının dinamik olması söz konusudur. Bu nedenle bu tez çalışmasında teorik sistem için DA barada maksimum güç noktası takibi ve gerilim regülasyonu konularında çalışmalar yapılırken, AA barada güç paylaşımı ve AA bara gerilim regülasyonu üzerinde çalışmalar yürütülmüştür.

2.1. Hibrit AA-DA Mikro Şebeke Tasarımı

Tasarlanan hibrit yapıda DA barayı oluşturmak için bir güneş paneli grubu ve bir batarya grubu modellenmiştir. AA barayı oluşturmak için DA baradan aldığı enerjiyi AA gerilime dönüştüren bir evirici ve bu eviriciye paralel bağlanabilen, rüzgâr türbini kaynağına bağlı başka bir evirici modellenmiştir. DA bara tarafında maksimum güç noktası takibi ve gerilim regülasyonu için kontrolcüler ve dönüştürücüler tasarlanmıştır. AA bara tarafında da senkronizasyon öncesi ve sonrası çalışabilen bir kontrolcü tasarlanmıştır. Bu kontrolcü senkronizasyon modunda bara gerilimi ve faz açısı kontrollerini de sağlamaktadır. Ayrıca sisteme, sağlamlığını test etmek adına çeşitli yükler bağlanmıştır. Tasarlanan sistemin blok şeması Şekil 2.1’de yer almaktadır.



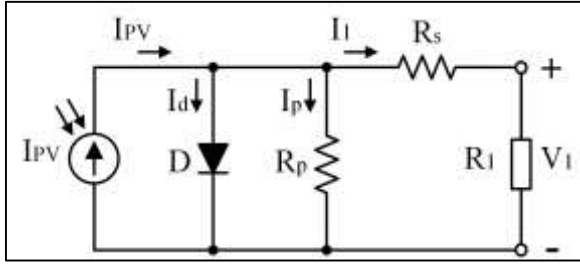
Şekil 2.1. Tasarlanan sistemin blok şeması

2.1.1. DA bara

DA bara genel olarak, güneş paneli grubu, batarya grubu, maksimum güç noktası takibi dönüştürücüsü, şarj ve deşarj dönüştürücüsü ve DA bara yönetim sisteminden oluşmaktadır. Temel hedef 350 V olarak belirlenen DA bara gerilimini sabit tutmaktır. Çünkü AA bara için sabit bir gerilim kaynağına ihtiyaç vardır. Aynı zamanda güneş paneli grubundan maksimum faydayı elde edebilmek için maksimum güç noktası takibi gerçekleştirilmektedir. Enerji fazlası batarya grubuna aktarılmaktadır. Batarya kapasitesinin dolu olması halinde, DA bara enerji yönetim sistemi, güneş paneli grubunu maksimum güç noktası takibi modundan çıkararak, DA bara gerilim regülasyonu moduna almaktadır.

Güneş paneli eşdeğer devre modeli ve yükselten dönüştürücü modeli

Güneş paneli grubu için Şekil 2.2’de görülen tek diyot eşdeğer devre modeli kullanılmıştır. Kullanılan model parametreleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Güneş panelinin tek diyot eşdeğer devresi

Çizelge 2.1. Güneş paneli için kullanılan model parametreleri

Parametre	Değer
Güneş Paneli Gücü	243 W
Güneş Paneli Grup Gücü	2916 W
Seri Kol Sayısı	6
Paralel Kol Sayısı	2
Panel Seri Hücre Sayısı	60
Panel Maksimum Güç Gerilimi	30 V
Güneş Paneli Grubu Maksimum Güç Gerilimi	180 V
Panel Açık Devre Gerilimi	37,4 V
Panel Maksimum Güç Akımı	8,1 A
Panel Kısa Devre Akımı	8,6 A
Panel Gerilim Sıcaklık Katsayısı	-0,32 %/°C
Panel Akım sıcaklık Katsayısı	0,032 %/°C
Işınım ile Üretilen Akım (I_{pv_max})	17,2182 A
Diyot Doyum Akımı ($I_0 _{T_{ref}}$)	$1,2798 \times 10^{-10}$ A
Diyot İdealite Faktörü (a)	0,9471
Paralel Eşdeğer Direnç (R_p)	1352,6 Ω
Seri Eşdeğer Direnç (R_s)	1,1326 Ω

Eş. 2.1’de güneş paneli eşdeğer devre denklemi yer almaktadır. Bu denklem ışınlam ile üretilen akımı temsil etmektedir [70].

$$I_{pv} = I_1 + I_0 \left(e^{\frac{V_1 + R_s I_1}{V_t}} - 1 \right) + \frac{V_1 + R_s I_1}{R_p} \quad (2.1)$$

Burada I_{pv} ışınlam ile üretilen akım, I_1 çıkış akımı, I_0 diyot doyum akımı, V_1 çıkış gerilimi, V_t diyot termal gerilimi, R_s seri eşdeğer direnç ve R_p paralel eşdeğer dirençtir. V_t termal gerilimi Eş. 2.2’de verilmiştir.

$$V_t = k a N_s T_c / q \quad (2.2)$$

Burada k Boltzmann sabitini, a diyot ideallik faktörünü, N_s seri hücre sayısını, T_c Kelvin cinsinden sıcaklığı ve q ise elektron yükünü ifade etmektedir. I_{pv} , sıcaklıktan ve kısa devre akımından etkilenir. Güneş panelinin etiket değeri iki sıcaklık katsayısı içerir. Birincisi negatif katsayılı açık devre gerilimi termal etkisidir. Sonuç olarak sıcaklık arttıkça açık devre gerilimi değeri azalır. İkinci katsayı ise pozitif olan kısa devre akımı katsayısıdır. Bu durum, panel sıcaklığı arttıkça kısa devre akımının da arttığı anlamına gelir. Bununla birlikte, kısa devre akımı katsayısı her zaman açık devre gerilimi katsayısından büyüklük olarak daha küçüktür, bu da sıcaklık arttıkça güneş paneli gücünde genel bir düşüşe neden olur. Güneş paneli tarafından üretilen sıcaklığa bağlı akımın denklemi (I_{pv}) Eş. 2.3’te verilmiştir [71].

$$I_{pv} = \left(I_{pv_max} \left(1 + \alpha (T_c - T_{ref}) \right) \right) \frac{I_{rr}}{1000} \quad (2.3)$$

I_{pv_max} güneş panelinin üreteceği maksimum akımı, α kısa devre sıcaklık katsayısını, T_{ref} Kelvin cinsinden referans sıcaklığı ve I_{rr} metre kareye düşen ışınlam gücünü ifade etmektedir. Diyot doyum akım yaklaşımı olarak da Eş. 2.4’teki denklem kullanılmıştır [72-73].

$$I_0 = I_0|_{T_{ref}} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 e^{\left(\frac{q E g_{ref}}{k a T_{ref}} - \frac{q E g}{k a T_c} \right)} \quad (2.4)$$

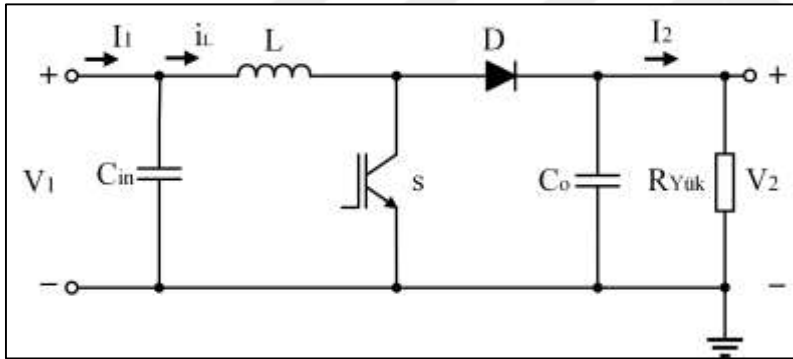
T_{ref} referans sıcaklığı 298 Kelvin’dir. $I_0|_{T_{ref}}$ referans sıcaklıktaki diyot doyum akımını, Eg eV cinsinden anlık enerji bant genişliğini ve Eg_{ref} referans sıcaklıktaki enerji bant genişliğini ifade eder. 0 Kelvin sıcaklığında kullandığımız güneş panelinin enerji bant

genişliği 1,166 eV'tur. Enerji bant genişliği ve sıcaklık arasındaki ilişkiyi veren denklem Eş. 2.5'te verilmiştir [74-75].

$$E_g = E_g(0) - (\alpha T_c^2 / (T_c + \beta)) \quad (2.5)$$

Burada silikon atomu için α ve β parametreleri sırasıyla $4,73 \times 10^{-4}$ ve 636 değerlerindedir. $E_g(0)$ ise 0 Kelvin sıcaklığındaki enerji bant genişliğini ifade eder. Böylece diyot doyum akımı (I_0) ve ışınım ile üretilen akım (I_{pv}) hesaplanabilir. Bu sayede Eş. 2.1-2.5 arası denklemler birleştirilerek güneş paneli modeli oluşturulabilir.

Güneş panelinden maksimum faydayı sağlamak için maksimum güç noktası takibi yapılmalıdır. Bunun için en çok kullanılan dönüştürücü ise DA-DA yükselten dönüştürücüdür. Kullanılan yükselten dönüştürücü modeli şekil 2.3'te yer almaktadır.



şekil 2.3. Yükselten dönüştürücü modeli

Yükselten dönüştürücünün denklemleri Eş. 2.6-2.9'da sunulmuştur. Burada sırasıyla, bobin gerilimi, çıkış gerilimi, giriş gerilimi ifadeleri ve kararlı hal denklemi verilmiştir. [76].

$$L \frac{di_L}{dt} = V_1 - V_2(1 - D) \quad (2.6)$$

$$C_o \frac{dV_2}{dt} = i_L(1 - D) - \frac{V_2}{R_{Yük}} \quad (2.7)$$

$$C_{in} \frac{dV_1}{dt} = I_1 - i_L \quad (2.8)$$

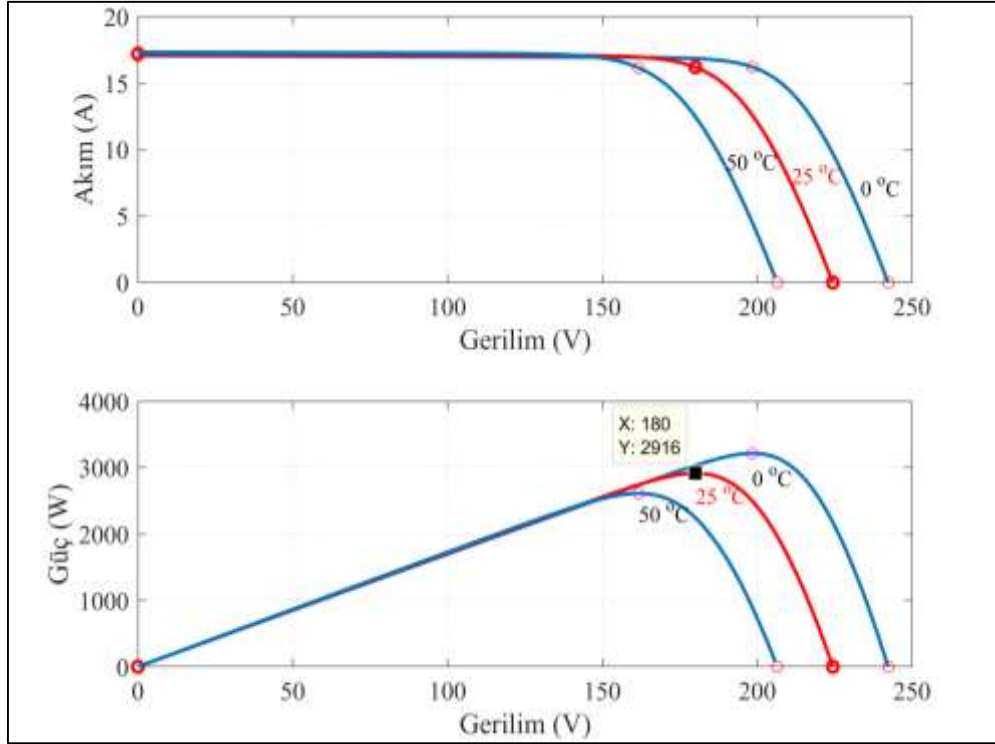
$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.9)$$

Burada L bobin indüktansını, i_L bobin akımını, V_1 güneş paneli çıkış gerilimini ve aynı zamanda yükselten dönüştürücü giriş gerilimini, V_2 yükselten dönüştürücü çıkış gerilimini, D görev oranını, C_o çıkış kapasitörünü, $R_{Yük}$ çıkış yükünü, C_{in} giriş kapasitörünü ve I_1 giriş akımını ifade etmektedir. Yükselten dönüştürücünün çıkış gücünü, dolayısıyla çıkış yükünü ayarladığı düşünülürse, dönüştürücü karalı durum denklemi yardımıyla güneş paneli çıkışından görülen yük hesaplanabilir. Böylece Eş. 2.10 ve Eş. 2.11’de güneş paneli çıkış yükü ve yükselten dönüştürücü kontrol parametresi (D) arasındaki ilişki verilmiştir.

$$\frac{R_{Yük}}{R_1} = \frac{V_2/I_2}{V_1/I_1} = \frac{V_2}{V_1} \times \frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{1}{1-D} \right)^2 \quad (2.10)$$

$$R_1 = R_{Yük}(1-D)^2 \quad (2.11)$$

Bobin indüktansı belirlenirken akım salınımının belirlenmesi gereklidir. Bu akım değeri çalışma aralığında, bobin şarjının tükenmeden sürekli akım modunda çalışması durumuna göre belirlenir. Yüzde olarak belirlenen akım salınımının değeri bobin boyutuyla ters orantılıdır. Bu nedenle salınım değeri ile bobin büyüklüğü arasındaki ilişki optimum olmalıdır. Bu çalışmada akım %0 ile %100 arasında değiştiği için dönüştürücü, akımın küçük olduğu durumlarda, kesikli akım moduna geçmektedir. Bu nedenle bobin indüktansını (L) seçerken bobin akımının (i_L) salınım değerinin %20-%40 arasında olması tercih edilmiştir. Şekil 2.4’e göre güneş paneli gücünün 2916 W olması ve maksimum güç noktasındaki gerilimin 180 V olması nedeniyle maksimum i_L akımı 16,2 A’dır (Bkz. Çizelge 2.1). Yükselten dönüştürücü çıkış gerilimi aynı zamanda DA bara gerilimidir (V_2). DA baraya bir evirici bağlanacağı için DA bara gerilimi, evirici çalışmasına uygun olarak 350 V seçilmiştir. Salınım oranı %30 seçilirse Eş. 2.12-2.13 arasında salınım akımı Δi_L ve bobin indüktansı minimum değeri hesaplanabilir [77-78].



Şekil 2.4. Güneş panelinin akım-gerilim ve güç-gerilim grafiği

$$\Delta i_L = \%30 \times i_L = 0,3 \times 16,2 = 4,86 \text{ A} \quad (2.12)$$

$$L = \frac{V_1 \times (V_2 - V_1)}{\Delta i_L \times f_{sw} \times V_2} = \frac{180 \times (350 - 180)}{4,86 \times 10000 \times 350} \cong 1,8 \text{ mH} \quad (2.13)$$

Burada f_{sw} anahtarlama frekansıdır ve 10 KHz seçilmiştir. Yükselten dönüştürücünün çıkış gerilimi salınımlarını azaltmak için bir çıkış kapasitörü bağlanmıştır. Bunun için Eş. 2.14'te dönüştürücü çıkış akımı ve Eş. 2.15'te %1 olarak belirlenmiş salınım gerilimi hesaplanmıştır. Bu kapasitörün minimum değeri ise Eş. 2.16'da verilmiştir [77-78].

$$I_2 = \frac{P_{PV}}{V_2} = \frac{2916}{350} = 8,33 \text{ A} \quad (2.14)$$

$$\Delta V_2 = \%1 \times V_2 = 0,01 \times 350 = 3,5 \text{ V} \quad (2.15)$$

$$C_o = \frac{I_2 \times (V_2 - V_1)}{\Delta V_o \times f_{sw} \times V_2} = \frac{8,33 \times (350 - 180)}{3,5 \times 10000 \times 350} = 115,6 \text{ uF} \quad (2.16)$$

Burada P_{PV} güneş paneli gücünü ve ΔV_2 çıkış gerilimi salınım değerini ifade etmektedir. Ohm kanunundan ve Eş. 2.10'dan, yükselten dönüştürücü giriş akımı Eş. 2.17'deki gibi yazılabilir.

$$I_1 = \frac{V_1}{R_{Yük}(1-D)^2} \quad (2.17)$$

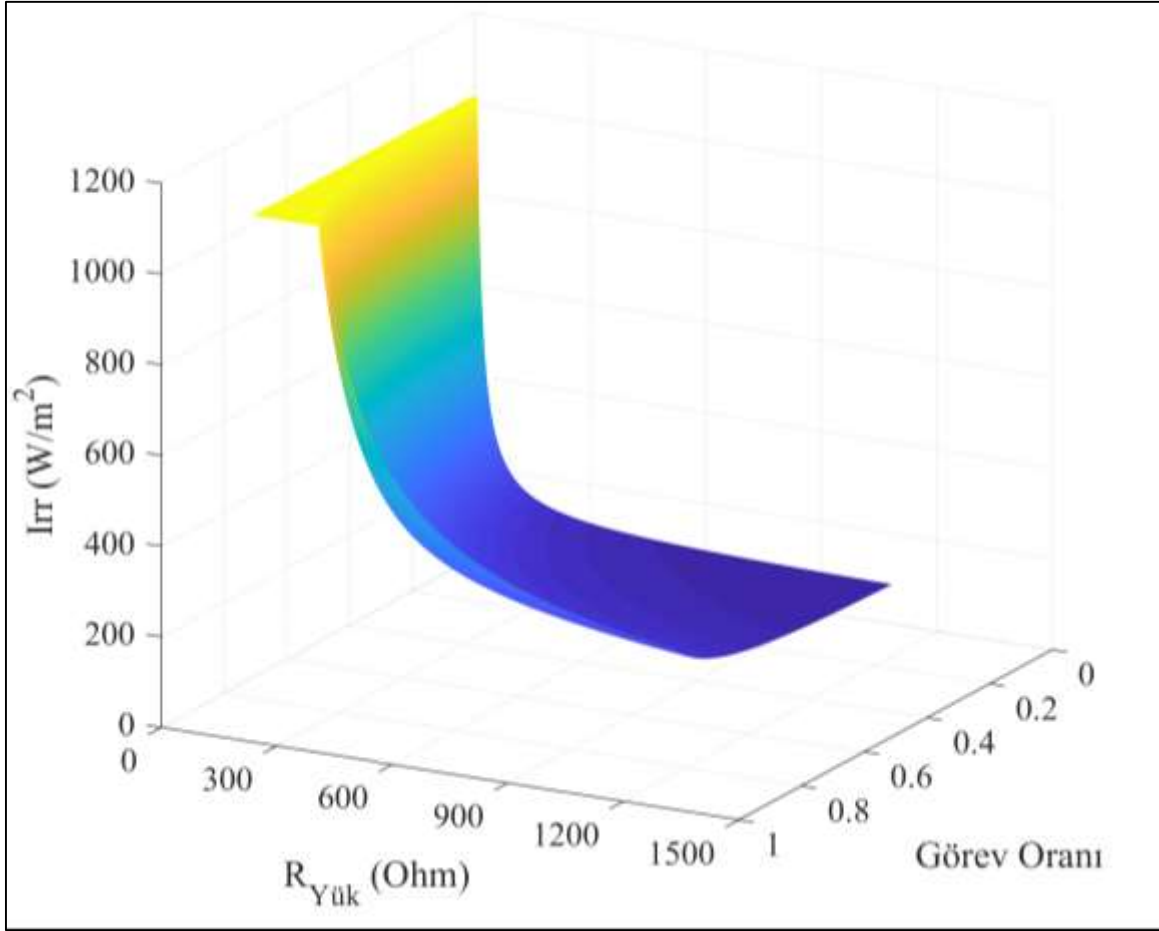
Bu akım aynı zamanda güneş panelinin çıkış akımıdır. Bu nedenle bu ifade Eş. 2.1'de I_1 yerine yazılırsa Eş. 2.18 elde edilir.

$$I_{pv} = \frac{V_1}{R_{Yük}(1-D)^2} + I_0 e^{\frac{V_1 + R_s \frac{V_1}{R_{Yük}(1-D)^2}}{V_t}} - I_0 + \frac{V_1 + R_s \frac{V_1}{R_{Yük}(1-D)^2}}{R_p} \quad (2.18)$$

Eş. 2.3 ve Eş. 2.18 birleştirilirse Eş. 2.19'da güneş paneli ve yükselten dönüştürücüden oluşan yapının ifadesi elde edilebilir.

$$I_{rr} = \left(\frac{1000}{I_{pv_max} (1 + \alpha (T_c - T_{ref}))} \right) \left(\frac{V_1}{R_{Yük}(1-D)^2} + I_0 e^{\frac{V_1 + R_s \frac{V_1}{R_{Yük}(1-D)^2}}{V_t}} - I_0 + \frac{V_1 + R_s \frac{V_1}{R_{Yük}(1-D)^2}}{R_p} \right) \quad (2.19)$$

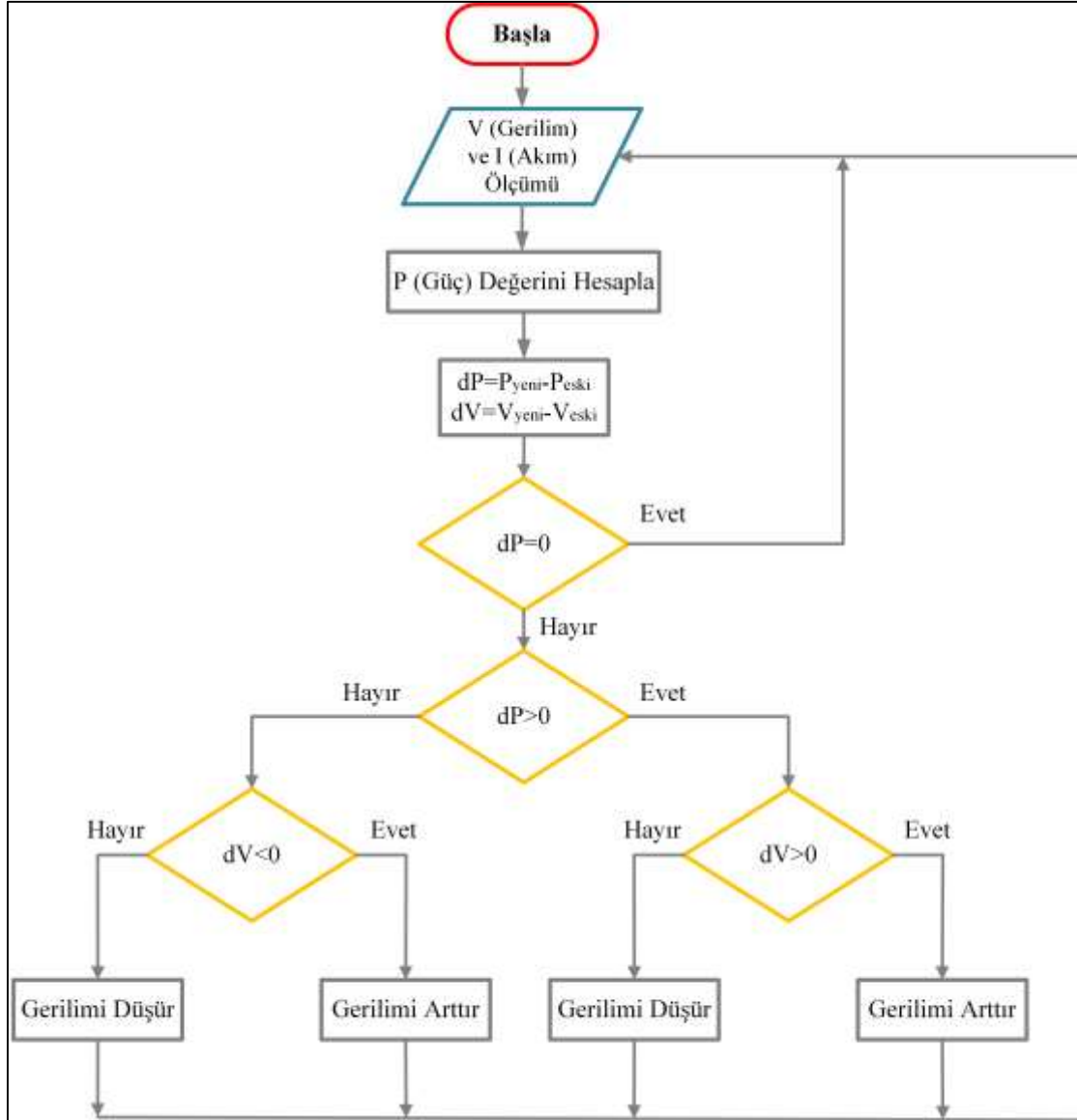
Bu denklemden, diğer tüm değişkenler girildiğinde I_{rr} , $R_{Yük}$ ve D arasında ilişki kurabilir. Eş. 2.19 için D , 0,01'den 0,8'e kadar ve $R_{Yük}$ ise 0 Ω 'dan 1100 Ω 'a kadar çözülürse Şekil 2.5'te verilen alan ortaya çıkar. Burada hücre sıcaklığı (T_c) 323 Kelvin ve güneş paneli çıkış gerilimi (V_1) ise güneş panelinin maksimum güç noktasındaki gerilim değeri (180 V) seçilmiştir (Bkz. Çizelge 2.1). Bu alan güneş paneli sisteminin maksimum güç noktasındaki çalışma alanıdır.



Şekil 2.5. Güneş paneli sisteminin maksimum güç noktası çalışma alanı

Maksimum güç noktası takibi

Literatürde maksimum güç noktası takibi ile ilgili çalışmalar halen önemini korumaktadır. Bu konuyla ilgili değiştir-gözle, açık devre gerilimi, kısa devre akımı, artırılmış iletkenlik gibi klasik sayılabilecek yöntemler çalışılırken, zeki veya meta sezgisel algoritma tabanlı çalışmalar da gittikçe artmaktadır. Bu tez çalışmasında maksimum güç noktası takibi için temel olarak değiştir-gözle yöntemi tercih edilmiştir. Bunun sebebi değiştir-gözle yönteminin sistem modeli gerektirmemesi ve dolayısıyla zamanla oluşabilecek sistem değişimlerine duyarlılığın az olmasıdır. Kullanılan değiştir-gözle yönteminin akış diyagramı Şekil 2.6'da ve algoritmayı tanımlayan denklemi de Eş. 2.20'de verilmiştir [79].



Şekil 2.6. Değiştir-gözle algoritması akış diyagramı

$$V_{mpp}(t) = V_{mpp}(t - 1) + M \times \text{sgn}(dP) \times \text{sgn}(dV) \quad (2.20)$$

Burada $V_{mpp}(t)$ maksimum güç noktasındaki gerilimi, $V_{mpp}(t - 1)$ maksimum güç noktasındaki gerilimin önceki değerini, M artış oranını, $\text{sgn}(dP)$ güç değişim işaretini ve $\text{sgn}(dV)$ ise gerilim değişim işaretini ifade etmektedir. Bununla beraber, literatürde de çalışılan değiştir-gözle yönteminin tepki süresi problemi, sistem tepkisini azaltmaktadır. Çünkü klasik değiştir-gözle yöntemi referans noktaya ulaşabilmek için sabit bir adım kullanmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için uyarlamalı değiştir-gözle, değişken

adımlı değiştir-gözle ve oransal-integral (PI) ya da oransal-integral-türev (PID) yardımıyla değiştir-gözle gibi çalışmalar yapılmıştır [47].

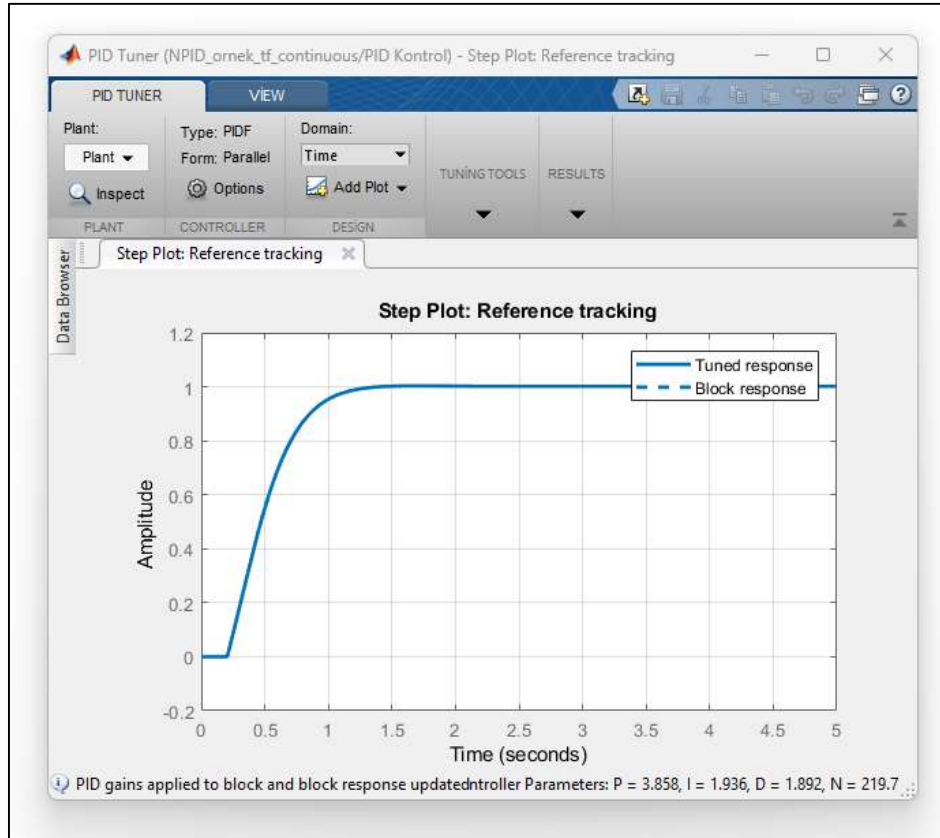
Değiştir-gözle yönteminde çıkış olarak referans akım, gerilim veya görev oranı parametreleri kullanılabilir. Görev oranının kullanılması durumunda, sabit parametre olarak küçük bir değerin kullanılması arama süresini uzatmaktadır. Büyük değer kullanımı ise maksimum güç noktası etrafında salınımlara neden olmaktadır. Referans akım veya gerilimin kullanılması ise referansın takip edilebilmesi için, yardımcı bir kontrolcü gerektirir. PID yardımıyla değiştir-gözle yöntemi model bilgisi gerektirmeyen ve dinamik açıdan da başarılı olan bir çalışma şeklidir. Bu çalışma şeklinde maksimum güç noktasındaki referans değeri aranırken sabit bir adım kullanılsa da referansa yaklaşma şekli sabit değildir. Bu da kontrole, görev oranı yöntemine kıyasla yaklaşım dinamikliği kazandırır. Bununla beraber sistemin dinamik tepkisinin maksimize edilmesi özellikle güneş ışıınının değişken olduğu durumlarda verimi de iyileştirecektir. Bu bağlamda literatürde çalışılan ve PID yönteminin doğrusal olmayan şekilde manipüle edilmesine dayanan, doğrusal olmayan PID (N-PID) yöntemi, literatür araştırmasına göre PID kontrolünden daha dinamik tepkiye sahiptir. Bu sayede PID tabanlı değiştir-gözle yönteminin N-PID kontrolcüsü tabanlı olarak değiştirilmesi sistemin dinamik davranışını arttıracaktır.

N-PID metodunda $e(t)$ hata fonksiyonu hataya bağlı ancak doğrusal olmayan bir fonksiyon ile değiştirilir. Literatürde genellikle hiperbolik ve üstel fonksiyonlar kullanılmaktadır. Basit bir transfer fonksiyon üzerine N-PID kontrolcüsü ile PID kontrolcüsünü kıyaslamak için Eş. 2.21’de bir transfer fonksiyonu ve Eş. 2.22’de ise kullanılan N-PID kontrolcüsü verilmiştir.

$$TF(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} e^{-0,2s} \quad (2.21)$$

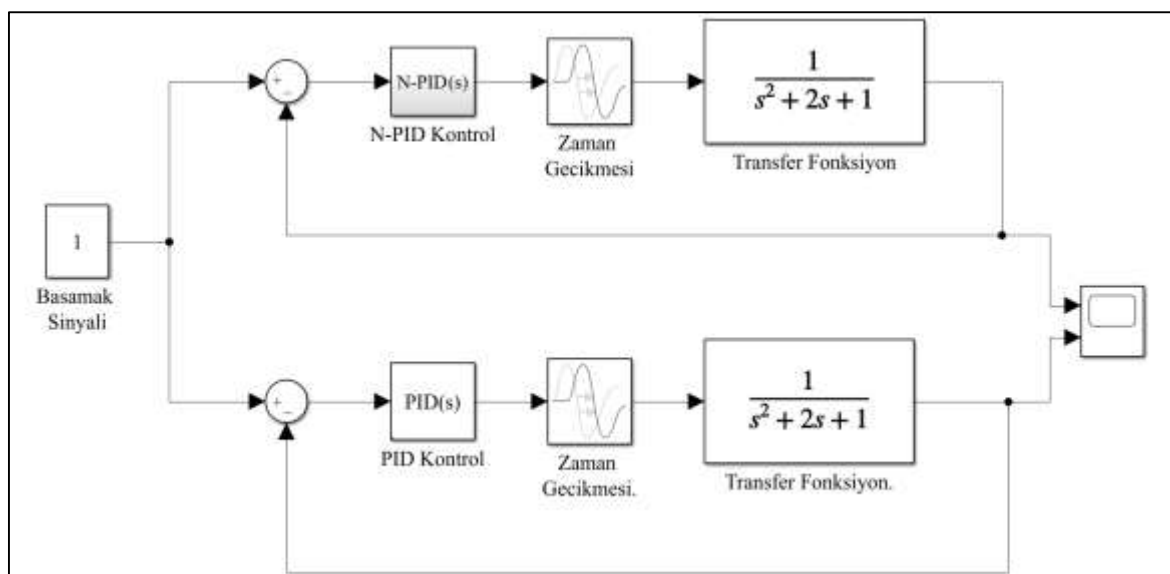
$$U(t) = \text{sgn}(e(t))(e(t)^2 K_p + K_i \int e(t)^2 dt + K_i \frac{de(t)^2}{dt}) \quad (2.22)$$

PID kontrol parametreleri MATLAB PID tuner aracı ile ayarlanmıştır. PID ayarlama çalışması grafiği Şekil 2.7’de verilmiştir.

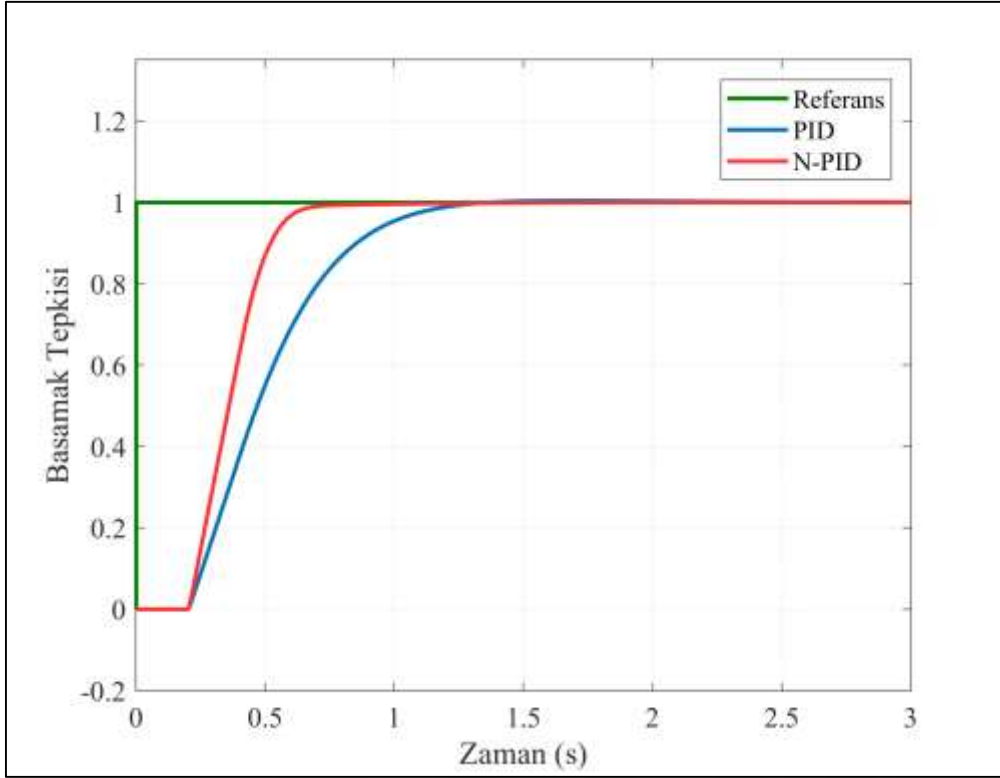


Şekil 2.7. MATLAB PID tuner aracı ile PID parametrelerinin ayarlanması

Şekil 2.8’de yapılan simülasyon çalışması ve Şekil 2.9’da da simülasyon sonucu oluşan basamak tepkilerinin karşılaştırılması yer almaktadır.



Şekil 2.8. Belirlenen transfer fonksiyonu için PID ve N-PID kontrol simülasyonu

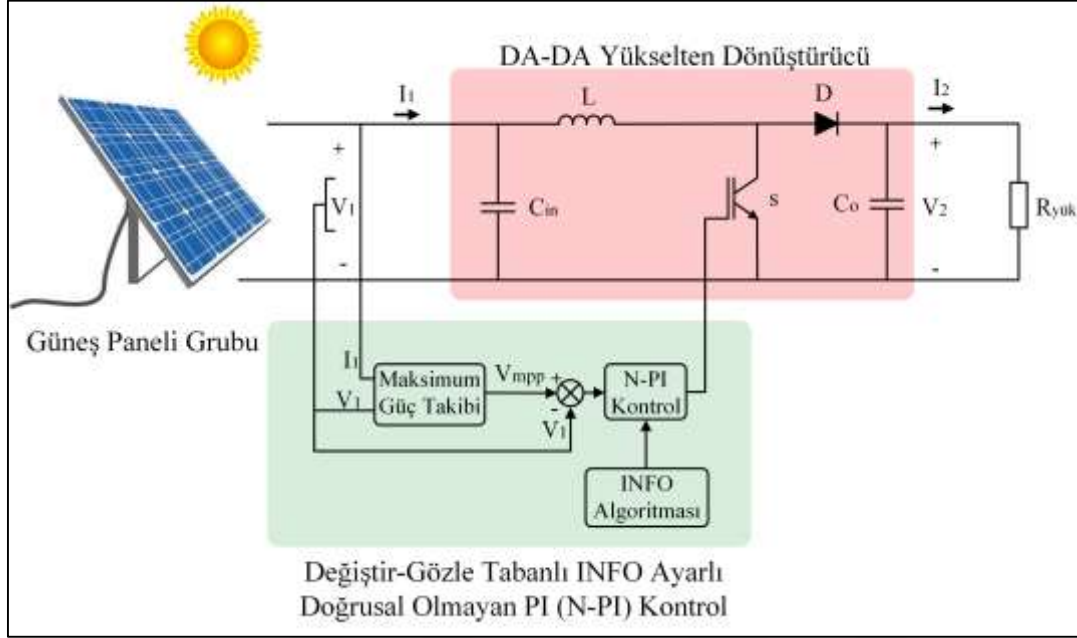


Şekil 2.9. Simülasyon sonucu elde edilen basamak tepkilerinin karşılaştırması

Simülasyon çalışması sonucunda N-PID'nin çok daha hızlı yerleşme süresine sahip olduğu görülmektedir. Doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler için literatürde benzer çalışmalar yapılmaktadır [80]. Bu çalışma ve literatürdeki diğer çalışmalara göre N-PID, PID kontrole tercih edilebileceği konusunda umut vaat etmektedir. Böylece maksimum güç noktasını izleme yönteminin yerleşme hızının PID kontrole göre iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Diğer bir iyileştirme ise doğrusal olmayan kontrolcünün parametre optimizasyonunu gerçekleştirmek ve kontrolün performansını en üst seviyeye çıkarmaktır. Bunun için INFO algoritması kullanılmıştır. INFO yeni bir algoritma olup ve literatürdeki çalışmalarda birçok başarılı meta sezgisel algoritma ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar neticesinde INFO algoritması üstün performans sergilemesinden dolayı bu çalışma için seçilmiştir. Ayrıca INFO algoritmasının yanı sıra optimizasyon süreci, literatürde yeni yayınlanmış olan tilkilerden ilham alan optimizasyon algoritması (FOX), fındıkkıran kuşundan ilham alan optimizasyon algoritması (NOA), Çernobil felaketinden ilham alan optimizasyon algoritması (CDO) ve eski savaş stratejilerinden ilham alan optimizasyon algoritması (WSO) ile gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucunda, bu algoritmalar

arasında en başarılı olanı INFO algoritması olmuştur. Önerilmiş çalışma şeklinin blok şeması Şekil 2.10'da yer almaktadır.



Şekil 2.10. Güneş panelinin maksimum güç noktası takibi için sistemin blok şeması

Bu çalışma için N-PID kontrol yerine doğrusal olmayan PI (N-PI) kontrol tercih edilmiştir. Böylece kontrolde bir parametre daha az olacağından parametre çıkarım hızı artış göstermiştir. Optimizasyon sürecinde hem PI hem de N-PI kontrolcülerini ile kullanılan beş algoritma Bölüm 3'te değerlendirilmiştir. Kullanılan PI ve N-PI fonksiyonları ise Eş. 2.23-2.25'te yer almaktadır.

$$e(t) = V_{mpp} - V_1 \quad (2.23)$$

$$D(t)_{PI} = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (2.24)$$

$$D(t)_{N-PI} = \text{sgn}(e(t)) \left(K_p e(t)^2 + K_i \int e(t)^2 dt \right) \quad (2.25)$$

Burada $e(t)$ hatayı, $\text{sgn}(e(t))$ hatanın işaretini, K_p oransal sabiti ve K_i integral sabitini ifade etmektedir.

Batarya enerji depolama sistemi ve DA bara dönüştürücüsü

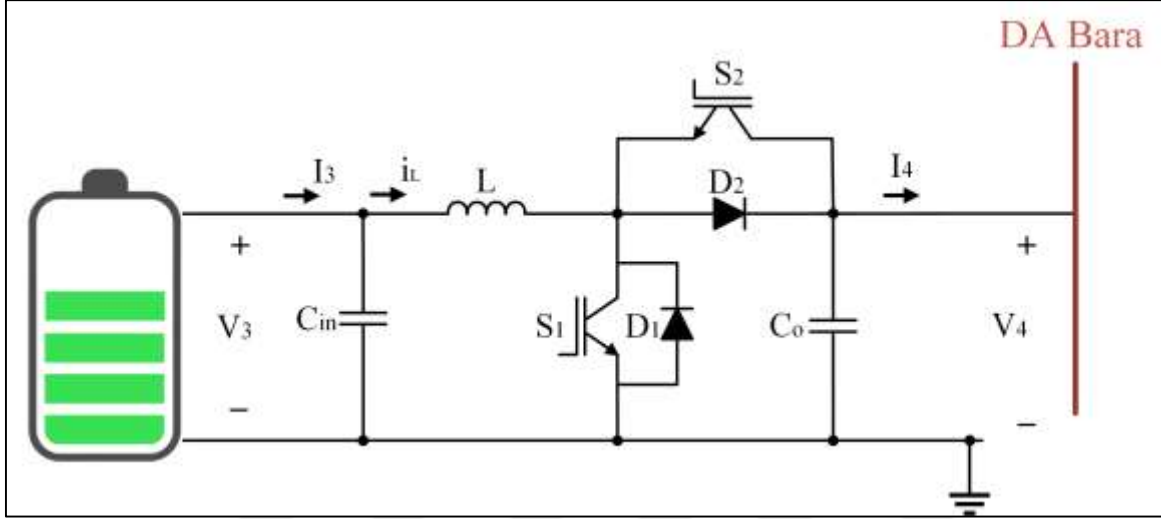
Batarya enerji depolama sistemi, güneş panelinin maksimum güçte çalışması ve DA baranın gerilim regülasyonu için sıklıkla kullanılmaktadır. Çünkü üzerine çalıştığımız sistem şebekeden bağımsız ada modunda çalışmaktadır. Sistemdeki enerji kaynaklarının ürettiği enerji, talep edilen enerjiden daha fazla olduğunda, fazla enerjinin aktarılması için bir birime ihtiyaç vardır. Aksi takdirde ya bara gerilim seviyeleri artar ya da bunu engellemek için kaynakların, gerilim regülasyonu moduna geçirilerek, maksimum güç noktasında çalışmasının durdurulması gerekir. Bu şekilde çalışma verimsiz bir çalışma şeklidir ve enerji boşa harcanır. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarının öngörülemez doğası nedeniyle enerji sürekliliği her zaman sağlanamayabilir. Bu da enerji kalitesini olumsuz etkiler. Yeterli bir depolama sisteminin varlığı, verim ve güç kalitesini arttırmaya ve sistemin, talep dinamikliğine karşı hassasiyetini azaltmaya yardımcı olur. “Hangi enerji kaynağı ne güçte gereklidir?” veya “Enerji depolama sisteminin optimum boyutu ne olmalıdır?” gibi sorular literatürde başlı başına bir çalışma alanıdır. Ayrıca batarya depolama sistemleri için şarj teknolojileri ve batarya yönetim sistemleri de yine literatürde geniş yer bulmuş bir çalışma alanıdır.

Bu çalışmada batarya enerji depolama sistemi, hem AA bara için hem de DA bara için gerilim regülasyonuna katkı sağlamak ve maksimum güç noktasında çalışabilmeyi garanti etmek amacıyla kullanılmıştır. Batarya enerji depolama sistemi alanındaki yenilikler bu tezin amacı dışında tutulmuştur ve batarya enerji depolama sistemi bir araç olarak kullanılmıştır. Çalışmada lityum-iyon batarya enerji depolama sistemi kullanılmış ve parametreleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Batarya enerji depolama sisteminin parametreleri

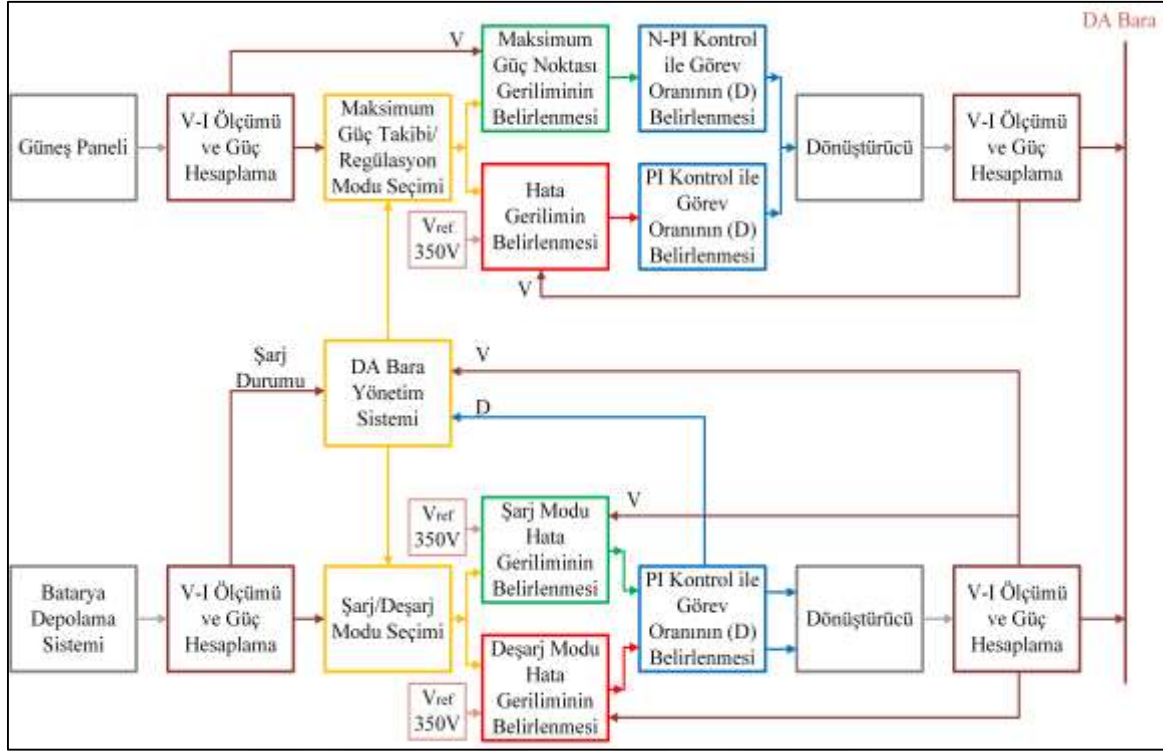
Parametre	Değer
Nominal Gerilim	160 V
Maksimum Batarya Kapasitesi	80 Ah
Tam Şarj Gerilimi	186,2 V
Nominal Deşarj Akımı	34,7 A

Batarya enerji depolama sistemini DA baraya bağlamak ve enerji akışı ile enerji yönünü kontrol etmek için bir dönüştürücüye ihtiyaç vardır. Bu dönüştürücünün devre şeması Şekil 2.11’de verilmiştir. Bu dönüştürücü, uygulanan kontrol şekline göre iki yönlü enerji akışını sağlayabilir. İki yönlü enerji akışına ihtiyaç duyulmasının sebebi, batarya enerji depolama sisteminin farklı durumlarda şarj modunda veya deşarj modunda çalışmasıdır.



Şekil 2.11. Batarya enerji depolama sisteminin dönüştürücüsü

Ayrıca dönüştürücüyü kontrol ederek referans bilgileri, şarj-deşarj durumunu ve güneş panelinin maksimum güç noktası modunda çalışması veya DA bara gerilim regülasyonu modunda çalışması durumunu belirleyecek bir algoritmaya da ihtiyaç vardır. Bu çalışma şeklinin blok şeması Şekil 2.12’de verilmiştir.

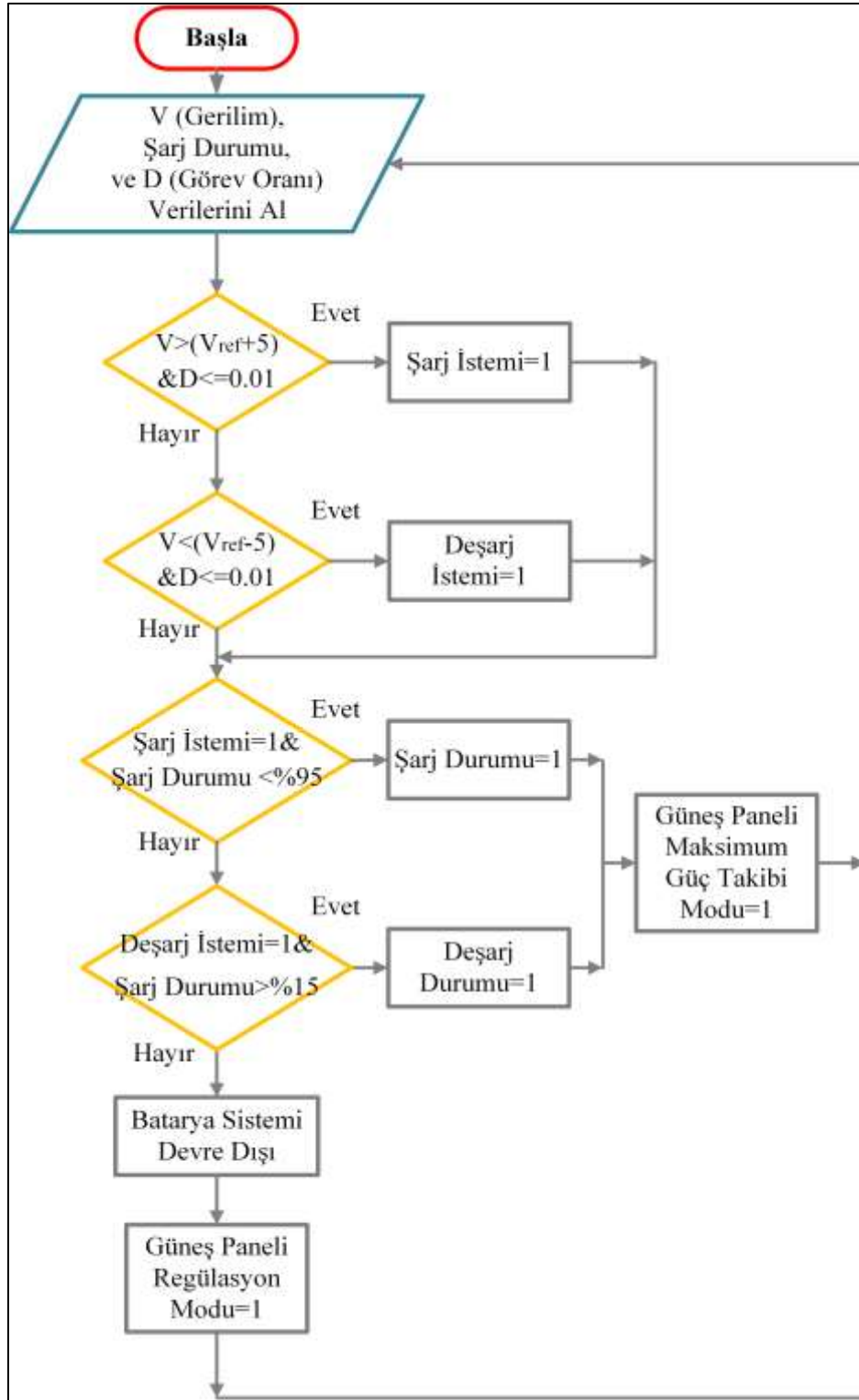


Şekil 2.12. DA bara yönetim sistemi blok şeması

DA baranın kontrolü için, şarj durumu, deşarj durumu, maksimum güç noktası takibi modu ve DA bara gerilim regülasyonu modu durumlarını ayarlayan ayrıca batarya dönüştürücüsünün anahtar ateşlemesini sağlayan bir DA bara yönetim sistemi algoritmasına ihtiyaç vardır. Çalıştırılan bu algoritmanın en temel amacı, 350V olan DA bara gerilim seviyesini korumaktır. Atanan PI kontrolcüsü referans ve ölçüm arasındaki hataya bakarak görev oranını arttırıp azaltmaktadır. Ancak şarj ve deşarj durumları için sürülen anahtarlar farklıdır ve durum değişimlerinde görev oranı doğru anahtarlara yönlendirilmelidir. Şarj durumu ve deşarj durumu bilgisi ilk olarak bunu sağlar. İkinci olarak ise şarj referansı ile deşarj referansı işaretleri farklıdır. Çünkü güç akış yönü değişmektedir. Bu nedenle görev oranı artışı şarj durumunda DA baradan güç çekmek anlamına gelirken, deşarj durumunda aynı artış bataryadan güç çekmeye karşılık gelir. Şarj ve deşarj geçişleri görev oranı değerinden anlaşılabilir. Batarya deşarj durumundaysa ve DA bara gerilimi artıyorsa, görev oranı bara enerjisini düşürmek için düşmeye başlar. Görev oranı minimum değere indiği halde bara gerilimi hala artıyorsa bu, bara enerjisinin hala fazla olduğu anlamına gelir ve batarya fazla enerjiyi depolamak için şarj durumuna geçer. Sistem şarj durumundayken ise eğer bara gerilimi düşüyorsa, yönetim sistemi, gerilimin düşüşünü engellemek için bataryadan çekilen enerjiyi, görev, oranını azaltarak

düşürür. Eğer görev oranı minimuma kadar düştüyse ve hala bara gerilimi düşüyorsa bu durumda bara enerjisi yetersiz demektir. Batarya deşarj durumuna geçerek baraya enerji sağlamaya başlar. Algoritma aynı zamanda DA bara enerjisi gerekenden fazlaysa ve fazla enerji batarya sistemine aktarılamıyorsa, DA bara geriliminin yükselmesini önlemek için güneş panelinin maksimum güç noktası takibi modundan, regülasyon moduna geçmesini de sağlar. Böylece baraya enerji gerektiği miktarda sağlanır. Bu kontrol yönetimini sağlayan algoritma Şekil 2.13'te verilmiştir.





Şekil 2.13. DA bara yönetim algoritması

Batarya dönüştürücüsü, şarj ve deşarj çalışma durumu için düşüren ve yükselten durumlarında çalışacaktır. Bu nedenle dönüştürücü parametreleri düşüren ve yükselten olarak ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Batarya dönüştürücüsü giriş ve çıkış parametreleri

Çizelge 2.3'te verilmiştir. Şarj modu için düşüren dönüştürücünün denklemleri Eş. 2.26-2.29 arasında verilmiştir [81].

Çizelge 2.3. Batarya dönüştürücüsünün giriş-çıkış parametreleri

Parametre	Değer
Dönüştürücü Gücü	3200 W
Giriş Gerilimi (Batarya Gerilimi)	160 V
Giriş Akımı (Batarya Akımı)	20 A
Çıkış Gerilimi (DA Bara Gerilimi)	350V
Çıkış Akımı (DA Bara Akımı)	~9A

$$L \frac{di_L}{dt} = V_3 - V_4 D \quad (2.26)$$

$$C_{in} \frac{dV_3}{dt} = i_L - I_3 \quad (2.27)$$

$$C_o \frac{dV_4}{dt} = I_4 - i_L D \quad (2.28)$$

$$\frac{V_3}{V_4} = \frac{I_4}{I_3} = D \quad (2.29)$$

Burada L bobin indüktansını, i_L bobin akımını, V_4 düşüren dönüştürücü için giriş gerilimini, V_3 çıkış gerilimini, C_{in} çıkış kapasitörünü, C_o giriş kapasitörünü, I_4 giriş akımını ve D görev oranını ifade etmektedir (Bkz. Şekil 2.11). Batarya enerji depolama sisteminin 80 Ah'lık kapasitesi göz önünde bulundurularak şarj akımı 20A olarak seçilmiştir. Dörtte bir şarj değeri Lityum-iyon bataryalar için tercih edilebilir.

Bu dönüştürücü çalışmasında, akım değeri, şarj ve deşarj durumundan dolayı hem pozitif hem de negatif bölgede, nominal değerin %0'ı ile %100'ü arasında değişmektedir. Bu nedenle bobin akımı sifıra yakın noktalarda kesikli moda geçmektedir. Burada optimum bobin boyutu için bobin akımının salınım yüzdesi %20-%40 arasında olması tercih edilebilir ve bu çalışma için %30 olarak belirlenmiştir. Düşüren dönüştürücü bobin seçimi denklemleri ise Eş. 2.30-2.32 arasında verilmiştir [82].

$$\Delta i_L = \%30 \times i_L = 0,3 \times 20 = 6 \text{ A} \quad (2.30)$$

$$D = \frac{V_3}{V_4} = \frac{160}{350} = 0,457 \quad (2.31)$$

$$L = \frac{V_3 \times (1 - D)}{\Delta i_L \times f_{sw}} = \frac{160 \times (1 - 0,457)}{6 \times 10000} \cong 1,44 \text{ mH} \quad (2.32)$$

Burada Δi_L bobin akımı salınımı ve f_{sw} anahtarlama frekansını ifade eder. Çıkış gerilimi salınımı %1 seçilmiştir. Buna göre düşüren dönüştürücü kapasitör seçimi için gerekli denklemler Eş. 2.33-2.34'te verilmiştir [82].

$$\Delta V_3 = \%1 \times V_3 = 0,01 \times 160 = 1,6 \text{ V} \quad (2.33)$$

$$C_{in} = \frac{\Delta i_L}{\Delta V_3 \times 8f_{sw}} = \frac{6}{1,6 \times 8 \times 10000} \cong 47 \mu\text{F} \quad (2.34)$$

Burada ΔV_3 çıkış gerilimi salınımını ifade etmektedir. Deşarj modu için yükselten çalışma durumunda dönüştürücü ifadeleri Eş. 2.35-2.38 arasında verilmiştir [76-78].

$$L \frac{di_L}{dt} = V_3 - V_4(1 - D) \quad (2.35)$$

$$C_o \frac{dV_4}{dt} = i_L(1 - D) - I_4 \quad (2.36)$$

$$C_{in} \frac{dV_3}{dt} = I_3 - i_L \quad (2.37)$$

$$\frac{V_4}{V_3} = \frac{I_3}{I_4} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.38)$$

Burada L bobin indüktansını, i_L bobin akımını, V_4 yükselten dönüştürücü için çıkış gerilimini, V_3 giriş gerilimini, C_{in} giriş kapasitörünü, C_o çıkış kapasitörünü, I_4 çıkış akımını ve D görev oranını ifade etmektedir (Bkz. Şekil 2.11). Yükselten dönüştürücünün bobin değerini seçerken batarya enerji depolama sisteminin 80 Ah'lık kapasitesi ve sağlayacağı akım göz önünde bulundurulmalıdır. Çalışmamızda batarya enerji depolama sisteminden çekilecek güç için 3200 W değeri yeterli olduğundan 20 A'lık çıkış akımına ihtiyaç vardır. Bobin akım salınım değeri yine %30 seçilebilir. Bobin değeri seçimi için gerekli hesaplamalar Eş. 2.39-2.40 arasında verilmiştir [76-78,83].

$$\Delta i_L = \%30 \times i_L = 0,3 \times 20 = 6 \text{ A} \quad (2.39)$$

$$L = \frac{V_3 \times (V_4 - V_3)}{\Delta i_L \times f_{sw} \times V_4} = \frac{160 \times (350 - 160)}{6 \times 10000 \times 350} \cong 1,44 \text{ mH} \quad (2.40)$$

Burada f_{sw} anahtarlama frekansdır ve 10 KHz seçilmiştir. Yükselten dönüştürücünün çıkış gerilimi salınımı %1 olarak belirlenirse, kapasitörün minimum değeri Eş. 2.41-2.43'ten hesaplanabilir [76-78,83].

$$I_4 = \frac{P_B}{V_4} = \frac{3200}{350} = 9,14 \text{ A} \quad (2.41)$$

$$\Delta V_4 = \%1 \times V_4 = 0,01 \times 350 = 3,5 \text{ V} \quad (2.42)$$

$$C_o = \frac{I_4 \times (V_4 - V_3)}{\Delta V_o \times f_{sw} \times V_4} = \frac{9,14 \times (350 - 160)}{3,5 \times 10000 \times 350} \cong 142 \text{ uF} \quad (2.43)$$

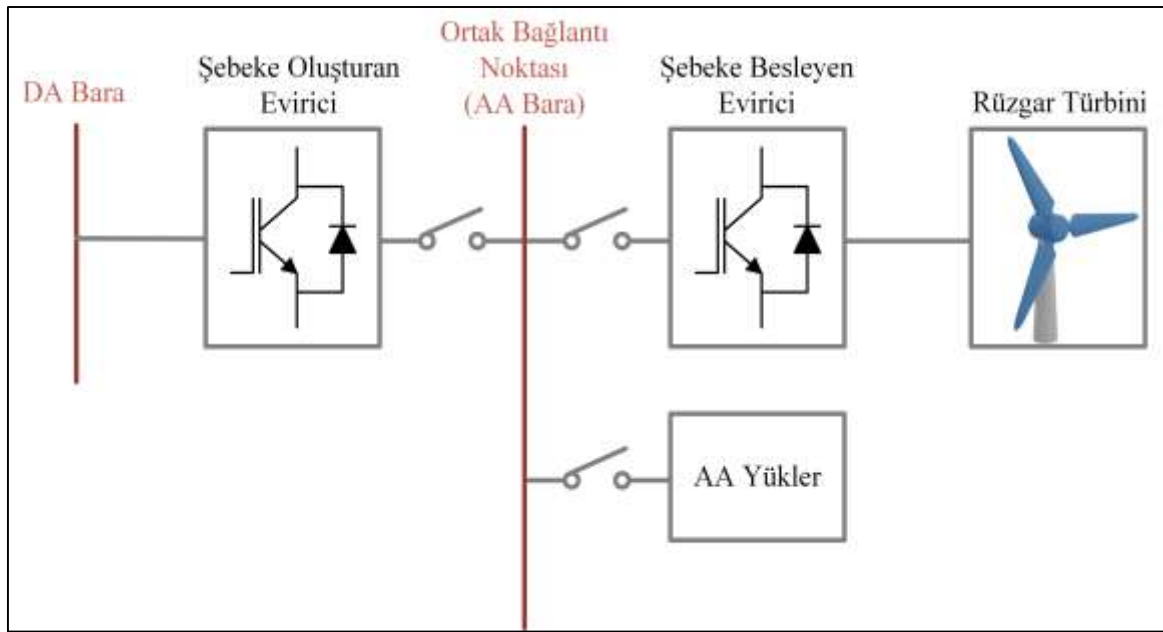
Burada P_B batarya enerji depolama sisteminin sağlayacağı gücü ifade etmektedir.

2.1.2. AA bara

AA barada, sabit mıknatıslı senkron generatörden oluşan rüzgâr türbini, buna bağlı şebeke besleyen modunda çalışan bir evirici, DA bara ile AA bara arasında enerji dönüşümünü sağlayan bir ana evirici, AA yükleri ve senkronizasyon ile AA bara yönetimini sağlayan bir denetleyici yer almaktadır. Sabit mıknatıslı senkron generatör rüzgâr türbinlerinde sıkça kullanılan bir makinedir. Uyarım sargıları olmadığından, reaktif güç yönetimi yapabilmek için güç elektroniği dönüştürücülerine ihtiyaç vardır. Genellikle bu dönüştürücülerin makine tarafı ve şebeke tarafı olarak iki bölümü olur. Makine tarafı çalışmalarda kontrollü doğrultucular kullanıldığı gibi kontrolsüz doğrultucular da kullanılmaktadır. Kontrolsüz doğrultuculu modelde, maksimum güç noktası takibini sağlayabilmek için DA-DA gerilim seviyesinin ayarlanabilir olması gerekir. Bu gereklilik DA-DA dönüştürücüler ya da çeşitli evirici topolojileriyle sağlanmaktadır. Rüzgâr türbini dönüştürücülerinin diğer bir görevi de frekans kararlılığını sağlamaktır. Sabit mıknatıslı senkron generatör çıkış frekansı rotor hızına bağlıdır. Rüzgâr hızı sabit olmadığından frekans da sürekli değişir. Frekans kontrolünü sağlamak ve bununla beraber güç referansını ayarlamak bu dönüştürücülerin görevidir. Bunun yanında tork kontrolü, güç kontrolü veya alan etkili kontrol gibi kontrol

yöntemleriyle sabit mıknatıslı senkron generatör kontrollerini sağlamak, bu dönüştürücüler sayesinde mümkündür. Bu eviriciler genelde maksimum güç noktası takibi modunda çalışırlar ve reaktif güç değerleri 0 VAR olarak ayarlanırlar. Bu eviricilere literatürde şebeke besleyen eviriciler denir [33-36,42].

Çalışmanın ortak bağlantı noktası, AA yüklerin de bulunduğu, AA bara olarak isimlendirdiğimiz, rüzgâr türbini eviricisi ve DA bara enerjisini dönüştüren eviricinin, birleşim noktasıdır. Blok şeması Şekil 2.14’te verilmiştir.



Şekil 2.14. Ortak bağlantı noktasının blok şeması

Ortak bağlantı noktasındaki anahtar sayesinde rüzgâr türbini ve DA baraya bağlı evirici bağlanıp ayrılabilir. Bu nedenle AA baranın ikinci kısmı, DA baraya bağlı olan ve ana evirici olarak çalışan eviricidir. Bu eviricinin temel hedefi AA baranın güç kalitesini sağlamaktır. Bu eviricilere literatürde şebeke oluşturan evirici denmektedir. Şebeke oluşturan eviriciler, güç paylaşımı sağlarken gerilim ve frekansın regülasyonuna da destek veren, iç akım ve gerilim kontrol döngülerine sahip olan ya da doğrudan gerilim ve frekans kontrolü yoluyla güç paylaşımı sağlayabilen eviricilerdir [42]. Sistemde makine temelli kaynak bulunmadığı için frekans sorunu pek ortaya çıkmamaktadır. Bu nedenle ana evirici olan şebeke oluşturan evirici, AA bara gerilim regülasyonu ile aktif ve reaktif güç kontrolünden sorumludur.

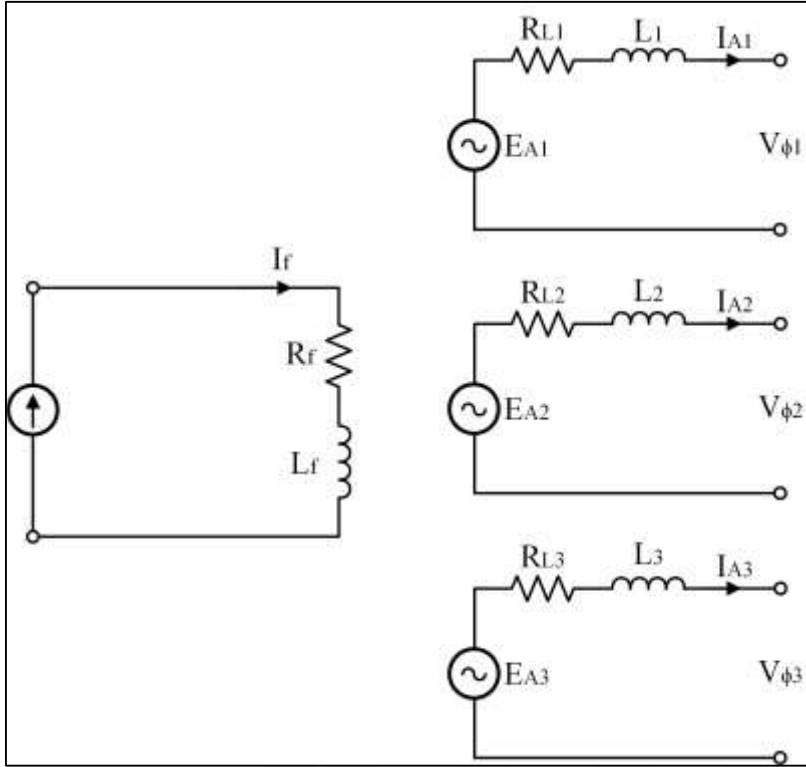
AA baranın nominal geriliminin efektif değeri bir faz 230 V ve temel frekans değeri 50 Hz olarak belirlenmiştir. Böylece şuan ki çalışma alanımız şebekeden bağımsız ada moduyla sınırlı olsa da ileride şebeke bağlantılı mod çalışmalarına da geçilebilmesi için olanak sağlanmıştır. Çünkü bir mikro şebeke, şebeke bağlantılı modda da çalışabilir olmalıdır. Ancak burada odaklanılan nokta ada modu çalışmanın dinamikliği ve bu dinamik ortamda kararlılığın sağlanması üzerinedir.

Bu aşamada rüzgâr türbini eviricisi şebeke besleyen modda, maksimum güç noktası takibi sağlayarak P ve Q aktif ve reaktif gücünü kontrol edecektir. Q reaktif gücü, klasik şebeke besleyen eviricilerde olduğu gibi 0 VAr olarak belirlenmiştir. AA baranın geri kalan enerji ihtiyacı DA baradan enerji dönüşümü yoluyla sağlanmaktadır.

AA bara yönetimini sağlamak için de bir denetleyici sunulmuştur. Bu denetleyicinin iki çalışma durumu vardır. İlki senkronizasyon öncesi çalışma durumudur. Bu durumda denetleyici yükler için gerilim seviyesini korurken aynı zamanda senkronizasyon hazırlığı yapar. Senkronizasyon hazırlığı sürecinde gerilim eşitliği takibi ve gerilimlerin faz açısı farkının azaltılması gerçekleştirilir. Senkronizasyon koşulları sağlanınca sistem otomatik olarak ortak bağlantı noktasındaki anahtarı kapatarak senkronizasyon moduna geçer. Senkronizasyon sonrası modda artık denetleyici güç paylaşımı modunda çalışır.

Sabit mıknatıslı senkron generatör ile rüzgâr türbini modeli

Sabit mıknatıslı senkron generatörler üç faz gerilim çıkışı veren makinelerdir. Alan sargıları sabit mıknatıstan oluştuğu için uyarımları da sabittir. Sabit mıknatıslı senkron generatörün tam eşdeğer devre modeli Şekil 2.15'te verilmiştir.



Şekil 2.15. Sabit mıknatıslı senkron generatörün tam eşdeğer devresi

Sabit mıknatıslı senkron generatörün elektriksel modelinin zaman bölgesi denklemleri, Eş. 2.44'te matris formunda verilmiştir. Generatörün çıkışı üç faz olduğu için çalışmalarda kolaylık sağlaması açısından genellikle dq eksenine dönüşüm yapılır. Bu dönüşümü sağlayan matris ise Eş. 2.45'te görülmektedir [83].

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_r \cos(\theta_r) \\ \lambda_r \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \lambda_r \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Burada V_a , V_b , V_c , I_a , I_b , I_c , faz gerilim ve akımlarını, R_s stator direncini, L ifadeleri faz ve karşılıklı indüktanslarını, λ_r rotor akısını, V_d , V_q , V_0 ise dq dönüşüm gerilimlerini ifade eder. Eş. 2.44'ün dq eksen gösterimi Eş. 2.46-2.48 arasında verilmiştir. Eş. 2.48'de verilen

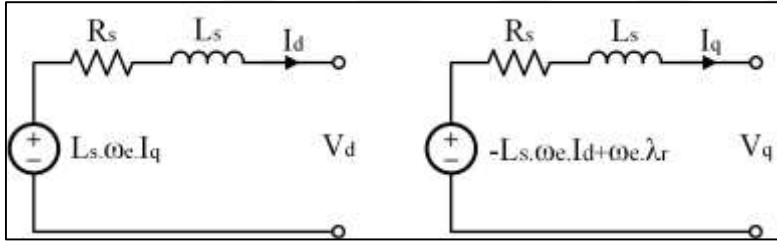
denklem dairesel rotora sahip olan bir sabit mıknatıslı senkron generatörün L_d ve L_q değerlerinin yaklaşık olarak stator bir faz indüktansına eşit olduğunu ifade eder [84-85].

$$V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_e I_q L_q \quad (2.46)$$

$$V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega_e I_d L_d + \omega_e \lambda_r \quad (2.47)$$

$$L_d = L_q = \frac{L_{ab}}{2} = L_s \quad (2.48)$$

Burada I_d , I_q dq bileşeni akımlarını, L_d , L_q dq bileşeni stator indüktanslarını ve ω_e ise elektriki açısal hızı ifade eder. Bu denklemlerin elektriksel eşdeğer devresi karşılığı Şekil 2.16'da görülmektedir.



Şekil 2.16. Sabit mıknatıslı senkron generatörün dq eşdeğer devresi

Sabit mıknatıslı senkron generatörün mekanik denklemleri ise Eş. 2.49-2.51 arasında yer almaktadır. Bu denklemler tork ile mekanik hız arasındaki ilişkiyi vermektedir [86].

$$T_e = \frac{3}{2} p \lambda_r I_q \quad (2.49)$$

$$T_m = T_e + J_{eq} \frac{d\omega_m}{dt} + F \omega_m \quad (2.50)$$

$$T = T_m - T_e = J_{eq} \frac{d\omega_m}{dt} + F \omega_m \quad (2.51)$$

Burada T_e , p , λ_r , I_q sırasıyla elektromanyetik tork, kutup çifti, rotor akısı ve q eksen akımıdır. T_m , J_{eq} , F , ω_m ise mekanik tork, toplam atalet, toplam sürtünme ve mekanik açısal hızdır. Çalışmada kullanılan sabit mıknatıslı senkron generatör parametreleri Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Kullanılan sabit mıknatıslı senkron generatörün parametreleri

Parametre	Değer
Stator Direnci (R_s)	0,4478 Ω
Stator İndüktansı (L_s)	0,00334 H
Rotor Akısı (λ_r)	0,171 Vs
Atalet (J_{eq})	0,001469 kgm^2
Sürtünme (F)	0,0003035 Nms
Kutup Çifti (p)	4
Nominal Mekanik Hız (ω_m)	240 rad/s

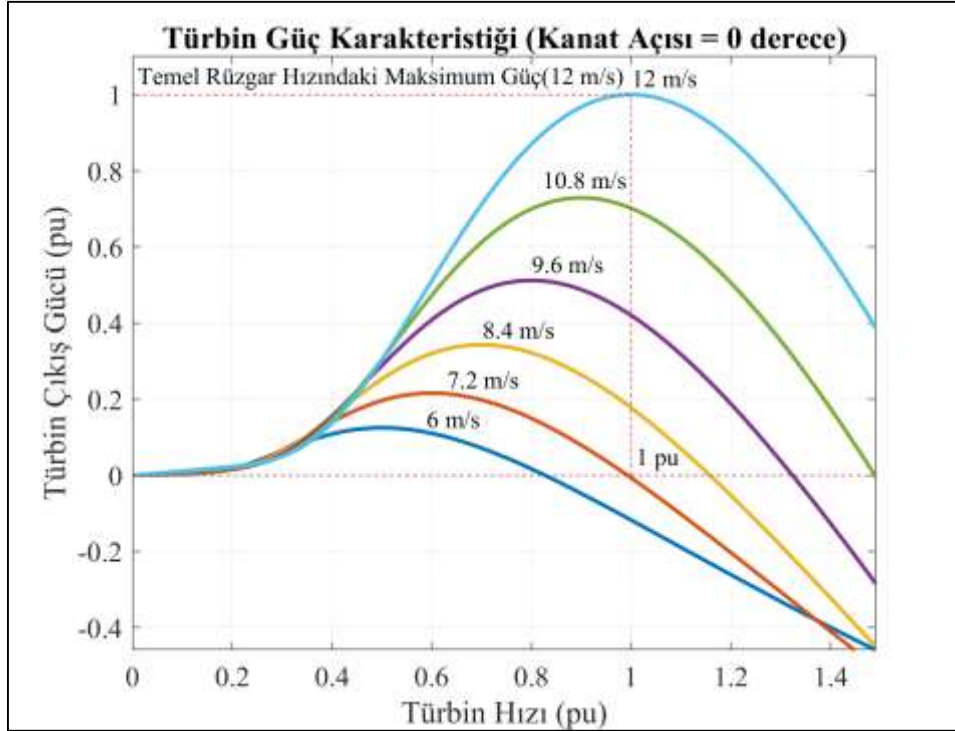
Türbin modeli için gerekli denklemler de Eş. 2.52-2.54'te verilmiştir. Bu denklemler türbinin mekanik davranışını ifade eder [86-87].

$$P_m = c_{p(\lambda,\beta)} \rho \frac{A}{2} v_r^3 \quad (2.52)$$

$$c_{p(\lambda,\beta)} = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (2.53)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.54)$$

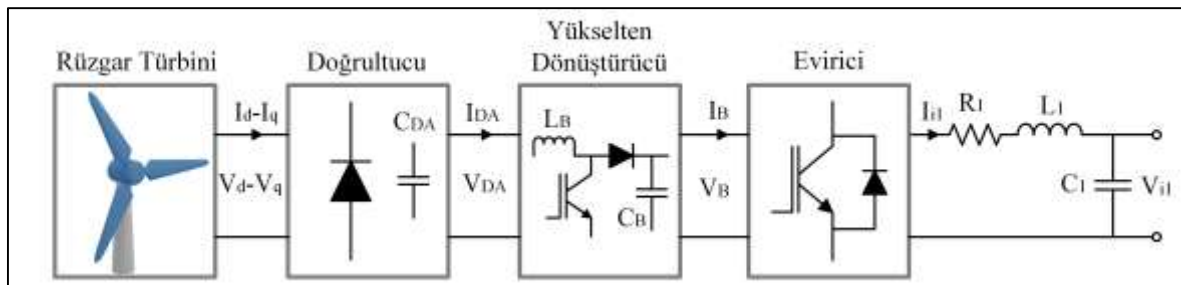
Burada P_m mekanik çıkış gücünü, $c_{p(\lambda,\beta)}$ türbinin performans sabitini, ρ hava yoğunluğunu, A türbin süpürme alanını, v_r rüzgâr hızını, λ uç hız oranını, β kanat açısını ve $c_1 - c_6$ denklem sabitlerini ifade eder. c_1 c_2 c_3 c_4 c_5 ve c_6 sabitleri sırasıyla, 0,5176, 116, 0,4, 5, 21 ve 0,0068 değerlerine eşittir. λ uç hız oranı da genellikle 8,1 olarak alınır. Kullanılan türbinin, mekanik güç ve rotor hızı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 2.17'de verilmiştir.



Şekil 2.17. Rüzgâr türbininin güç karakteristiği

Şebeke besleyen evirici modeli

Sabit mıknatıslı senkron generatör dönüştürücüsü için makine tarafına kontrolsüz bir doğrultucu ve şebeke tarafına ise bir fazlı iki seviyeli klasik bir voltaj kaynaklı evirici bağlanmıştır. Eviricinin çıkışında LC filtre bağlıdır. Bu iki dönüştürücü arasında ise maksimum güç noktası takibini sağlamak için bir yükselten dönüştürücü eklenmiştir. Dönüştürücünün devre şeması Şekil 2.18’de verilmiştir.



Şekil 2.18. Rüzgâr türbininin dönüştürücü blok şeması

Doğrultucu, sabit mıknatıslı senkron generatör çıkışına bağlandığı için doğrultucu çıkış gerilim ve akım denklemleri generatör parametreleri cinsinden Eş. 2.55-2.56’da

gösterildiği gibidir. Bunun sebebi d ve q bileşenleri arasında 90°'lik açı farkı olmasıdır [88-89].

$$V_{DA} = k_v \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (2.55)$$

$$I_{DA} = k_i \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (2.56)$$

Burada V_{DA} ve I_{DA} doğrultucu çıkışı gerilim ve akım ifadelerini, k_v ve k_i gerilim ve akım dönüşüm katsayılarını ifade etmektedir. Bu katsayılar, kayıplara ve kaynak dalga şekline bağlıdır. Eğer gerilim kaynağının ideal sinüs olduğu ve doğrultucunun da kayıpsız olduğu varsayılırsa k_v ve k_i katsayıları sırasıyla $\frac{3\sqrt{3}}{\pi}$ ve $\frac{\pi\sqrt{3}}{6}$ şeklinde olacaktır. Burada dq parametrelerinin bir faz maksimum değerlere göre oluşturulduğuna dikkat edilmelidir. Burada V_{DA} gerilimi salınımı %13 civarındadır. Doğrultucunun çıkışına yükselten dönüştürücü bağlandığı için doğrultucu çıkışına küçük bir kapasitör bağlanması yeterli olacaktır. Çünkü yükselten dönüştürücü de gerilim regülasyonuna katkı sağlayacaktır ve yükselten dönüştürücü çıkışına bağlanan kapasitör DA çıkış gerilimini düzeltici bir göreve sahiptir. Ayrıca doğrultucu çıkışına büyük kapasitör bağlanması maksimum güç kontrolünün dinamikliğini azaltıcı etkiye sahiptir. Bu nedenle doğrultucu kapasitörü 100 uF değerinde seçilmiştir. Doğrultucu çıkışına bağlanan yükselten dönüştürücü denklemleri de Eş. 2.57-2.60 arasında verilmiştir [76-78,83].

$$L_B \frac{di_{LB}}{dt} = V_{DA} - V_B(1 - D) \quad (2.57)$$

$$C_B \frac{dV_B}{dt} = i_{LB}(1 - D) - I_B \quad (2.58)$$

$$C_{DA} \frac{dV_{DA}}{dt} = I_{DA} - i_{LB} \quad (2.59)$$

$$\frac{V_B}{V_{DA}} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.60)$$

Burada L_B dönüştürücü bobin değerini, i_{LB} bobin akımını, V_{DA} dönüştürücü giriş gerilimini, V_B çıkış gerilimini, C_B çıkış kapasitörünü, I_B çıkış akımını, I_{DA} giriş akımını, C_{DA} giriş kapasitörünü ve D görev oranını ifade eder. Yükselten dönüştürücünün bobin değerini seçerken, giriş akımına ihtiyaç vardır. Dönüştürücü gücü rüzgâr türbini gücüne

bağlı olarak 2500 W seçilmiştir. Ancak giriş akımı bilgisi için sabit mıknatıslı senkron generatör çıkış geriliminin de bilinmesi gereklidir. Bu değerin ölçüm yoluyla nominal 240 rad/s hızında ve 2500 W yükte minimum 230 V civarında olduğu tespit edilmiştir. Çıkış gerilimi 350 V civarı seçilmiştir. Akım salınımı %30 olarak belirlenmiş ve bobin değerini elde etmeye ilişkin hesaplamalar Eş. 2.61-2.63'te verilmiştir [76-78,83].

$$i_{LB} = \frac{P_{DA}}{V_{DA}} = \frac{2500}{230} \cong 10,87 \text{ A} \quad (2.61)$$

$$\Delta i_{LB} = \%30 \times i_{LB} = 0,3 \times 10,87 = 3,26 \text{ A} \quad (2.62)$$

$$L_B = \frac{V_{DA} \times (V_B - V_{DA})}{\Delta i_{LB} \times f_{sw} \times V_B} = \frac{230 \times (350 - 230)}{3,26 \times 5000 \times 350} \cong 4,8 \text{ mH} \quad (2.63)$$

Burada P_{DA} giriş gücü, f_{sw} ise anahtarlama frekansdır ve 5 KHz seçilmiştir. Yükselten dönüştürücünün çıkış gerilimi salınımı (ΔV_B) %1 olarak belirlenirse, kapasitörün minimum değeri Eş. 2.64-2.66'dan hesaplanabilir [76-78,83].

$$I_B = \frac{P_B}{V_B} = \frac{2500}{350} = 7,14 \text{ A} \quad (2.64)$$

$$\Delta V_B = \%1 \times V_B = 0,01 \times 350 = 3,5 \text{ V} \quad (2.65)$$

$$C_B = \frac{I_B \times (V_B - V_{DA})}{\Delta V_B \times f_{sw} \times V_B} = \frac{7,14 \times (350 - 230)}{3,5 \times 5000 \times 350} \cong 140 \text{ uF} \quad (2.66)$$

Buradaki hesaplamalar giriş geriliminin düzgün doğru gerilim olması kuralına dayanır. Ancak giriş gerilimi salınımı, yani üç fazlı doğrultucu çıkış geriliminin salınımı %13 civarındadır. Bu nedenle Eş. 2.64-2.66 arası hesaplamalara göre %1 olması gereken salınım seviyesinin üzerine %4'lük bir salınım eklenmektedir. Başlangıçtaki %13'lük salınımın büyük çoğunluğu giriş empedansı ve anahtarlama ile filtrelenmektedir. Kalan %4'lük ek salınımı %1'e düşürebilmek için kapasitör değerini minimum dört katına çıkarmak gerekir. Sabit mıknatıslı senkron generatörün atalet değeri yeterince büyük olmadığı için kaynak da bir miktar salınım yapmaktadır. Bu nedenle çıkış gerilim değerinin salınımının %1'in altına düşmesi istenirse bu sistem için 7000 uF kapasitöre ihtiyaç vardır.

Kullanılan bir fazlı voltaj kaynaklı evirici modeli laplace domenini ifadesi Eş. 2.67’de verilmiştir.

$$V_{i1} = m_1 \frac{V_B}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{s^2 C_1 L_1 + s C_1 R_1 + 1} \quad (2.67)$$

Burada V_{i1} evirici çıkış gerilimini, m_1 modülasyon indeksini, C_1 çıkış kapasitörünü, L_1 bobin indüktansını, R_1 bobin iç direncini ve s laplace operatörünü ifade etmektedir. Burada bobin ve kapasitör değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için çıkış gücü değerine ihtiyaç vardır. Doğrultucu ve yükselten dönüştürücü hesaplarından P_{i1} dönüştürücü gücü 2500 W olarak belirlenmiştir. Buna göre Eş. 2.68, çekilen akımın maksimum değerini, Eş. 2.69, %30 olarak belirlenen akım salınımını ve Eş. 2.70 ise bobin hesabını vermektedir [90-94].

$$I_{i1} = \frac{P_{i1} \sqrt{2}}{V_{i1}} = \frac{2500 \sqrt{2}}{230} = 15,37 \text{ A} \quad (2.68)$$

$$\Delta I_{i1} = \%30 \times I_{i1} = 0,3 \times 15,37 = 4,61 \text{ A} \quad (2.69)$$

$$L_1 = \frac{V_B}{4 f_{sw} I_{i1}} = \frac{350}{4 \times 10000 \times 4,61} \cong 1,9 \text{ mH} \quad (2.70)$$

Burada I_{i1} maksimum akımı, ΔI_{i1} akım salınımını ve f_{sw} anahtarlama frekansını ifade eder. f_{sw} değeri 10 KHz ve V_B değeri ise 350 V belirlenmiştir. Kapasitör değerinin belirlenmesi için reaktif güç sınırlamaları göz önünde bulundurulmalıdır. Genellikle reaktif güç değeri aktif güç değerinin %5’i olarak seçilir. Buna göre Eş. 2.71-2.72 arasında kapasitör hesapları yer almaktadır.

$$Q_{i1} = 0,05 \times P_{i1} = 0,05 \times 2500 = 125 \text{ VAr} \quad (2.71)$$

$$C_1 = \frac{Q_{i1}}{2 \pi f V_{i1}^2} = \frac{125}{2 \times \pi \times 50 \times 230^2} \cong 7,5 \text{ uF} \quad (2.72)$$

Burada Q_{i1} kapasitör reaktif gücünü ve f hat frekansını ifade etmektedir. Tüm bunlarla beraber rezonans durumlarının oluşmaması için Eş. 2.73’te verilen sınırlara uyulması gereklidir.

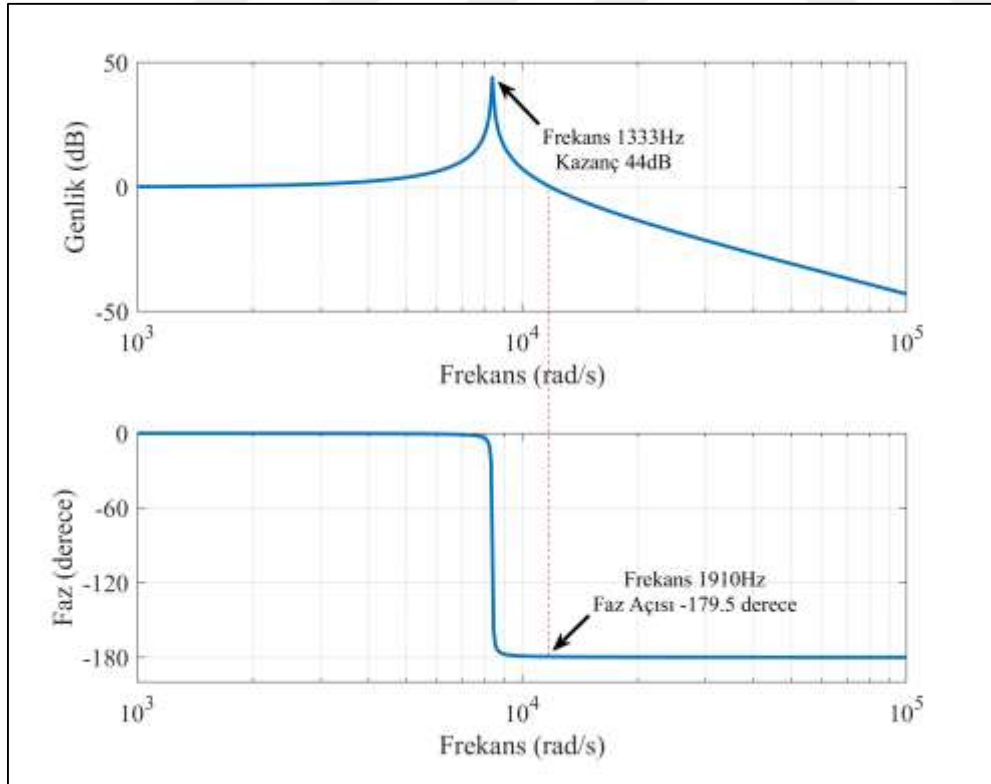
$$10f < f_r < 0,5f_{sw} \quad (2.73)$$

$$10f = 500 < f_r < 5000 = 0,5f_{sw} \quad (2.74)$$

Burada f_r rezonans frekansını ifade eder. LC filtre için rezonans frekansı hesabı Eş. 2.75'te verilmiştir.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{1,9 \times 10^{-3} \times 7,5 \times 10^{-6}}} = 1333 \text{ Hz} \quad (2.75)$$

Rezonans frekansı Eş. 2.74'te verilen aralıkta olduğu için tasarlanan LC filtresinin uygun olduğu söylenebilir. Şekil 2.19'da temelde RLC devresinden oluşan filtrenin transfer fonksiyonunun bode grafiği çizdirilmiştir. Bode diyagramından filtrenin, genliğinin sıfırı kestiği noktadaki fazı -180° 'nin üstünde kaldığı için kararlı olduğu ve çıkış geriliminin sonsuza gitmediği anlaşılmaktadır.



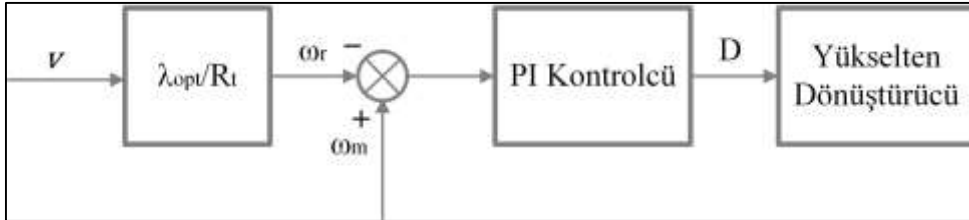
Şekil 2.19. Şebeke besleyen eviricinin LC filtre bode diyagramı

Maksimum güç noktası takibi ve güç kontrolü

Rüzgâr türbini maksimum güç noktası kontrolü için tepe tırmanışı, değiştir-gözle, optimal tork kontrol, artırımı iletkenlik, bulanık mantık, uç hız oranı kontrolü ve çeşitli meta sezgisel yöntemler literatürde çalışılmaktadır. Bu çalışmada uç hız oranı kontrolü tercih edilmiştir. Maksimum güç noktası kontrol denklemi Eş. 2.76'da verilmiştir [53].

$$\omega_r = v \frac{\lambda_{opt}}{R_t} \quad (2.76)$$

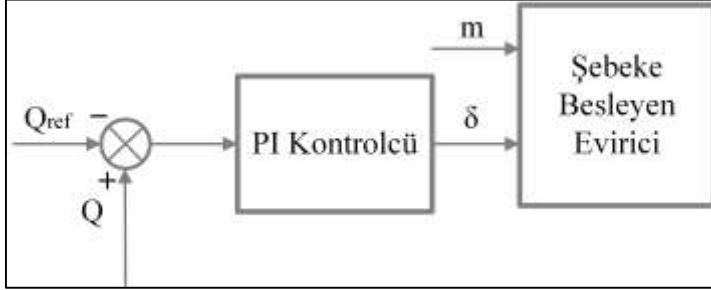
Burada ω_r referans mekanik hızı, λ_{opt} optimum uç hız oranını, v rüzgâr hızını ve R_t kanat uzunluğunu ifade eder. Kullanılan türbin $\lambda_{opt} = 8,1$ ve $R_t = 1,3 \text{ m}$ 'dir. Literatürde ω_r farklı değerler alabilmektedir. Ancak MATLAB simülasyonu için bu değer maksimum 120 rad/s değerine kadar çıkabilmektedir. Ancak kullanılan sabit mıknatıslı senkron generatör nominal hızı 240 rad/s olduğu için bir katsayı yardımıyla dönüşüm sağlanmıştır. Uygulamada bu dönüşüm dişliler yardımı ile sağlanabilir. Maksimum güç noktası takibi için kullanılan yöntemin blok şeması Şekil 2.20'de verilmiştir.



Şekil 2.20. Rüzgâr türbininin maksimum güç noktası takibi kontrol şeması

Şebeke besleyen evirici rüzgâr türbininden üretilen enerjiyi ortak bağlantı noktasına yönlendirmektedir. Ancak bunu yaparken aktif ve reaktif güç kontrolünü de gerçekleştirmektedir. Aktif güç kontrolü için maksimum güç kontrolü yapmak yeterlidir. Bu da rotor hızı, yani generatörden çekilen akım ayarlanarak yapılır. Genel olarak şebeke besleyen eviriciler için reaktif güç 0 VAr olarak alınır. Reaktif güç, gerilim ile ilgili bir durumdur. Generatör gerilimi ortak bağlantı noktası geriliminden yüksek ise generatör reaktif güç üretmeye başlar. Generatör geriliminin yüksek olmasının sebebi ise yeterince aktif güç çekilmediği içindir. Çünkü aktif güç artarsa generatör hızı düşer ve bunun sonucu olarak gerilim düşer. Böylece reaktif güç ayarı aktif güç ayarlanarak yapılabilir. Aktif güç

ayarı için de faz açısı (δ) parametresi kontrol edilebilir. Aktif ve reaktif güç kontrollerini sağlayan denetleyicinin blok şeması Şekil 2.21’de verilmiştir.

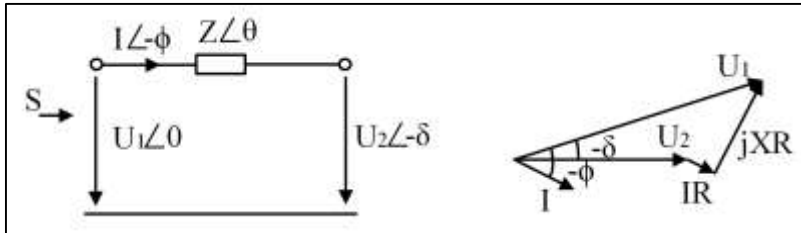


Şekil 2.21. Rüzgâr türbininin reaktif güç kontrol şeması

Buradan görüldüğü gibi maksimum güç noktası takibi ve güç kontrollerini sağlamak için PI denetleyici kullanılmıştır. Kullanılan PI denetleyici fonksiyonu Eş. 2.77’de verilmiştir.

$$f(t) = e(t)K_p + K_i \int e(t)dt \quad (2.77)$$

Kaynaklar arası güç aktarımı için Şekil 2.22’de verilen devre referans alınacak olursa Eş. 2.78-2.79 arasında aktif ve reaktif güç aktarımı denklemleri verilebilir [57-58].



Şekil 2.22. Kaynaklar arası güç aktarımı devre şeması

$$P = \frac{U_1}{R^2 + X^2} (R(U_1 - U_2 \cos(\delta)) + XU_2 \sin(\delta)) \quad (2.78)$$

$$Q = \frac{U_1}{R^2 + X^2} (-RU_2 \sin(\delta) + X(U_1 - U_2 \cos(\delta))) \quad (2.79)$$

Burada genellikle X hat reaktansı, R hat direncinden daha büyük olduğu için R hat direnci ihmal edilebilir. Böylece Eş. 2.80-2.81 denklemleri oluşur.

$$U_2 \sin(\delta) = \frac{XP - RQ}{U_1} \quad (2.80)$$

$$U_1 - U_2 \cos(\delta) = \frac{RP - XQ}{U_1} \quad (2.81)$$

Aynı zamanda δ açısı senkronizasyon durumunda küçük olduğu için $\sin(\delta)$ yaklaşık olarak δ değerine eşittir. $\cos(\delta)$ ise yaklaşık olarak 1'e eşittir. Böylece Eş. 2.82-2.85 arası denklemler yaklaşık olarak geçerlidir.

$$\delta = \frac{XP}{U_1 U_2} \quad (2.82)$$

$$U_1 - U_2 = \frac{XQ}{U_1} \quad (2.83)$$

$$P = \delta \frac{U_1 U_2}{X} \quad (2.84)$$

$$Q = (U_1 - U_2) \frac{U_1}{X} \quad (2.85)$$

2.1.3. Ortak bağlantı noktası

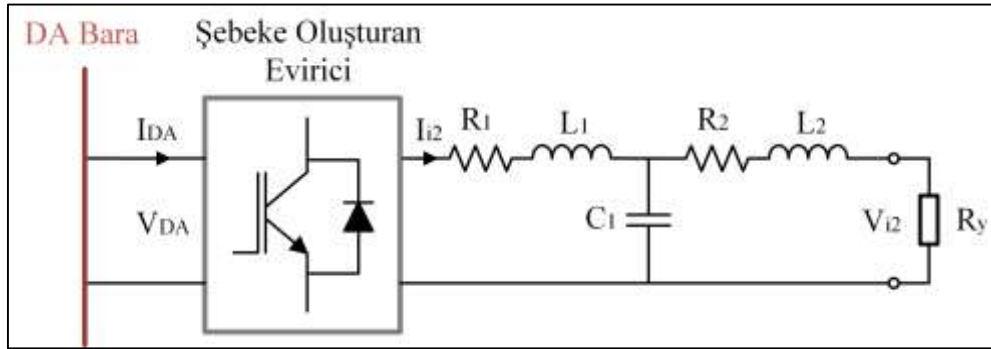
Ortak bağlantı noktası, enerjisini DA baradan alan şebeke oluşturan eviricinin ve yüklerin bulunduğu bölümdür. Rüzgâr türbini eviricisi bu noktaya bağlanır veya bu noktadan ayrılır. Güç kalitesi analizleri bu noktadaki yükler üzerinde incelenir. Bu nokta aynı zamanda AA baradır. AA bara gerilim, frekans ve güç paylaşımı gibi durumlarda bu nokta referans alınır.

Şebeke oluşturan evirici, ortak bağlantı noktasında hem aktif hem de reaktif gücü değiştirerek AA baranın kararlı kalmasını sağlar. Bunu sağlayan aslında AA barada gerçekleştirilen kontroldür. Burada sağlanan kontrol düşüş kontrol yöntemine dayanmaktadır.

Şebeke oluşturan evirici tasarımı

Şebeke oluşturan evirici tasarımı temel olarak şebeke besleyen evirici ile aynı yapıdadır. İki evirici arasındaki temel fark kontrol yapısındadır. Ayrıca bu evirici yapısında LC filtre

yerine LCL filtre tercih edilmiştir. Bu filtrenin seçilmesinin en önemli nedeni, düşük anahtarlama frekanslarında kullanılabilmesi, filtre boyutlarının geleneksel L ve LC filtrelere göre avantajlı olması, gerilim düşümünün daha düşük olması ve geleneksel L ve LC filtrelere göre daha iyi sönümleme sağlamasıdır [91-94]. Bu nedenle baskın evirici olan şebeke oluşturan eviricinin çıkış filtresinin biraz daha iyi olması tercih edilmiştir. Kullanılan eviricinin devre şeması Şekil 2.23'te verilmiştir.



Şekil 2.23. Şebeke oluşturan eviricinin blok şeması

Kullanılan evirici bir fazlı geleneksel voltaj kaynaklı evirici modelidir. LCL filtrenin yüksüz durumu LC filtre ile aynı tepkiyi vermektedir. Bu nedenle eviricinin çıkışına maksimum evirici gücünü veren bir yük bağlı olduğu varsayılmıştır.

Kullanılan eviricinin gücü 2500 W, nominal çıkış gerilimi ise 230 V AA 50 Hz seçilmiştir. Böylece Şekil 2.23'e göre eviricinin çıkış gerilimi laplace domeni ifadesini veren denklem Eş. 2.86-2.87 arasında yer almaktadır.

$$R_y = \frac{V_{i2}^2}{P_{i2}} = \frac{230^2}{2500} = 21,16 \, \Omega \quad (2.86)$$

$$V_{i2} = m_2 \frac{V_{DC}}{\sqrt{2}} \times \frac{R_y}{(L_1 L_2 C_1) s^3 + (R_1 L_2 C_1 + R_2 L_1 C_1 + R_y L_1 C_1) s^2 + (R_1 R_2 C_1 + R_1 R_y C_1 + L_1 + L_2) s + R_1 + R_2 + R_y} \quad (2.87)$$

Burada V_{i2} evirici çıkış gerilimini, m_2 modülasyon indeksini, C_1 filtre kapasitörünü, L_1 birinci bobin indüktansını, L_2 ikinci bobin indüktansını, R_1 birinci bobin iç direncini, R_2 ikinci bobin iç direncini, R_y maksimum yük direncini, P_{i2} maksimum çıkış gücünü ve s laplace operatörünü ifade etmektedir. Burada bobin ve kapasitör değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için gerekli denklemler Eş. 2.88-2.90 arasında verilmiştir [91-94].

$$I_{i2} = \frac{P_{i2}\sqrt{2}}{V_{i2}} = \frac{2500\sqrt{2}}{230} = 15,37 \text{ A} \quad (2.88)$$

$$\Delta I_{i2} = \%10 \times I_{i2} = 0,1 \times 15,37 = 1,537 \text{ A} \quad (2.89)$$

$$L_1 = \frac{V_{DC}}{16f_{sw}I_{i2}} = \frac{350}{16 \times 10000 \times 1,537} \cong 1,4 \text{ mH} \quad (2.90)$$

Burada I_{i2} maksimum akımı, ΔI_{i2} akım salınımını ve f_{sw} anahtarlama frekansını ifade eder. f_{sw} değeri 10 KHz olarak belirlenmiştir. Kapasitör değerinin belirlenmesi için reaktif güç sınırlamaları göz önünde bulundurulmalıdır. Genellikle reaktif güç değeri aktif güç değerinin %5'i olarak seçilir. Buna göre Eş. 2.91-2.92 arasında kapasitör hesapları yer almaktadır.

$$Q_{i2} = 0,05 \times P_{i2} = 0,05 \times 2500 = 125 \text{ VAr} \quad (2.91)$$

$$C_1 = \frac{Q_{i2}}{2\pi f V_{i2}^2} = \frac{125}{2 \times \pi \times 50 \times 230^2} \cong 7,5 \text{ uF} \quad (2.92)$$

Burada Q_{i2} kapasitörün çektiği reaktif gücü ve f ise hat frekansını ifade eder. İkinci bobinin (L_2) değerini belirlemek için Eş. 2.93 kullanılmıştır.

$$L_2 = rL_1 = 1 \times 1,4 = 1,4 \text{ mH} \quad (2.93)$$

Burada r birinci bobin ile ikinci bobin arasındaki orandır ve 0,2 ile 2 arasında seçilebilir. Bu çalışma için 1 değeri seçilmiştir [94]. Yüksek rezonans durumlarının oluşmaması için Eş. 2.94'te verilen sınırlara uyulması gereklidir.

$$10f < f_r < 0,5f_{sw} \quad (2.94)$$

$$10f = 500 < f_r < 5000 = 0,5f_{sw} \quad (2.95)$$

Burada f_r rezonans frekansını ifade eder. LCL filtre için rezonans frekansı hesabı Eş. 2.96'da verilmiştir [94].

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_1}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1,4 \times 10^{-3} + 1,4 \times 10^{-3}}{1,4 \times 10^{-3} \times 1,4 \times 10^{-3} \times 7,5 \times 10^{-6}}} = 2196 \text{ Hz} \quad (2.96)$$

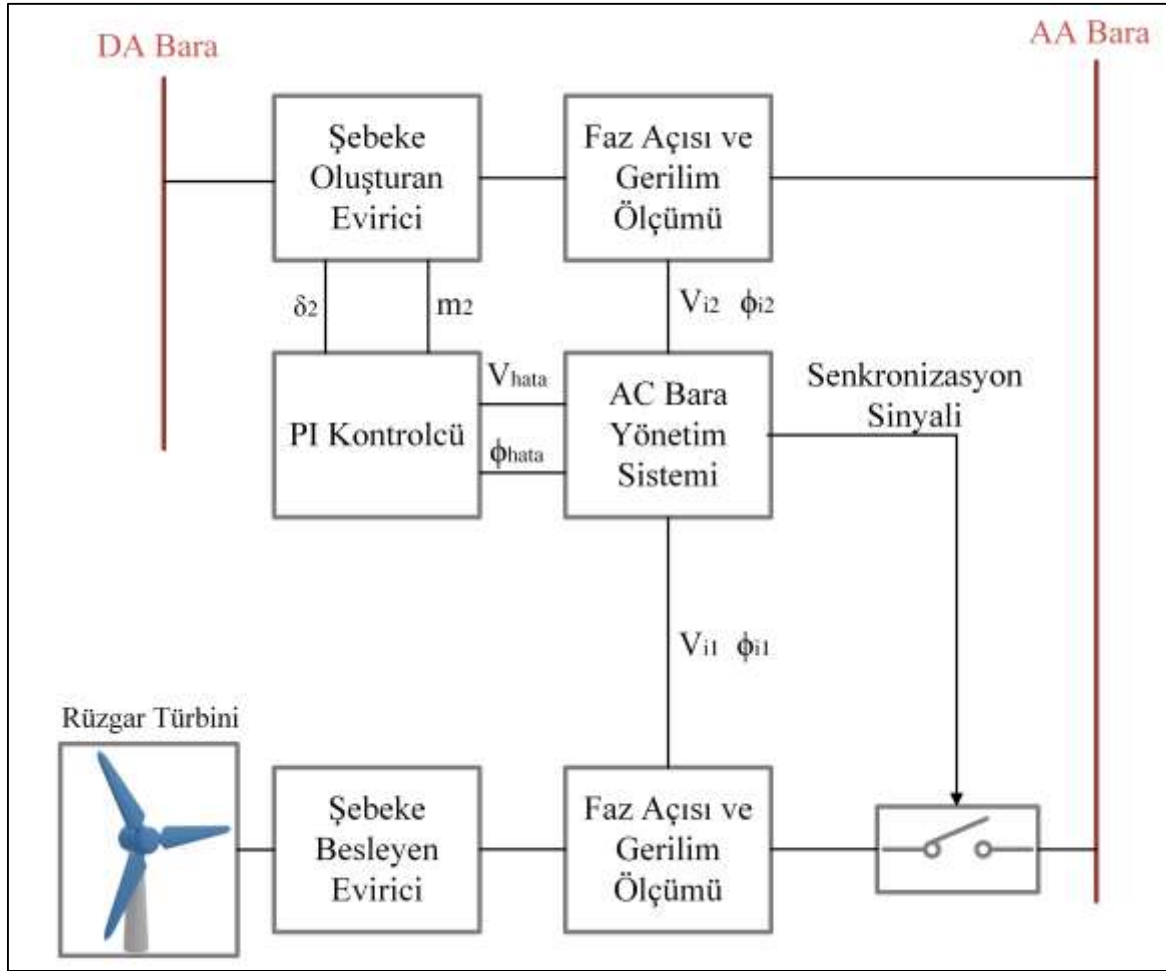
Rezonans frekansı Eş. 2.95'te verilen aralıkta olduğu için tasarlanan LCL filtresi uygundur.

Şebeke oluşturan evirici ile tüm sistemin birleştirilmesi ve kontrolü

Şebeke oluşturan evirici ile şebeke besleyen eviricinin birbirine bağlanarak senkron olabilmesi için öncelikle paralel bağlanma şartlarının yerine getirilmesi gereklidir. Bu şartlar dört adettir ve gerilimler arasındaki değerler esastır. Bunlar;

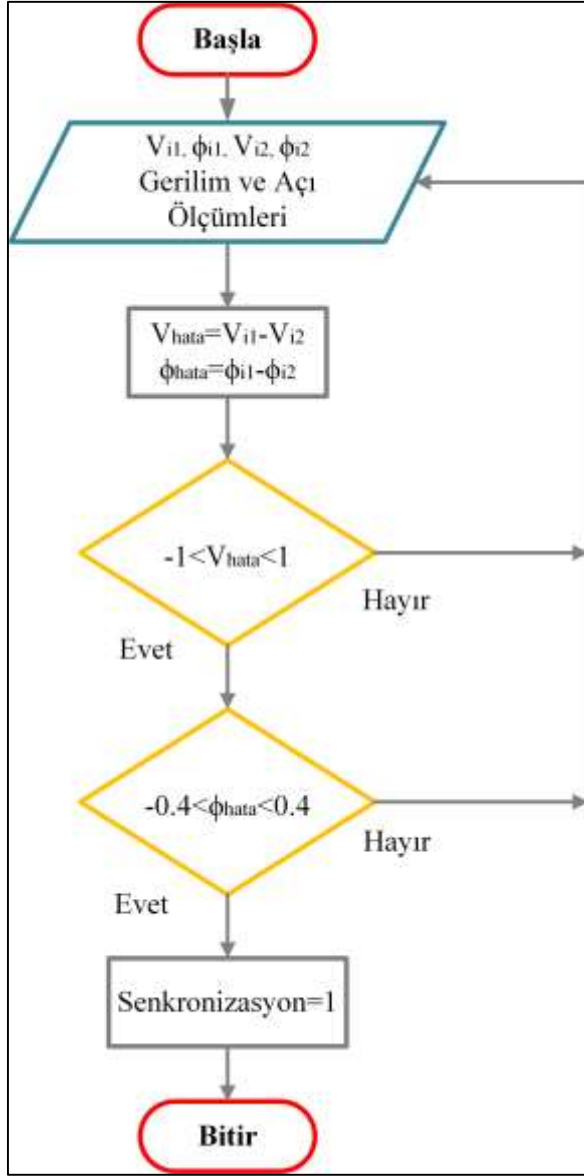
- Faz sırasının aynı olması,
- Faz açısının aynı olması,
- Frekansın aynı olması,
- Gerilim büyüklüklerinin aynı olmasıdır.

Aksi durumda senkronizasyon oluşmayabilir ve kaynaklar çok yüksek akımlar talep edebilir. Bu değerlerin küçük toleranslar aralığında yakın olmasıyla, senkronizasyon için anahtar kapatılır. Kontrol için kullanılan yapının blok şeması Şekil 2.24'te verilmiştir.



Şekil 2.24. Senkronizasyon için kullanılan kontrolün blok şeması

Bu çalışmada frekans, evirici çıkışlarında eşit ve 50 Hz olarak belirlenmiştir. Bu nedenle değişken olan değerler, gerilimler arası faz açıları ve gerilim büyüklükleridir. Kontrol bloğunun birinci durumu senkronizasyonu sağlamak için bu parametreleri ayarlar. Bunun için klasik PI denetleyiciler kullanılmıştır. Senkronizasyon için kullanılan kontrol algoritması Şekil 2.25'te verilmiştir.



Şekil 2.25. Senkronizasyon algoritması

Kontrolün ikinci kısmı senkronizasyon gerçekleştikten sonra olan güç paylaşımının kontrolüdür. Bu çalışmada şebeke besleyen eviriciye bağlı rüzgâr türbini, AA baraya sonradan bağlandığı ve ayrıca maksimum güç noktasında çalıştığı için güç yönetimini, şebeke oluşturan evirici sağlamaktadır. Güç paylaşımını ifade eden denklemler Eş. 2.97-2.100 arasında verilmiştir [57-58].

$$P = \frac{U_1}{R^2 + X^2} (R(U_1 - U_2 \cos(\delta)) + XU_2 \sin(\delta)) \quad (2.97)$$

$$Q = \frac{U_1}{R^2 + X^2} (-RU_2 \sin(\delta) + X(U_1 - U_2 \cos(\delta))) \quad (2.98)$$

$$U_2 \sin(\delta) = \frac{XP - RQ}{U_1} \quad (2.99)$$

$$U_1 - U_2 \cos(\delta) = \frac{RP - XQ}{U_1} \quad (2.100)$$

Burada genellikle X hat reaktansı, R hat direncinden daha büyük olduğu için R hat direnci ihmal edilebilir. Aynı zamanda δ açısı senkronizasyon durumunda küçük olduğu için $\sin(\delta)$ yaklaşık olarak δ değerine, $\cos(\delta)$ ise yaklaşık olarak 1'e eşittir. Böylece Eş. 2.101-2.104 arası denklemler yaklaşık olarak geçerlidir [57-58].

$$\delta = \frac{XP}{U_1 U_2} \quad (2.101)$$

$$U_1 - U_2 = \frac{XQ}{U_1} \quad (2.102)$$

$$P = \delta \frac{U_1 U_2}{X} \quad (2.103)$$

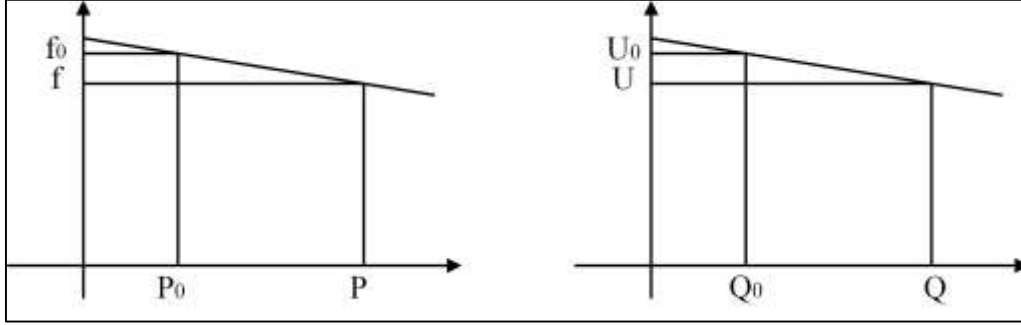
$$Q = (U_1 - U_2) \frac{U_2}{X} \quad (2.104)$$

Bu eşitliklerden anlaşılacağı üzere aktif güç kontrolü baskın olarak δ açısına bağlıdır. Reaktif güç kontrolü ise baskın olarak U_1 gerilimine bağlıdır. Bu bağlantıdan geliştirilmiş, literatürde çok çalışılan ve gerçek hayatta da çok fazla kullanılan bir yöntem olan düşüş kontrol yöntemi bu çalışmada temel alınmıştır. Düşüş yönteminde şebekeye veya hatta paralel bağlanan kaynaklar kendi güç sınırları oranında güç sağlayabilirler. Bu sayede kaynaklar arasında dengeli yük paylaşımı doğal olarak sağlanırken aynı zamanda gerilim ve frekans regülasyonu da belli sınırlar içerisinde tutulabilir. Sistem bilgisi gerektirmeyen, tak çalıştır özelliği yüksek, kolay uygulanabilir ve güvenli bir çalışma şeklidir. Bunun yanında gerilim regülasyonu dengesinin kurulması zorluğu, sistem empedansı ve karşılıklı empedansların etkilerinin dengeyi bozması, zayıf harmonik paylaşımı ve zayıf dinamik yanıt kontrolün zorluklarıdır. Klasik düşüş kontrol denklemleri Eş. 2.105-2.106'da verilmiştir [57].

$$f = f_0 - k_p(P - P_0) \quad (2.105)$$

$$U = U_0 - k_q(Q - Q_0) \quad (2.106)$$

Burada f ve U frekans ve gerilim, f_0 ve U_0 nominal frekans ve gerilim, k_p ve k_q aktif ve reaktif güç düşüş katsayıları, P ve Q anlık aktif ve reaktif güçler ve P_0 ve Q_0 nominal aktif ve reaktif güçlerdir. Düşüş yöntemini ifade eden grafik Şekil 2.26'da verilmiştir.



Şekil 2.26. Frekans ve gerilim düşüş kontrol karakteristikleri

Klasik düşüş kontrol üzerine literatürde birçok çalışma yürütülmektedir. Bunun yanında frekans yerine gerilim açısı kullanan yöntemler de mevcuttur. Çünkü sonuç olarak frekans açının türevidir. Açı tabanlı düşüş denklemi Eş. 2.107-2.108'de verilmiştir [38,58].

$$\delta = \delta_0 - k_p(P - P_0) \quad (2.107)$$

$$U = U_0 - k_q(Q - Q_0) \quad (2.108)$$

Burada δ referans açı değerini, δ_0 nominal açı değerini ifade etmektedir. Bazı çalışmalarda ise k_p ve k_q oransal kazançları ile birlikte integral ve türev kazançları kullanılarak dinamik tepki arttırılmakta ve güç salınımları azaltılmaktadır [58]. Bu çalışmada düşüş kontrol yöntemine N-PI kontrol stratejisi uygulanmıştır. Buradaki amaç üstel yaklaşım ve üstel regülasyon seçeneklerini test etmektir. Uygulanan kontrol için önerilen denklemler Eş. 2.109-2.116 arasında verilmiştir.

$$\Delta P = P - P_0 \quad (2.109)$$

$$\Delta Q = Q - Q_0 \quad (2.110)$$

$$\delta_r = \delta_0 - k_p \Delta P \quad (2.111)$$

$$U_r = U_0 - k_q(\Delta Q) \quad (2.112)$$

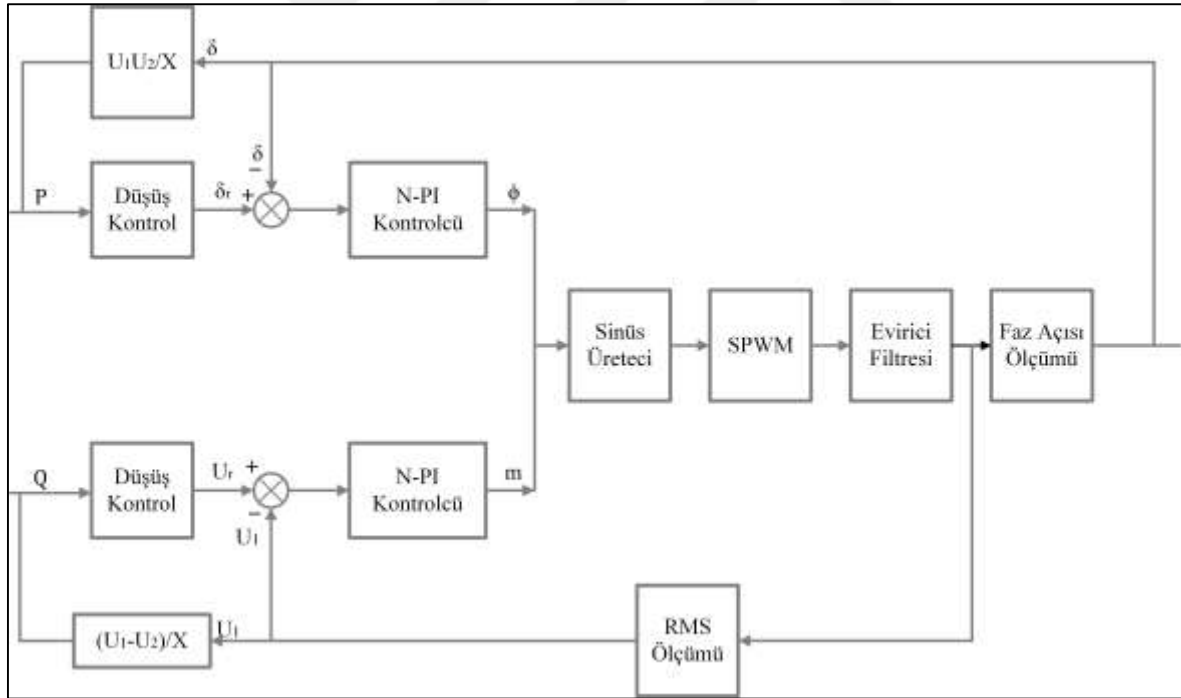
$$e_\delta(t) = \delta_r - \delta \quad (2.113)$$

$$e_U(t) = U_r - U_1 \quad (2.114)$$

$$\phi(t) = K_{p1}|e_\delta(t)|e_\delta(t) + K_{i1} \int |e_\delta(t)|e_\delta(t)dt \quad (2.115)$$

$$m(t) = K_{p2}|e_U(t)|e_U(t) + K_{i2} \int |e_U(t)|e_U(t)dt \quad (2.116)$$

Burada ΔP ve ΔQ aktif ve reaktif güç farklarını, δ_r ve U_r açı ve gerilim düşüş referanslarını, $e_\delta(t)$ ve $e_U(t)$ açı ve gerilim hatalarını, $\phi(t)$ ve $m(t)$ açı ve gerilim için uygulanan N-PI kontrol fonksiyonlarını ifade eder. Şekil 2.27'de, uygulanan güç paylaşım kontrolünün blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.27. Önerilen AA bara güç paylaşım kontrolünün blok şeması

N-PI kontrol Lyapunov kararlılık analizi

Uygulanan kontrol yöntemi doğrusal olmadığından kararlılığının analizi için bir transfer fonksiyon çıkarılamamaktadır. Doğrusal olmayan sistemlerde kararlılığın tespiti için

Lyapunov yöntemi en temel yöntemidir. Kararlılığın araştırılabilmesi için orijinin denge noktası olması gerekir. Lyapunov teoremi denge noktasının kararlılığını araştırır. Yani sistem denge noktasındayken bu durumunun korunup korunmadığını analiz eder. İkinci olarak sistemin enerji fonksiyonu veya enerji benzeri bir fonksiyonu oluşturulması gereklidir. Bu fonksiyonun pozitif kesin tanımlı, yani denge noktasında “0” değerinde ve diğer tüm noktalarda pozitif değerde olması gerekir. Son olarak denge noktasının kararlı olabilmesi için enerji benzeri fonksiyonun türevinin negatif yarı kesin tanımlı olması gerekir. Yani fonksiyon birden fazla noktada “0” değerini alabilir, ancak pozitif değer almamalıdır. Bu şartlar altında sistem Lyapunov kararlıdır. Eğer enerji benzeri fonksiyonun türevi negatif kesin tanımlıysa, yani sadece denge noktasında “0” değerini alıyor ve diğer tüm noktalarda negatif değer alıyorsa o zaman sistem Lyapunov asimptotik kararlıdır [95-96].

Eğer düşüş referans değerleri yüksüz duruma göre verilirse Eş. 2.116-2.120 arası denklemler elde edilir.

$$\Delta P = P - 0 = P \quad (2.117)$$

$$\Delta Q = Q - 0 = Q \quad (2.118)$$

$$\delta_r = \delta_0 - k_p P \quad (2.119)$$

$$U_r = U_0 - k_q Q \quad (2.120)$$

Burada hata değişkenleri sistemin denge noktası olması gerektiği için durumlar hatalara göre Eş. 2.121-2.122'deki gibi elde edilir.

$$x_1 = e_\delta(t) = \delta_r - \delta \quad (2.121)$$

$$x_2 = e_U(t) = U_r - U_1 \quad (2.122)$$

Güç paylaşımı denklemleri de daha önce yaklaşık olarak Eş. 2.123-2.124'teki gibi verilmiştir.

$$P = \delta \frac{U_1 U_2}{X} \quad (2.123)$$

$$Q = \frac{U_1 U_2}{X} - \frac{U_2^2}{X} \quad (2.124)$$

δ_0 nominal açı değeri 0° olarak belirlenebilir. Bu yüksüz durumda evirici çıkış açı değerinin 0° olduğu anlamına gelir. Böylece ϕ evirici açısı ile δ fark açısı eşit olacaktır. Yine kontrolcünün ikinci çıkış parametresi olan m modülasyon indeksi aslında şebeke besleyen eviricinin modülasyon indeksidir (m_2). Evirici çıkış gerilimi ve modülasyon indeksi arasındaki kararlı durum ilişkisi de Eş. 2.125'teki gibidir.

$$V_{i2} = U_1 = m_2 \frac{V_{DA}}{\sqrt{2}} \quad (2.125)$$

Düşüş referansı ve N-PI kontrol denklemlerinin son hali de Eş. 2.126-2.129'daki gibi olacaktır.

$$\delta_r = -k_p P \quad (2.126)$$

$$U_r = U_0 - k_q Q \quad (2.127)$$

$$\delta = K_{p1}|x_1|x_1 + K_{i1} \int |x_1|x_1 dt \quad (2.128)$$

$$U_1 = \left(K_{p2}|x_2|x_2 + K_{i2} \int |x_2|x_2 dt \right) \frac{V_{DA}}{\sqrt{2}} \quad (2.129)$$

Böylece Eş. 2.121, Eş. 2.123, Eş. 2.126, Eş. 2.128 ve Eş. 2.122, Eş. 2.124, Eş. 2.127, Eş. 2.129 birleştirilirse Eş. 2.130-2.131 elde edilir.

$$\begin{aligned} x_1 = & -k_p \left(\frac{U_1 U_2}{X} \right) \left(K_{p1}|x_1|x_1 + K_{i1} \int |x_1|x_1 dt \right) \\ & - \left(K_{p1}|x_1|x_1 + K_{i1} \int |x_1|x_1 dt \right) \end{aligned} \quad (2.130)$$

$$x_2 = U_0 - k_q \left(\left(K_{p2}|x_2|x_2 + K_{i2} \int |x_2|x_2 dt \right) \frac{V_{DA}}{\sqrt{2}} \frac{U_2}{X} - \frac{U_2^2}{X} \right) - \left(\left(K_{p2}|x_2|x_2 + K_{i2} \int |x_2|x_2 dt \right) \frac{V_{DA}}{\sqrt{2}} \right) \quad (2.131)$$

Eş. 2.130-2.131 ifadelerinin türevleri alınırsa integral ifadeleri elenir ve sistemin hataya bağlı durum denklemleri elde edilir. Newton notasyonu ile ifade edilen denklemler Eş. 2.132-2.133'te verilmiştir. Eş. 2.132 denkleminde sadece açışi değişimi olduğu için U_1 evirici gerilimi sabittir. Başka bir değışiklik olmadığı için U_2 bara gerilimi de Eş. 2.132-2.133 denklemlerinde sabit kabul edilmiştir.

$$\dot{x}_1 = -k_p \left(\frac{U_1 U_2}{X} \right) (K_{p1} 2|x_1|\dot{x}_1 + K_{i1}|x_1|x_1) - (K_{p1} 2|x_1|\dot{x}_1 + K_{i1}|x_1|x_1) \quad (2.132)$$

$$\dot{x}_2 = 0 - k_q \left(\frac{V_{DA}}{\sqrt{2}} \frac{U_2}{X} (K_{p2} 2|x_2|\dot{x}_2 + K_{i2}|x_2|x_2) - 0 \right) - (K_{p2} 2|x_2|\dot{x}_2 + K_{i2}|x_2|x_2) \frac{V_{DA}}{\sqrt{2}} \quad (2.133)$$

Denklemler Eş. 2.134-2.135 ile düzenlenip $\dot{x}_1$ ve $\dot{x}_2$ durum denklemleri oluşturulursa Eş. 2.136-2.137 elde edilir.

$$\dot{x}_1 = - \left(k_p \frac{U_1 U_2}{X} + 1 \right) K_{p1} 2|x_1|\dot{x}_1 - \left(k_p \frac{U_1 U_2}{X} + 1 \right) K_{i1}|x_1|x_1 \quad (2.134)$$

$$\dot{x}_2 = - \left(k_q \frac{U_2}{X} + 1 \right) \frac{V_{DA}}{\sqrt{2}} K_{p2} 2|x_2|\dot{x}_2 - \left(k_q \frac{U_2}{X} + 1 \right) \frac{V_{DA}}{\sqrt{2}} K_{i2}|x_2|x_2 \quad (2.135)$$

$$\dot{x}_1 = \frac{- \left(k_p \frac{U_1 U_2}{X} + 1 \right) K_{i1}|x_1|x_1}{\left(k_p \frac{U_1 U_2}{X} + 1 \right) K_{p1} 2|x_1| + 1} \quad (2.136)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{- \left(k_q \frac{U_2}{X} + 1 \right) \frac{V_{DA}}{\sqrt{2}} K_{i2}|x_2|x_2}{\left(k_q \frac{U_2}{X} + 1 \right) \frac{V_{DA}}{\sqrt{2}} K_{p2} 2|x_2| + 1} \quad (2.137)$$

Eş. 2.136-2.137 kontrol sistemi doğrusal olmayan durum denklemlerini ifade eder ve $x_1 = 0$ ve $x_2 = 0$ için $\dot{x}_1 = 0$ ve $\dot{x}_2 = 0$ olduğu yani denge noktasının orijin olduğu

anlaşılmaktadır. Bu tip sistemler için genellikle kullanılan enerji benzeri bir fonksiyon olan ve pozitif kesin tanımlı şartını sağlayan denklem Eş. 2.138'de verilmiştir.

$$V(x) = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}x_2^2 \quad (2.138)$$

Bu fonksiyonun türevi de Eş. 2.139'da verilmiştir. Eş. 2.136-2.137'deki denklemler Eş. 2.138'de yerine konulursa Eş. 2.140 ve düzenlenirse Eş. 2.141 denklemleri elde edilir.

$$\dot{V}(x) = x_1\dot{x}_1 + x_2\dot{x}_2 \quad (2.139)$$

$$\dot{V}(x) = \frac{-\left(k_p \frac{U_1 U_2}{X} + 1\right) K_{i1} |x_1| x_1}{\left(k_p \frac{U_1 U_2}{X} + 1\right) K_{p1} 2|x_1| + 1} x_1 + \frac{-\left(k_q \frac{U_2}{X} + 1\right) \frac{V_{DA}}{\sqrt{2}} K_{i2} |x_2| x_2}{\left(k_q \frac{U_2}{X} + 1\right) \frac{V_{DA}}{\sqrt{2}} K_{p2} 2|x_2| + 1} x_2 \quad (2.140)$$

$$\dot{V}(x) = \frac{-\left(k_p \frac{U_1 U_2}{X} + 1\right) K_{i1} |x_1| x_1^2}{\left(k_p \frac{U_1 U_2}{X} + 1\right) K_{p1} 2|x_1| + 1} + \frac{-\left(k_q \frac{U_2}{X} + 1\right) \frac{V_{DA}}{\sqrt{2}} K_{i2} |x_2| x_2^2}{\left(k_q \frac{U_2}{X} + 1\right) \frac{V_{DA}}{\sqrt{2}} K_{p2} 2|x_2| + 1} \quad (2.141)$$

Eş. 2.141'den $\dot{V}(x)$ fonksiyonunun negatif kesin tanımlı olduğu ve Lyapunov asimptotik kararlı olduğu anlaşılmaktadır.

3. ZEKİ ALGORİTMALAR

Literatürde birçok zeki algoritma mevcut olmasına karşın bu çalışmada en yeni algoritmalarından beş tanesi değerlendirilmiştir. Yapılan testlerde INFO algoritması daha başarılı olduğu için INFO algoritmasının detaylı anlatımının yanı sıra FOX, NOA, CDO ve WSO algoritmalarının da ilham kaynakları, geliştirilme motivasyonları ve algoritmaların performansını etkileyen kontrol parametrelerinin kısa özetleri, alt bölümlerde verilmiş olup ayrıca Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. INFO, FOX, NOA, CDO ve WSO algoritmalarının kısa özeti

Algoritma	İlham	Motivasyon	Kontrol Parametresi	Değer
INFO	Popülasyon tabanlı	Vektörlerin ağırlıklı ortalamasına ve dalga fonksiyonuna dayanır.	c d	2 4
FOX	Karda avlanan kırmızı tilkiler	Algoritma, tilkilerin avlarını arama ve avlama tekniklerine dayanmaktadır.	c_1 c_2	0,18 0,81
NOA	Fındıkkıran kuşu	Fındıkkıran kuşlarının çam tohumlarını arama, depolama ve geri alma davranışlarından esinlenmiştir.	P_{a1} P_{a2} δ	0,2 0,4 0,05
CDO	Çernobil felaketi	Algoritma nükleer reaktör çekirdeği patlamasından ilham almaktadır.	-	-
WSO	Savaş stratejisi	Algoritma eski savaşlarda, savaş sırasında ordu birliklerinin stratejik hareketlerine dayanmaktadır.	ρ_r	0,5

3.1. FOX Algoritması

Hardi ve arkadaşları tarafından 2022 yılında FOX adında doğadan ilham alan bir optimizasyon algoritması önerilmiştir. Bu algoritma, karda avlanan kırmızı tilkilerin davranışını taklit etmektedir. Algoritma, tilkilerin avlarını arama ve avlama tekniklerine dayanmaktadır. Makalenin ana amacı, yerel optimumlara takılma problemi, keşif ve sömürü fazları arasında uygun bir denge sağlama problemi üzerine odaklanmaktadır. Bu nedenle, önerilen FOX algoritması, bu fazları daha iyi dengelemek için bir koşul ifadesi kullanmaktadır. Ayrıca, yerel optimumlardan kaçınmak için a olarak isimlendirilen

parametrenin azaltılması da algoritmanın bir özelliğidir. Avlanma sırasında tilkinin atlama yönünün belirlenmesi için iki parametre mevcuttur. Bunlar c_1 ve c_2 parametreleridir. Bu çalışmada bu değerler orijinal makaleden sırasıyla 0,18 ve 0,81 olarak alınmıştır. FOX algoritmasının sözde kodu Şekil 3.1’de verilmiştir [97].

```

Initialize the red fox population  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
while  $it < Maxit$ 
    Initialize  $Dist\_S\_T, SP\_S, Time\_S\_T, BestX, Dist\_Fox\_Prey, Jump, MinT, a, BestFitness$ .
    Calculate the fitness of each search agent
    Select  $BestX$  and  $BestFitness$  among the fox population ( $X$ ) in each iteration.
        if  $fitness_i > fitness_{i+1}$ 
             $BestFitness = fitness_{i+1}$ 
             $BestX = X(i, :)$ 
        endif

        if  $r \geq 0.5$ 
            if  $p > 0.18$ 
                Initialize time randomly;
                Calculate Distance_Sound_travels
                Calculate  $Sp\_S$ 
                Calculate distance from fox to prey
                 $T = Tt/2$ ;
                Calculate jump
                Find  $X_{it+1}$ 
            elseif  $p < 0.18$ 
                Initialize time randomly;
                Calculate Distance_Sound_travels
                Calculate  $Sp\_S$ 
                Calculate distance from fox to prey
                 $T = Tt/2$ ;
                Calculate jump
                Find  $X_{it+1}$ 
            endif
        else
            Find MinT
            Explore Find  $X_{it+1}$ 
        endif
        Check and amend the position if it goes beyond the limits
        Evaluate search agents by their fitness
        Update  $BestX$ 
         $it = it + 1$ 
    endwhile
    return  $BestX$  and  $BestFitness$ 

```

Şekil 3.1. FOX algoritmasının sözde kodu

3.2. NOA Algoritması

Abdel-Basset ve arkadaşları tarafından 2023 yılında, findıkkıran optimizasyon algoritması, NOA, adlı yeni bir doğa ilhamlı meta-sezgisel algoritma sunulmuştur. NOA, findıkkıran kuşlarının çam tohumlarını arama, depolama ve geri alma davranışlarından esinlenmiştir. NOA, bu davranışları iki ana strateji olarak modeller: yemek arama ve depolama stratejisi

ile depo arama ve geri alma stratejisi. Bu stratejiler, NOA'nın hem küresel hem de yerel arama yeteneklerine sahip olmasını sağlar. NOA algoritmasının üç ana etkili kontrol parametresi olduğu belirtilmektedir. Bu parametreler, P_{a1} , P_{a2} ve δ olarak adlandırılır. P_{a1} , mevcut popülasyonun dışındaki bölgelerdeki mevcut çözümün güncellenme yüzdesini belirlemek için kullanılır. P_{a2} , önbellek arama aşaması ile kurtarma aşaması arasında değişim olasılığını belirlemek için kullanılır. δ , optimizasyon problemi üst ve alt sınırı içindeki mevcut boyutun güncellenip güncellenmeyeceğini belirlemek için kullanılır. Bu parametreler orijinal makaledeki gibi sırasıyla 0,2, 0,4 ve 0,05 olarak belirlenmiştir. NOA algoritmasının sözde kodu Şekil 3.2'de verilmiştir [98].

```

Input: population size  $N$ , the lower limits of variables  $\bar{L}$ , the upper limits of variables  $\bar{U}$ 
the current number of iteration  $t=0$ , and the maximum number of iterations  $T_{max}$ ;
Output: the best solution found
Initialize  $N$  nutcracker/solution
Evaluate each  $X_i$  and find the one with the best fitness in the population
 $t=1$ ; //the current function evaluation//
while ( $t < T_{max}$ )
    Generate random numbers  $\sigma$  and  $\sigma_1$  between 0 and 1.
    if  $\sigma < \sigma_1$  //Foraging and storage strategy//
         $\phi$  is a random number between 0 and 1.
        for  $i=1:N$ 
            for  $j=1:d$ 
                if  $\phi > P_{a1}$  /*Exploration phase1*/
                    Updating  $\bar{X}_i^{t+1}$ 
                else /*Exploitation phase1*/
                    Updating  $\bar{X}_i^{t+1}$ 
                endif
            endfor
            Update the current iteration  $t$  by  $t=t+1$ 
        endfor
    else //Cache-search and recovery strategy//
        Generate RP matrix
        Generate a random number  $\phi$  between 0 and 1.
        for  $I=1:N$ 
            if  $\phi > P_{a2}$  /*Exploration phase2*/
                Updating  $\bar{X}_I^{t+1}$ 
            else /*Exploitation phase2*/
                Updating  $\bar{X}_I^{t+1}$ 
            endif
             $t = t + 1$ 
        endfor
    endif
endwhile

```

Şekil 3.2. NOA algoritmasının sözde kodu

3.3. CDO Algoritması

2023 yılında Hisham ve arkadaşları tarafından yayınlanan, CDO Çernobil felaketi optimizasyon algoritması, küresel optimizasyon için yeni bir meta-sezgisel yöntemdir. Algoritma nükleer reaktör çekirdeği patlamasından ilham alan bir meta-sezgisel algoritmadır. CDO, çekirdekten yayılan üç tür radyasyonu (alfa, beta ve gama parçacıkları) taklit ederek, arama alanındaki en iyi çözüme ulaşmak için insanlar olarak metaforize edilen parçacıklara saldırır. Bu parçacıklar ortamda farklı hızlarda aktarılır. Önerilen algoritma, yerel minimumlardan kolayca kaçarak, arama uzayının herhangi bir alanını iyi bir verimlilik ve hızla keşfetme ve arama yeteneğine sahip olmaktadır. Bu parçacık hızları ise rasgele olarak belirlenir. CDO algoritmasının sözde kodu Şekil 3.3'te verilmiştir [99].

```

Begin

Step 1: Initialize the particles  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ )
Step 2: while (the end iteration is not achieved) do
Step 3: For all particles  $\alpha, \beta, \gamma$ , calculated the fitness.

    if fitness < gammaScore
        gammaScore  $\leftarrow$  fitness
        update position of gamma particle
    endif

    if fitness < betaScore
        betaScore  $\leftarrow$  fitness
        update position of beta particle
    endif

    if fitness < alphaScore
        alphaScore  $\leftarrow$  fitness
        update position of alpha particle
    endif

Step 4: For all particles  $\alpha, \beta, \gamma$ , update position on the Cartesian plan(x, y)
        Calculate gradient descent factor of gamma particle ( $\gamma$ )
        Calculate gradient descent factor of beta particle ( $\beta$ )
        Calculate gradient descent factor of alpha particle ( $\alpha$ )
Step 5: Update average of total positions

End

```

Şekil 3.3. CDO algoritmasının sözde kodu

3.4. WSO Algoritması

2022 yılında Ayyarao ve arkadaşları, antik savaş stratejilerine dayanan yeni bir meta-sezgisel optimizasyon algoritması önermektedir. Önerilen WSO algoritması, savaş stratejisi optimizasyonu adını taşımakta olup, savaş sırasında ordu birliklerinin stratejik hareketlerine dayanmaktadır. Her asker, Kral ve komutanın konumlarına göre konumunu sürekli olarak günceller. Bu savaş stratejisi, her askerin dinamik olarak optimum değere doğru hareket ettiği bir optimizasyon süreci olarak modellenmiştir. Her askere bir rütbe ve ağırlık verilir. Askerin ağırlığı, saldırı gücünü veya kondisyon değerini artırmadaki başarısına göre güncellenir. Önerilen algoritma, saldırı ve savunma stratejileri olmak üzere iki popüler savaş stratejisini modellemektedir. Askerlerin savaş alanındaki konumları, uygulanan stratejiye göre güncellenmektedir. Algoritmanın yakınsamasını ve sağlamlığını artırmak için yeni bir ağırlık güncelleme mekanizması ve zayıf askerler için bir yer değiştirme stratejisi bulunmaktadır. Önerilen savaş stratejisi algoritması, keşif ve kullanım aşamaları arasında iyi bir denge sağlayarak, yakınsama ve sağlamlığa katkıda bulunmaktadır. Burada kullanılan ρ_r parametresi orijinal makaledeki gibi 0,5 olarak alınmıştır. WSO algoritmasının sözde kodu Şekil 3.4'te verilmiştir [100].

```

Initialize the soldier size, dimension of the war space (dimension of the problem),
lower and upper bounds of the search space, Positions of the King (K), Army Commander (C),
Attack force of the King and the Army Commander, soldier size (S) are follows:
(S) = 30; C = zeros(1,dim); K = zeros(1,dim); Max – iterations = 1000;  $\rho_r = 0.5$ 
Initialize the parameters; R = zeros(1, soldier size); W = 2 × ones(1, soldier size)
Randomly and uniformly distribute the soldiers in the war space (Random attack)
for 1:soldier_size
    Obtain the attack force for each soldier
endfor
Sort the fitness (attack force) of all soldiers
Select the soldier with best fitness as King and the second-best attack force as a commander
while t < Tmax (Max-iteration)
    for 1:soldier_size
         $\rho = rand$ 
        if  $\rho < \rho_r$  percentage signal given to follow the strategy
            Update the position of each soldier (Exploration)
        else
            Update the position of each soldier (Exploitation)
        endif
        Calculate the attack force each soldier
        Sort the fitness of each soldier
        Update the position of every soldier based on the attack of current and previous positions
        Update the rank and weight of each soldier based on the success
    endfor
    Identify the weak soldier with worst fitness
    Relocate the weak soldier choosing a suitable relocation option
    Update the position of King and Commander
    t=t+1
endwhile
Display the attack force and position of the King

```

Şekil 3.4. WSO algoritmasının sözde kodu

3.5. INFO Algoritması

INFO algoritması popülasyon tabanlı bir algoritmadır ve bu algoritma ağırlıklı ortalama yaklaşımına dayalı olarak geliştirilmiştir. Ağırlıklı ortalama denklemi Eş. 3.1’de verilmiştir. Pozisyonların ağırlıkları ise Eş. 3.2’de verilen dalga fonksiyonuna dayanmaktadır.

$$WM = \left(\sum_{i=1}^N x_i \times w_i \right) / \left(\sum_{i=1}^N w_i \right) \quad (3.1)$$

$$w = \cos(x) \times \exp\left(-\frac{x^2}{\omega}\right) \quad (3.2)$$

Başlatma aşamasında kontrol parametreleri ve girişler tanımlanır. Bu aşamada rastgele üretim yoluyla başlangıç popülasyonu elde edilir (Eş. 3.3) ve probleme, çözüm arama süreci başlatılır.

$$X_{l,j}^t = \{X_{l,1}^t, X_{l,2}^t, \dots, X_{l,D}^t\} \quad l = 1, 2, 3, \dots, N_{INFO} \quad (3.3)$$

Buradaki D problemin boyutu ve N_{INFO} popülasyon sayısıdır. INFO'nun çözüm arama sürecinde üç güncelleme operatörü kullanılır: güncelleme kuralı, vektör birleştirme ve yerel arama. Güncelleme kuralı operatörü, popülasyon çeşitliliğini artırmayı ve yakınsamayı hızlandırmayı amaçlamaktadır. Bu operatörün ilk aşamasında bir dizi vektörün ağırlıklı ortalaması hesaplanır. Rastgele çözümle başlayan sürecin işleyişinde, bir önceki adımdan hesaplanan ağırlıklı ortalama bilgisi kullanılarak bir adımdan diğerine geçiş için ortalama kuralı elde edilir. Ağırlıklar ise dalga fonksiyonuna dayalı en iyi çözüm, en kötü çözüm, daha iyi çözüm verileriyle hesaplanır. Eş. 3.4-3.16 arasında bu aşamalara ait denklemler verilmiştir. Burada r rastgele üretilmiş bir sayıdır.

$$MeanRule = r \times WM1_l^t + (1 - r) \times WM2_l^t \quad (3.4)$$

$$WM1_l^t = \delta \left[\frac{(w_1(x_{a1} - x_{a2}) + w_2(x_{a1} - x_{a3}) + w_3(x_{a2} - x_{a3}))}{(w_1 + w_2 + w_3 + \varepsilon)} \right] + (\varepsilon \times r) \quad (3.5)$$

$$w_1 = \cos((f(x_{a1}) - f(x_{a2})) + \pi) \times \exp(-|(f(x_{a1}) - f(x_{a2}))/\omega|) \quad (3.6)$$

$$w_2 = \cos((f(x_{a1}) - f(x_{a3})) + \pi) \times \exp(-|(f(x_{a1}) - f(x_{a3}))/\omega|) \quad (3.7)$$

$$w_3 = \cos((f(x_{a2}) - f(x_{a3})) + \pi) \times \exp(-|(f(x_{a2}) - f(x_{a3}))/\omega|) \quad (3.8)$$

$$\omega = \max(f(x_{a1}), f(x_{a2}), f(x_{a3})) \quad (3.9)$$

$$WM2_l^t = \delta \left[\frac{(w_1(x_{bs} - x_{bt}) + w_2(x_{bs} - x_{ws}) + w_3(x_{bt} - x_{ws}))}{(w_1 + w_2 + w_3 + \varepsilon)} \right] + (\varepsilon \times r) \quad (3.10)$$

$$w_1 = \cos((f(x_{bs}) - f(x_{bt})) + \pi) \times \exp(-|(f(x_{bs}) - f(x_{bt}))/\omega|) \quad (3.11)$$

$$w_2 = \cos((f(x_{bs}) - f(x_{ws})) + \pi) \times \exp(-|(f(x_{bs}) - f(x_{ws}))/\omega|) \quad (3.12)$$

$$w_3 = \cos((f(x_{bt}) - f(x_{ws})) + \pi) \times \exp(-|(f(x_{bt}) - f(x_{ws}))/\omega|) \quad (3.13)$$

$$\omega = f(x_{ws}) \quad (3.14)$$

$$\delta = 2 \times \beta \times r - \beta \quad (3.15)$$

$$\beta = \alpha = 2 \times \exp\left(-4 \times \frac{t}{T_{INFO}}\right) \quad (3.16)$$

Bu operatörün ikinci aşaması, optimum sonuca ulaşmayı ve yakınsamayı hızlandırmayı amaçlamaktadır. Bu, üretilen her nesilde adım boyutu çeşitlendirilerek elde edilir. Eş. 3.17’de bu çeşitlendirme verilmiştir. Bu fonksiyonun ortalama kuralı ile birleştirilmesiyle Eş. 3.18’deki vektör elde edilir. Burada r , 0 ile 1 arasında rastgele üretilen bir sayıdır. Amacı her nesilde farklı adım aralığı oluşturmaktır.

$$CA = \begin{cases} r \times \left(\frac{x_{bs} - x_{a1}^t}{f(x_{bs}) - f(x_{a1}^t) + 1} \right) \\ r \times \left(\frac{x_{a2}^t - x_{a3}^t}{f(x_{a2}^t) - f(x_{a3}^t) + 1} \right) \\ r \times \left(\frac{x_{a1}^t - x_{a2}^t}{f(x_{a1}^t) - f(x_{a2}^t) + 1} \right) \end{cases} \quad (3.17)$$

$$z_l^t = x_l^t + \sigma \times MeanRule + CA \quad (3.18)$$

Güncelleme kuralının oluşmasıyla bu aşama tamamlanır. Bu kural küresel aramayı sağlayan kuraldır. Rastgele üretilen sayının (r) değerine göre seçilen iki farklı kuraldan oluşmuştur. Bu kural dizisi Eş. 3.19-3.21’de verilmiştir.

$$Rule_{ur} = \begin{cases} z1_l^t = x_l^t + \sigma \times MeanRule + r \left(\frac{x_{bs} - x_{a1}^t}{f(x_{bs}) - f(x_{a1}^t) + 1} \right) & r < 0,5 \\ z2_l^t = x_{bs} + \sigma \times MeanRule + r \left(\frac{x_{a1}^t - x_b^t}{f(x_{a1}^t) - f(x_{a2}^t) + 1} \right) & r < 0,5 \\ z1_l^t = x_a^t + \sigma \times MeanRule + r \left(\frac{x_{a2}^t - x_{a3}^t}{f(x_{a2}^t) - f(x_{a3}^t) + 1} \right) & r \geq 0,5 \\ z2_l^t = x_{bt} + \sigma \times MeanRule + r \left(\frac{x_{a1}^t - x_{a2}^t}{f(x_{a1}^t) - f(x_{a2}^t) + 1} \right) & r \geq 0,5 \end{cases} \quad (3.19)$$

$$\sigma = 2 \times \alpha \times rand - \alpha \quad (3.20)$$

$$\alpha = c \times \exp\left(-d \times \frac{t}{T_{INFO}}\right) \quad (3.21)$$

Vektör birleştirme operatörü, güncelleme kuralı operatörüne benzer şekilde popülasyon çeşitliliğini arttırmayı amaçlamaktadır. Ayrıca bu güncelleme operatörü yerel arama üzerinde çalışır ve yerel aramayı geliştirir. Eş. 3.22’de vektör birleştirme denklemi verilmiştir. Burada iki adet rastgele üretilen sayıya göre (r_1, r_2) kural belirlenir.

$$Rule_{vc} = \begin{cases} u_l^t = z1_l^t + \mu \cdot |z1_l^t - z2_l^t| & r_2 < 0,5 \\ u_l^t = z2_l^t + \mu \cdot |z1_l^t - z2_l^t| & r_2 \geq 0,5 \\ u_l^t = x_l^t & \end{cases} \quad \begin{matrix} r_1 < 0,5 \\ r_1 \geq 0,5 \end{matrix} \quad (3.22)$$

$$\mu = 0,05 \times r \quad (3.23)$$

INFO algoritmasının son güncelleme operatörü olan yerel arama, en iyi çözüme ulaşmayı amaçlamaktadır. Bu güncelleme kuralı, küresel optimuma ulaşmak için yerel bir arama gerçekleştirmek için kullanılır. INFO algoritmasının çözüm arama süreci, sonlandırma kriteri sağlanana kadar devam eder. Kuralın güncellenmesi aşaması keşif ve kullanım arasındaki dengeye odaklanır. Vektör birleştirme aşaması keşfetmeyi dikkate alır ve yerel arama aşaması faydalanmayı önemser. Kurala ait denklemler Eş. 3.23-3.28 arasında verilmiştir.

$$Rule_{ls} = \begin{cases} u_l^t = x_{bs} + r(MeanRule + r(x_{bs}^t - x_{a1}^t)) & r_2 < 0,5 \\ u_l^t = x_{rnd} + r(MeanRule + r(v_1 x_{bs} - v_2 x_{rnd})) & r_2 \geq 0,5 \end{cases} \quad \begin{matrix} r_1 < 0,5 \\ r_1 \geq 0,5 \end{matrix} \quad (3.24)$$

$$x_{rnd} = \phi \times x_{avg} + (1 - \phi) \times (\phi \times x_{bt} + (1 - \phi) \times x_{bs}) \quad (3.25)$$

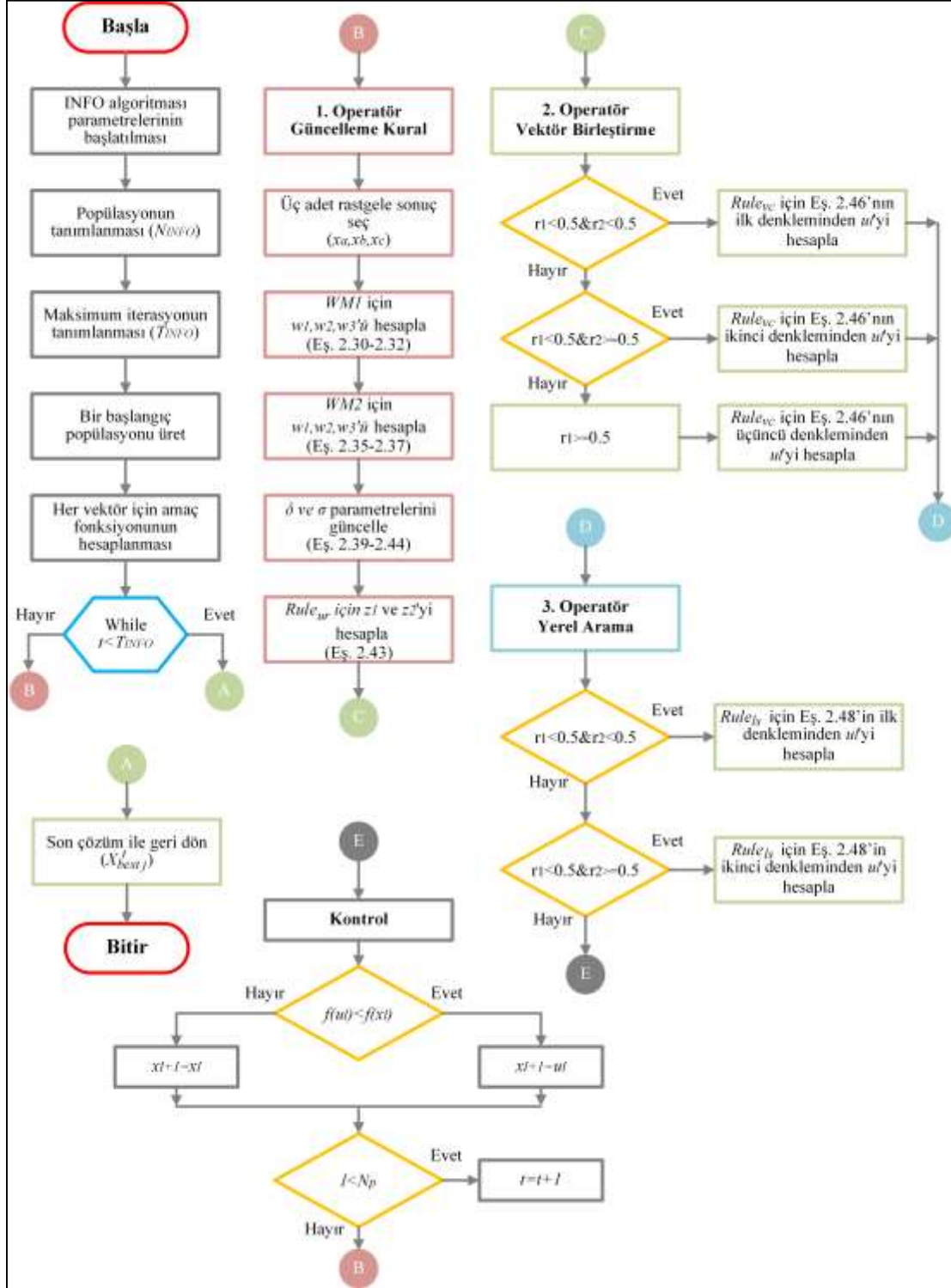
$$x_{avg} = (x_a + x_b + x_3)/3 \quad (3.26)$$

$$v_1 = \begin{cases} 2 \times r & p > 0,5 \\ 1 & p \leq 0,5 \end{cases} \quad (3.27)$$

$$v_2 = \begin{cases} r & p < 0,5 \\ 1 & p \geq 0,5 \end{cases} \quad (3.28)$$

Burada p yine 0 ile 1 arasında rastgele üretilmiş bir sayıdır. INFO algoritmasının iki kontrol parametresi vardır: c ve d . Bu çalışmada bu parametreler orijinal makalede verilen

orijinal değerlerle aynı şekilde sırasıyla 2 ve 4 olarak alınmıştır [66,101]. Algoritmanın tüm aşamalarını içeren akış diyagramı Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. INFO algoritmasının akış diyagramı

3.6. Algoritmaların Karşılaştırılması ve DA Bara Kontrol Parametrelerinin Bulunması

Zeki algoritmaların çalışabilmesi için bir amaç fonksiyonuna ihtiyaç vardır. Amaç fonksiyonu algoritmanın minimize etmeye çalıştığı bir fonksiyondur. Bunun için literatürde kullanılan integral kare hata (ISE), integral mutlak hata (IAE), zaman ağırlıklı kare hatanın integrali (ITSE) ve zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali (ITAE) gibi fonksiyonlar kullanılmaktadır. Eş. 3.29-3.32 arasında görülen bu fonksiyonlar hataya bağlı integral fonksiyonlarıdır [102]. Buradaki amaç algoritmaların hata büyüklüklerini kıyaslamak olduğu için hangisinin kullanıldığının bir önemi yoktur. Çünkü fonksiyonlar hataya bağlı oldukları ve algoritmaların iterasyonlar sonucunda elde edilen hata çıktıları da sabit olduğu için algoritma performans sıralamaları değişmemektedir. Bu nedenle bu çalışmada ITAE fonksiyonu seçilmiştir.

$$ISE = \int_0^t e(t)^2 dt \quad (3.29)$$

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (3.30)$$

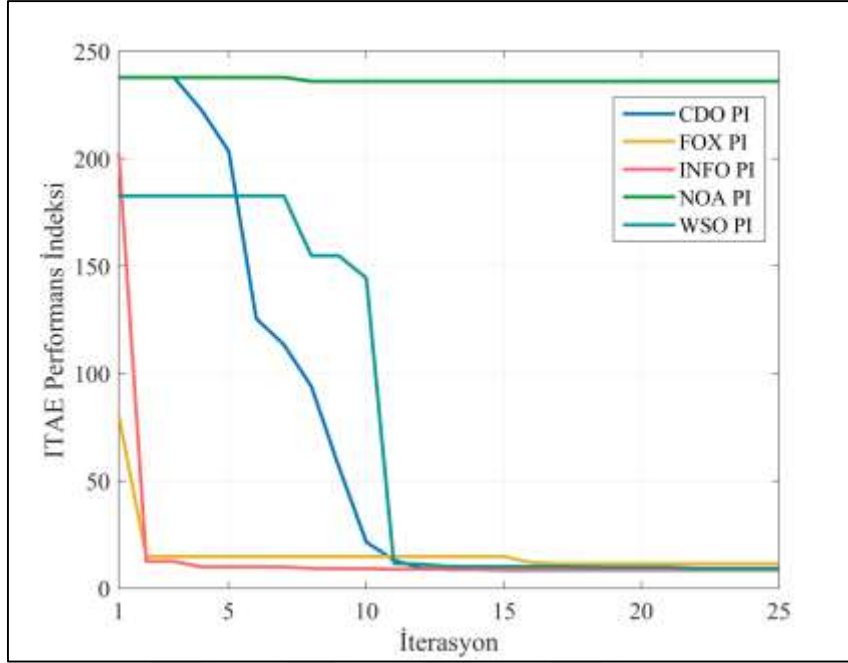
$$ITSE = \int_0^t t(e(t)^2) dt \quad (3.31)$$

$$ITAE = \int_0^t t|e(t)| dt \quad (3.32)$$

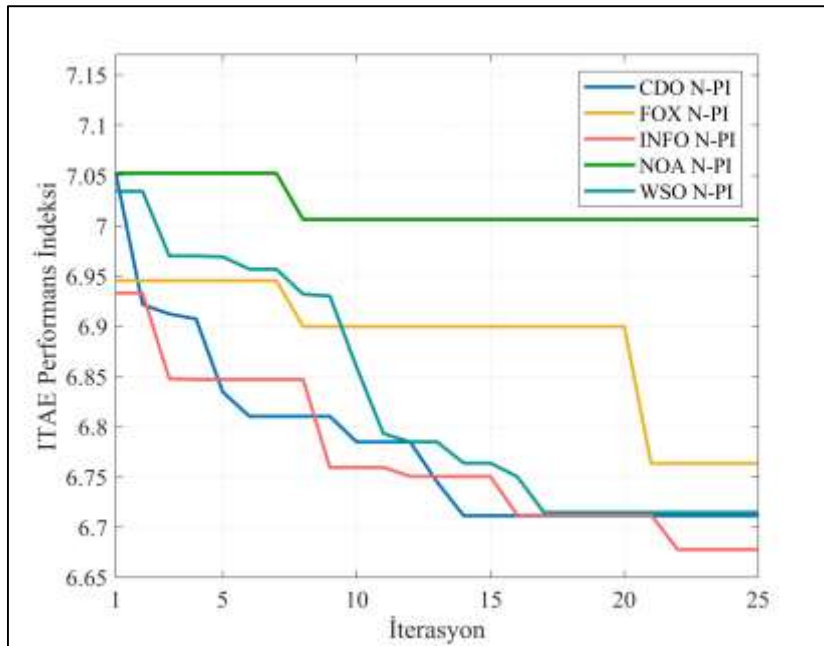
Parametre optimizasyonu sağlanırken dikkat edilmesi gereken nokta $e(t)$ fonksiyonudur. Optimizasyon için bu fonksiyon iyi seçilmelidir. PI ve N-PI kontrol için verilen $e(t) = V_{mpp} - V_1$ fonksiyonu bir yaklaşım fonksiyonudur. Bu nedenle anlık olarak gerçek hata değerine karşılık gelmeyebilir. Bu yüzden optimizasyon sağlanırken, sisteme daha önceden belirlenmiş, bilinen hata referansları uygulanarak optimizasyon sağlanmalıdır.

INFO, FOX, NOA, CDO ve WSO algoritmaları 25 ajan ve 25 iterasyon ile sisteme uygulanmıştır. Bu sayılar sistemlere göre değişkenlik gösterebilir ve bu değerleri belirlemenin matematiksel bir yolu yoktur. Bu değerler yapılan denemeler sonucunda, karşılaştırılabilir performans çıktıları sağladığı gözlenerek seçilmiştir. İterasyon numarasına göre optimizasyon performansını gösteren grafikler Şekil 3.6-3.7'de verilmiştir. Grafiklerden INFO algoritmasının PI ve N-PI için en iyi çözümleri bulduğu

anlaşılmaktadır. PI ve N-PI değerlendirildiğinde ise N-PI performanslarının PI performansından daha iyi olduğu görülmektedir. Elde edilen performans çıktıları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Ayrıca INFO algoritması ile elde edilen PI ve N-PI parametreleri Çizelge 3.3’te sunulmuştur.



Şekil 3.6. PI optimizasyonuna ait performans grafiği



Şekil 3.7. N-PI optimizasyonuna ait performans grafiği

Çizelge 3.2. INFO, FOX, NOA, CDO ve WSO algoritmalarının performans çıktıları

Algoritma	PI	N-PI
INFO	8,4150	6,6776
CDO	8,5075	6,7113
WSO	9,2900	6,7146
FOX	11,4708	6,7635
NOA	236,0200	7,0062

Çizelge 3.3. INFO algoritması ile elde edilen PI ve N-PI parametreleri

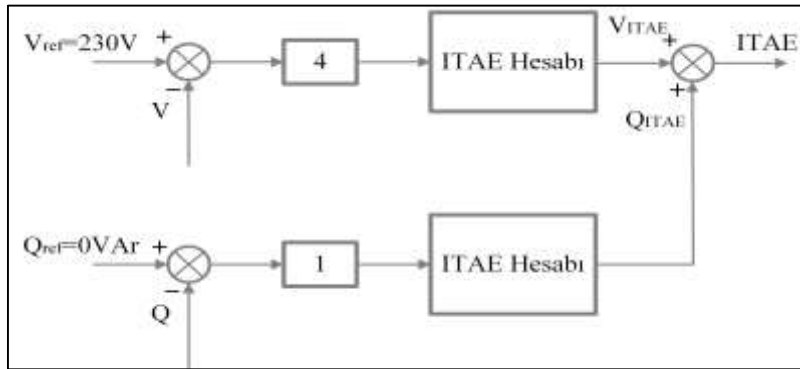
Kontrolcü	Kp	Ki
PI	0,0014	0,3232
N-PI	0,0016	0,1717

3.7. AA Bara Kontrol Parametrelerinin INFO Algoritması İle Bulunması

Daha önce Bölüm 3.5'te anlatılan INFO algoritması bu bölümde de N-PI parametrelerinin optimizasyonu için kullanılmıştır. Optimizasyonun gerçekleştirilebilmesi için bir amaç fonksiyonuna ihtiyaç vardır. Bu amaç fonksiyonu için bir önceki kısımda anlatılan performans kriterlerinden biri seçilebilir. Bu optimizasyon için amaç fonksiyonu olarak ITAE fonksiyonu kullanılmıştır (Bkz. Eş. 3.32).

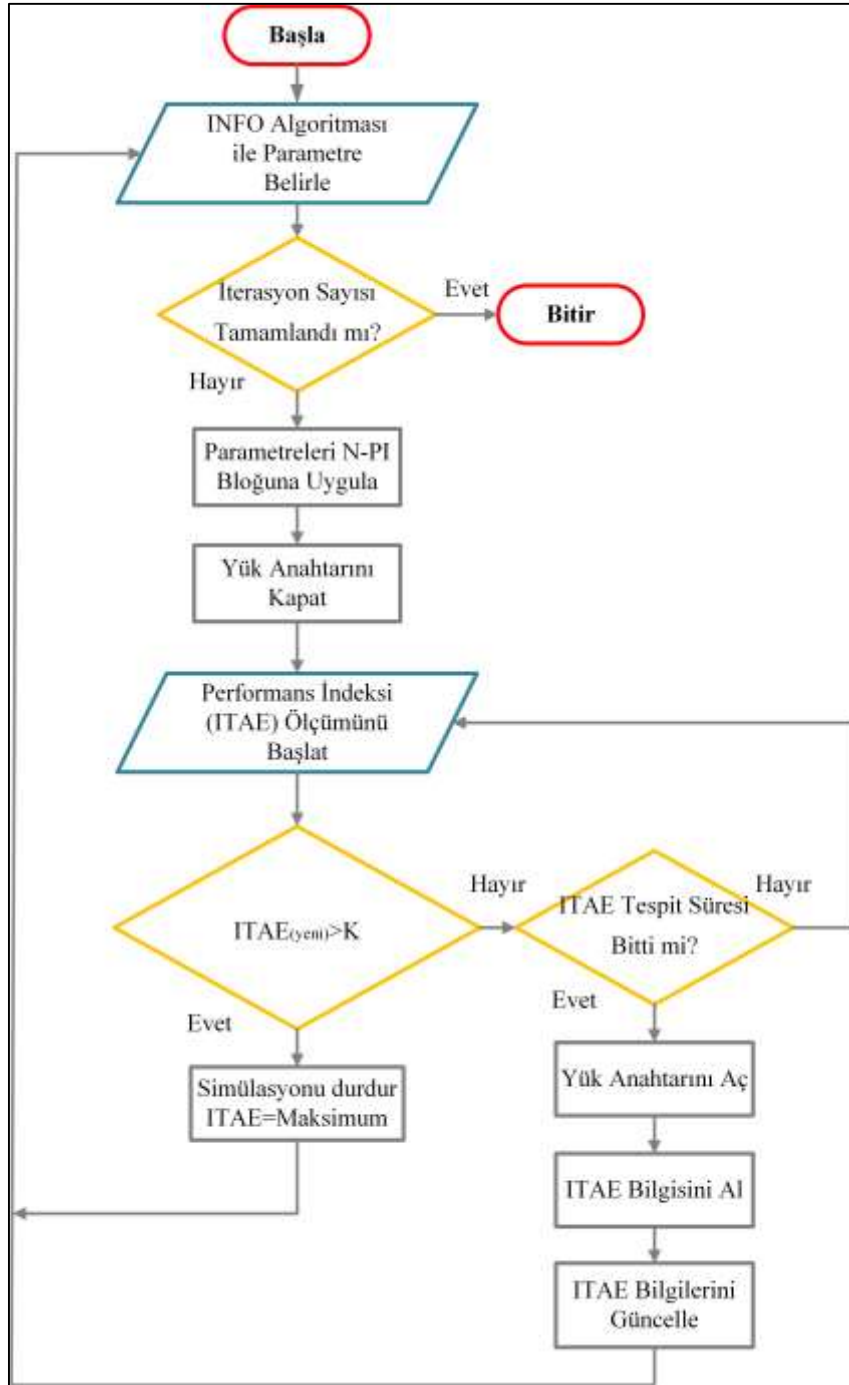
Algoritmanın sisteme uygulanması çözülmesi gereken problemlerden biridir. Çünkü sistemin daha önce bahsedildiği gibi iki çalışma durumu vardır. Bunlar senkronizasyon öncesi durum ve senkronizasyon durumudur. Sistemin kararlı çalışma durumu senkronizasyon durumu olduğu için parametre optimizasyonu bu durumda yapılmalıdır. Eğer gerekiyorsa senkronizasyon öncesi durum için de ayrı parametre çıkarımı yapılabilir. Bu çalışmanın temel odağı ikinci durumdur. Öncelikle algoritma otomatik olarak oluşturduğu değerleri kontrolcüye göndermektedir. Kontrolcü bir süre çalıştıktan sonra elde edilen ITAE değeri INFO algoritmasına amaç fonksiyonu çıktısı olarak gönderilmektedir. Daha sonra bu değere göre algoritma yeni değerler üretmektedir. Bu şekilde amaç fonksiyonu minimize edilmeye çalışılmaktadır. ITAE performans indeksi belirlenirken ilk önce AA bara gerilim değeri referans alınmıştır. Ancak gerilim değerinin çok iyi optimize edilmesine karşın reaktif güç salınımları kabul edilebilir oranda referansı takip edememiştir. Bu nedenle reaktif güç referansı da ITAE fonksiyonuna dâhil edilmiştir. Burada gerilim hatasının büyüklüğü daha düşük olduğu için performans çıktısında reaktif

güç daha baskın olmaktadır. Bu nedenle baskınlığı dengelemek için gerilim performansının ağırlığı arttırılmıştır. Ağırlık için kullanılan katsayı olarak 4 değeri yeterli dengeyi sağlamıştır. Ardından yük giriş-çıkışları anındaki ITAE performansları alınmıştır. Bu defa da senkronizasyon anı salınımları aşırı artmıştır. Çözüm olarak ITAE performansı senkronizasyon anına kadar genişletilmiş ve tüm bu durumları içine alan bir optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon için kullanılan ITAE performans indeksi blok şeması Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. ITAE performans indeksi blok şeması

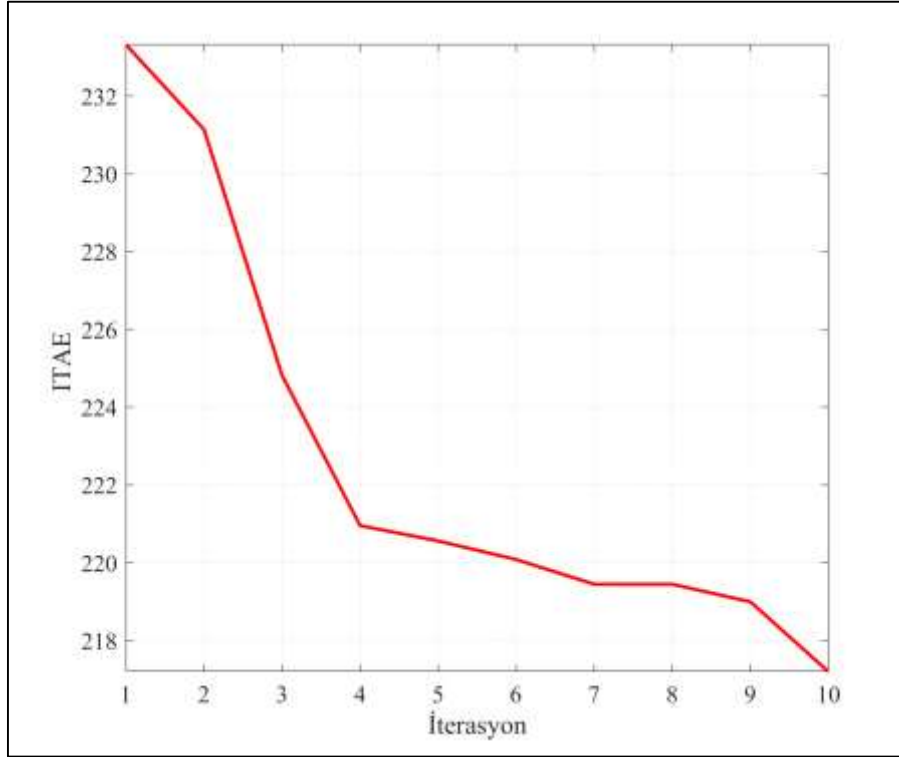
Burada sistemin her defasında baştan başlaması senkronizasyon sürecinin her döngüde tekrar gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Bu, optimizasyonun süresini olumsuz yönde etkiler. Bu problemi minimize etmek için algoritmanın çalışma prosesini gerçekleştiren yardımcı bir algoritma oluşturulmuştur. Bu algoritmanın akış diyagramı Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9. INFO algoritmasına eklenen yardımcı algoritma

Burada Şekil 3.9'dan da görüldüğü gibi senkronizasyon oluştuktan sonra sırasıyla, parametre uygulama, darbe uygulama, performans değeri alma aşamaları döngüleştirilmiştir. Sınırlandırma aşamaları için ise bir K parametresi belirlenmiş ve performans indeksi bu değeri aştığında simülasyon durdurulmuştur. Böylece uç bir test en kısa sürede tespit edilerek sonlandırılmaktadır. Bu çalışma optimizasyon süresini %17 oranında kısaltmıştır.

Optimizasyon 10 ajan ve 10 iterasyon ile çalıştırılmıştır. Optimizasyon sonunda elde edilen performans çıktıları Şekil 3.10'da verilmiştir. Elde edilen kontrol parametreleri de Çizelge 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.10. ITAE performans çıktıları

Çizelge 3.4. INFO algoritması ile elde edilen kontrol parametreleri

K_{p1}	0,00032
K_{i1}	0,01170
K_{p2}	1,73750
K_{i2}	42,06000

4. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Benzetim çalışmaları DA bara ve AA bara olarak iki bölüm şeklinde ele alınmıştır. DA barada darbe yüklenme analizi, maksimum güç noktası takibi, batarya şarj ve deşarj durumlarında DA bara gerilim dengesi araştırılmıştır. AA barada darbe yük analizi, rüzgâr hızı değişimi, aktif ve reaktif güç dengesi ve AA bara gerilim dengesi durumları araştırılmıştır.

4.1. DA Bara Analizi

DA bara benzetim çalışmaları için belirlenen parametreler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bu parametreler Eş. 2.12-2.16 ve Eş. 2.26-2.43 arasındaki DA bara hesaplamaları dikkate alınarak seçilmiştir.

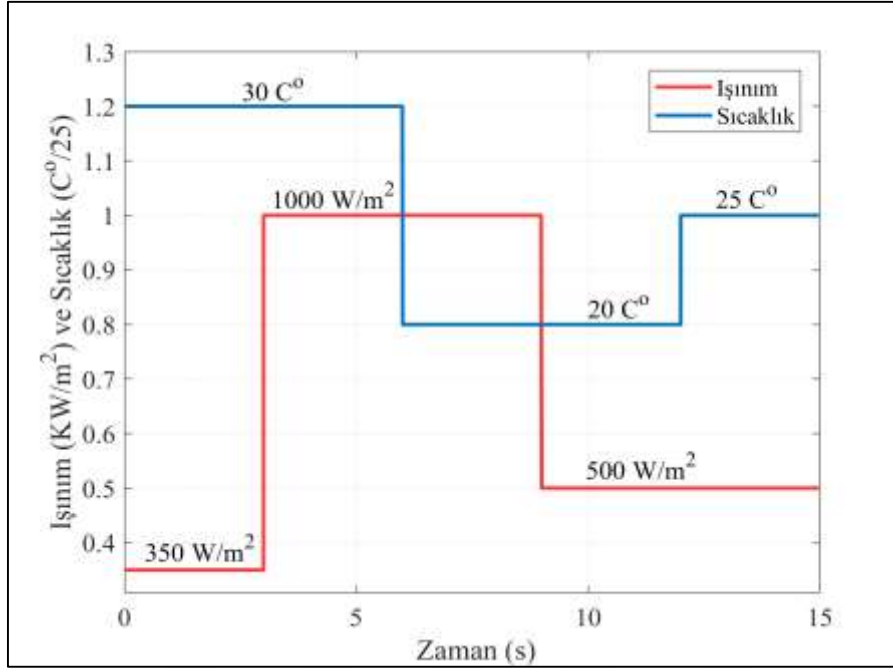
Çizelge 4.1. DA bara dönüştürücü parametreleri

Güneş Paneli Dönüştürücüsü	
Giriş Kapasitörü	100 uF
Bobin Direnci	0,1 Ω
Bobin İndüktansı	1,8 mH
Çıkış Kapasitörü	200 uF
Hat Direnci	1 Ω
Batarya Enerji Depolama Sistemi	
Giriş Kapasitörü	47 uF
Bobin Direnci	0,5 Ω
Bobin İndüktansı	1,4 mH
Çıkış Kapasitörü	200 uF
Hat Direnci	1 Ω
DA Bağlantı Kapasitörü	1000 uF

DA bara analizleri, durum çalışmaları olarak gerçekleştirilmiştir. Analizler için yedi adet durum belirlenmiştir. Durum 1 için öncelikle güneş panelinin maksimum güç noktası takibi değerlendirilmiştir. Maksimum güç noktası takibi için ısınım ve sıcaklık değişimlerine göre INFO algoritması ile ayarlanmış değiştir-gözle algoritması tabanlı PI kontrol ve N-PI

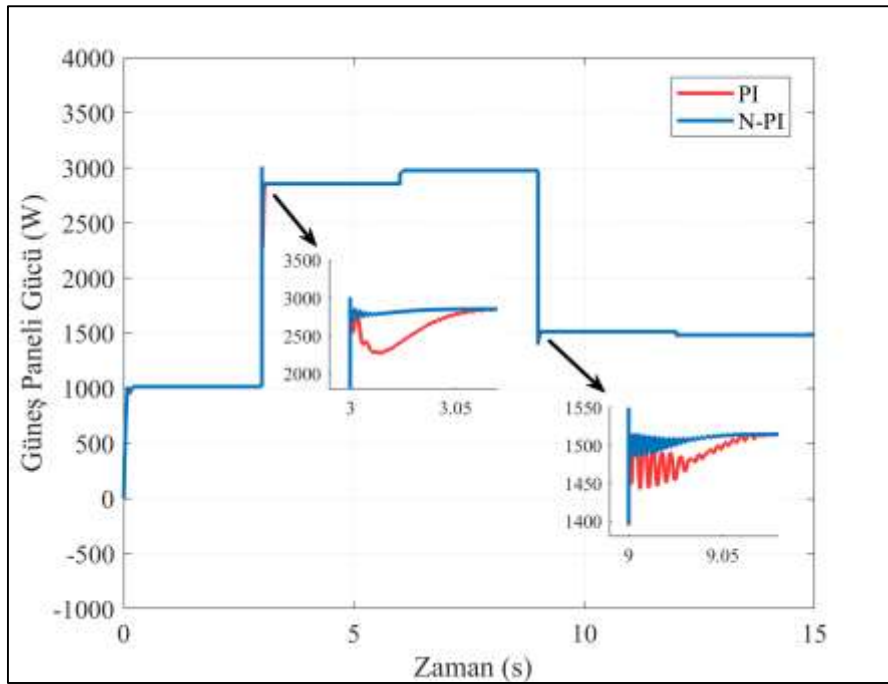
kontrol karşılaştırılması yapılmıştır. Durum 2 ve Durum 3 akü deşarj modundayken, yapılan iki çalışmaya aittir. Durum 4 ve Durum 5 akü şarj modundayken yapılan iki çalışmayı kapsamaktadır. Durum 6 akü şarjdan deşarja geçiş ve deşarjdan şarja geçiş durumlarında yapılan analizleri ifade eder. Bu altı durumda da güneş paneli maksimum güç noktası takibi modunda çalışmaktadır. Durum 7 ise güneş panelinin maksimum güç noktası takibi modundan çıkıp DA bara gerilim regülasyonu moduna geçmesi durumunu ifade eder. Bu durum, bara yük talep enerjisinin, üretilen enerjiden daha düşük olduğu ve akü kapasitesinin de dolu olduğu bir güvenlik durumudur.

Durum 1 için PI ve N-PI kontrolcülerin maksimum güç noktası takibinde dinamik performansları incelenmiştir. Bunun için güneş paneline bir ışınlım ve sıcaklık grafiği uygulanmıştır. Bu grafik ani iniş çıkışlara sahiptir. Bu sayede kontrolcülerin tepkileri incelenmiştir. Durum 2 için bara gücü 2,5 KW ve güneş paneli ışınlımı 500 W/m² olarak ayarlanmış ve baraya 1 KW'lık yük alınıp çıkartılmıştır. Durum 3 için ise bara gücü 2,5 KW ve güneş paneli ışınlımı 500 W/m² iken 500'er Watt'lık kademeli yükler sıra ile devreye alınmıştır. Durum 4 için bara gücü 1,5 KW ve güneş paneli ışınlımı 1000 W/m² olarak ayarlanmış ve baraya 1 KW'lık yük alınıp çıkartılmıştır. Durum 5 için bara yüksüzken ve güneş paneli ışınlımı 850 W/m² değerindeyken 2,5 KW'lık tam yük testi gerçekleştirilmiştir. Durum 6'da bara gücü 2 KW'tır ve güneş paneli üretimine göre bataryanın şarj-deşarj ve deşarj-şarj mod değişimi gözlenmiştir. Durum 7'de bara gücü 2 KW'tır ve akü doludur. Çalışma durumu güneş paneli üretimine göre, maksimum güç noktası takibinden, DA bara regülasyonu moduna geçmektedir. Durum 1 için elde edilen sonuçlar Şekil 4.1-4.4'te verilmiştir.



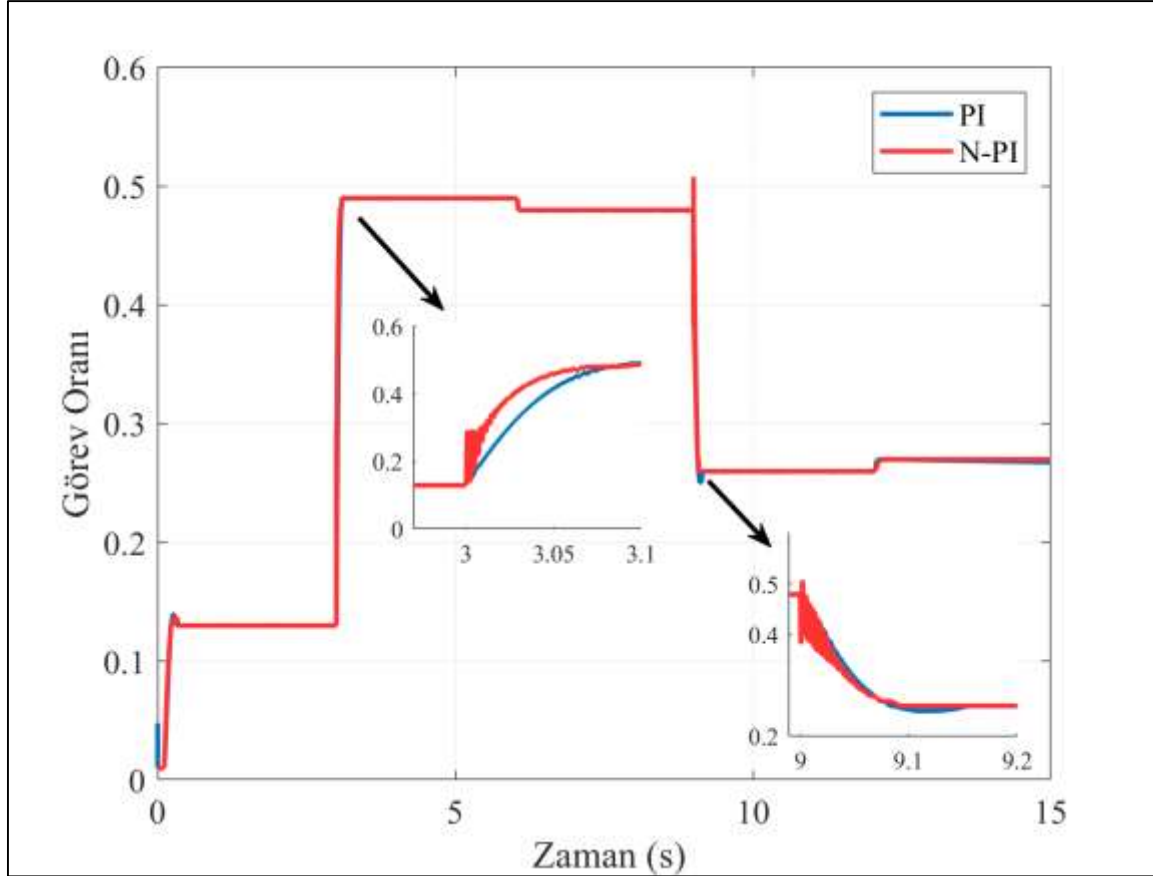
Şekil 4.1. Durum 1; güneş paneline uygulanan ısıtım ve sıcaklık grafiği

Şekil 4.1'de güneş paneline uygulanan ısıtım ve sıcaklık grafiği yer almaktadır. Grafik eksenini normalize edilmiş değerleri ifade eder. Işıtım ve sıcaklıklar darbe şeklinde ani olarak değişmektedir. Şekil 4.2'de güneş panelinden çekilen güçler verilmiştir.



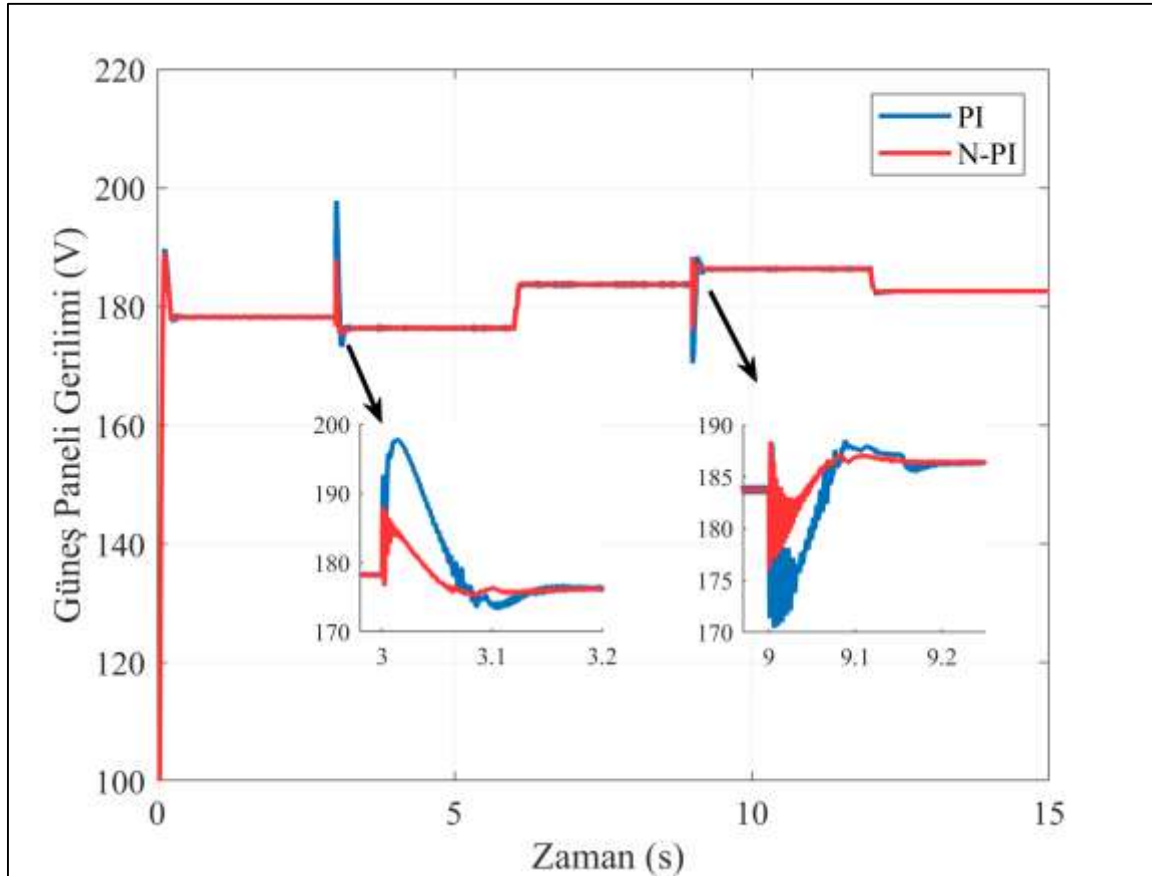
Şekil 4.2. Durum 1; güneş panelinden çekilen güçler

Şekil 4.2 incelendiğinde N-PI kontrol sonuçlarının ışıınım değişimlerinde referansa daha hızlı yerleştiği gözlemlenmektedir. Bu da güneş panelinden daha fazla güç üretildiğini göstermektedir. Sıcaklık değişimlerinde, kontrolcü performansları arasında anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir. Şekil 4.3'te ise kontrolcülerin görev oranları verilmiştir.



Şekil 4.3. Durum 1; kontrolcülerin görev oranları

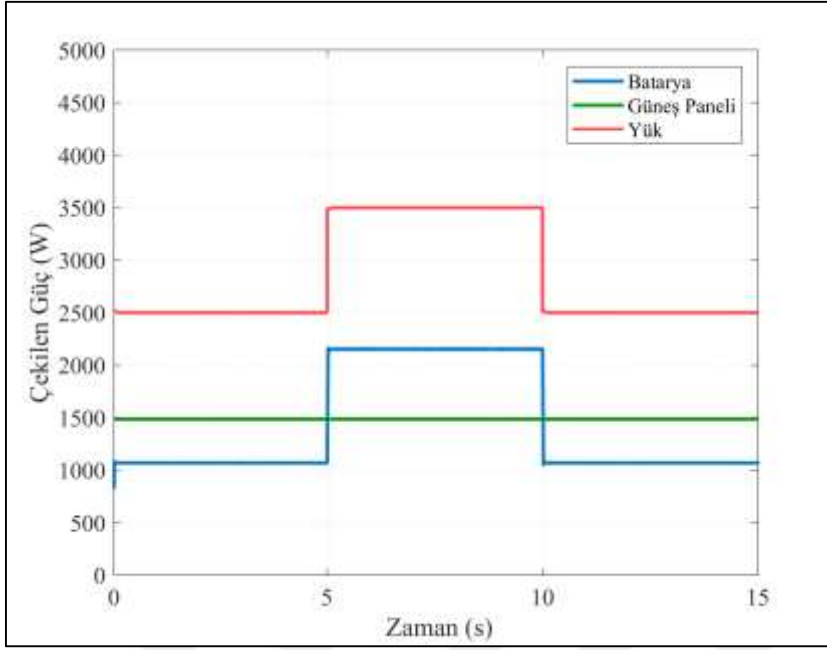
Şekil 4.3'te N-PI kontrol sinyallerinin referansa daha hızlı ulaştığı görülmektedir. Bu N-PI kontrolcüsü ile maksimum güç noktası takibi dinamikliğinin daha iyi olduğunu göstermektedir. Şekil 4.4'te güneş paneli gerilimlerine ait grafik yer almaktadır.



Şekil 4.4. Durum 1; güneş paneli gerilimleri

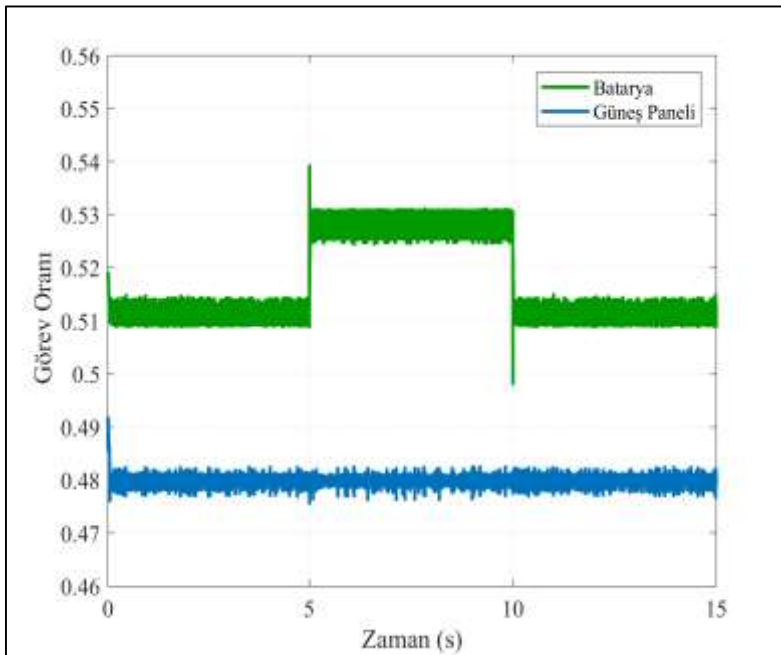
Şekil 4.4'te görüldüğü üzere PI kontrol ile kontrol edilen güneş paneli gerilimi %60 ile %80 arasında daha fazla aşım sergiler. Böylece N-PI kontrolün literatürde de ifade edilen daha hızlı yerleşme ve daha az aşım avantajları gözlemlenmektedir. Bu nedenle N-PI kontrol PI kontrole göre daha avantajlıdır. Sıcaklık değişimlerinde, kontrolcü performansları arasında anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir.

Şekil 4.5-4.8 arasında Durum 2 grafikleri yer almaktadır. Bu noktadan sonraki testlerde, yük testleri sunulmaktadır. Yük testlerinde DA bara gerilim seviyesi analizleri gerçekleştirilmektedir.



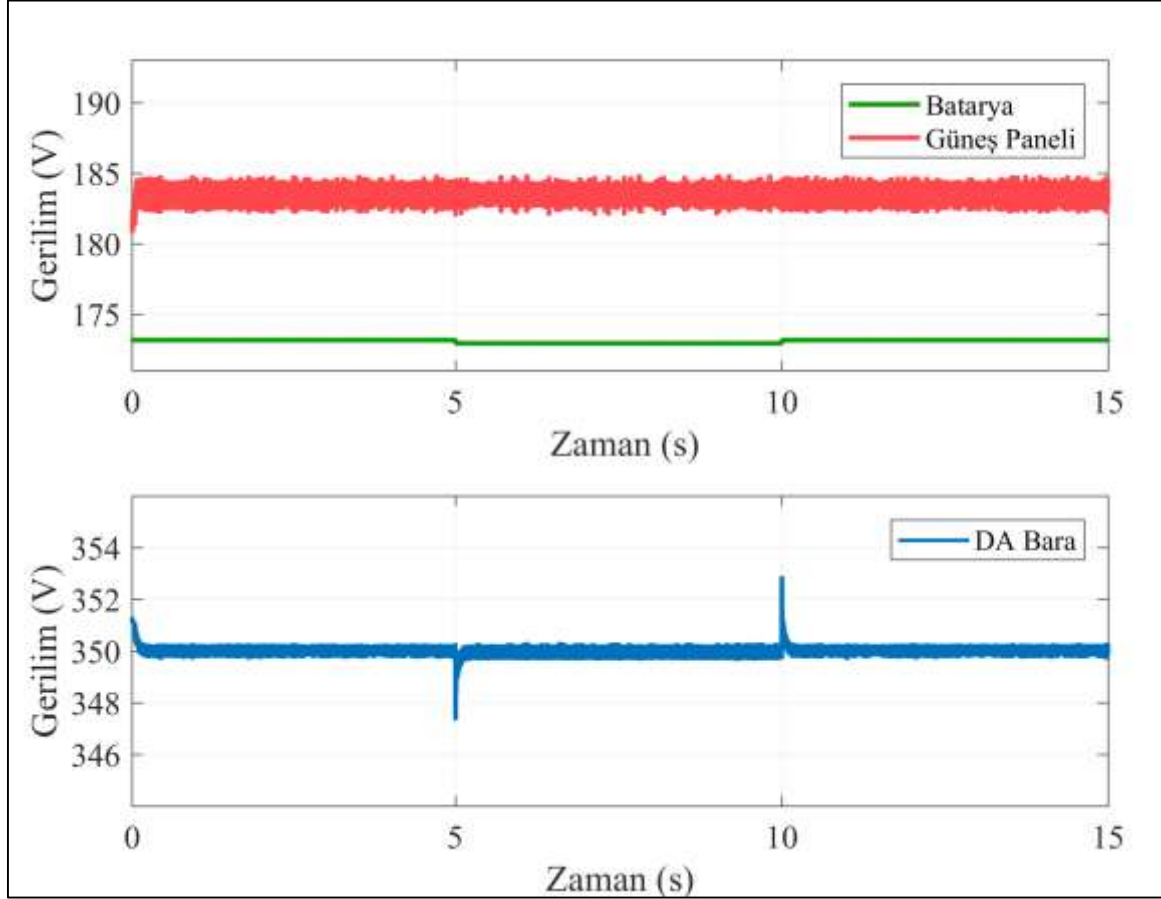
Şekil 4.5. Durum 2; yük ve kaynaklardan çekilen güçler

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere güneş paneli gücü ışıınımdan dolayı sabitken 1 KW'lık yük 5. saniyede devreye girmiş ve 10. saniyede devreden çıkmıştır. Yük girdiğinde gerekli gücün kalanı bataryadan karşılanmaktadır. Güneş paneli gücü ışıınımdan dolayı değişmediği için sabittir. Şekil 4.6'da dönüştürücülerin görev oranı değişimleri görülmektedir.



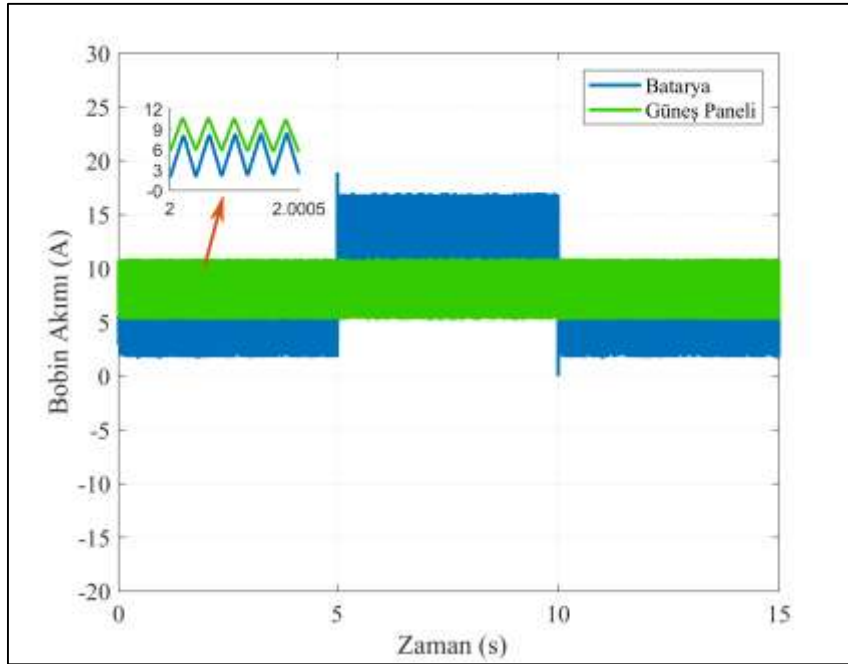
Şekil 4.6. Durum 2; dönüştürücü görev oranları

Şekil 4.6'dan batarya dönüştürücüsünün görev oranının yük girişinde artarak gerilimi arttırdığı böylece gerekli enerjiyi sağladığı anlaşılmaktadır. Güneş paneli görev oranı, ısıtım ve sıcaklık değişimi olmadığı için sabit kalmıştır. Şekil 4.7'de gerilim grafikleri verilmiştir.



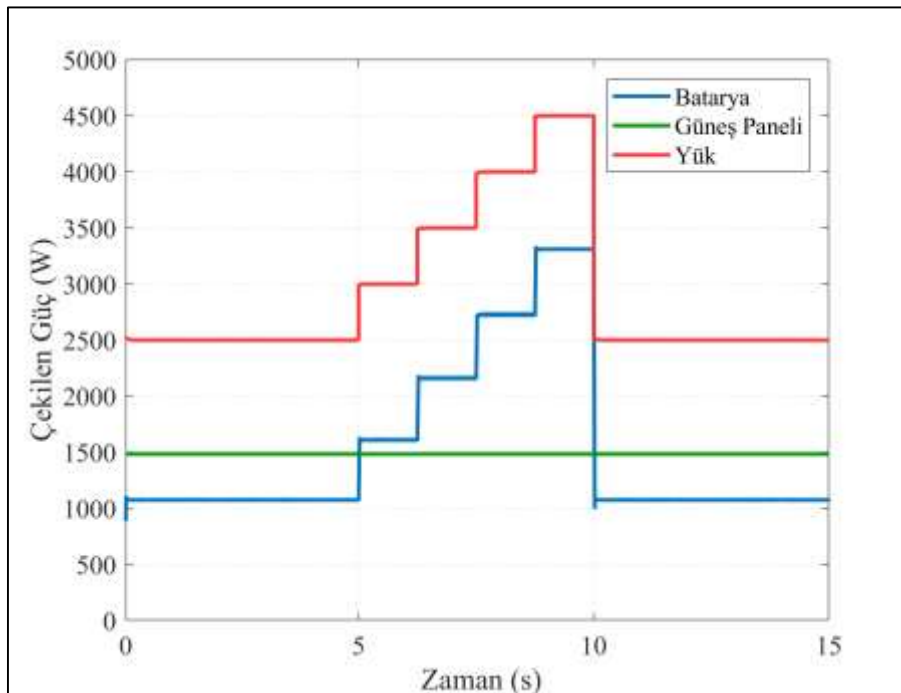
Şekil 4.7. Durum 2; batarya, güneş paneli ve DA bara gerilimleri

Şekil 4.7'de batarya, güneş paneli ve DA bara gerilimlerinin yük darbesine verdiği tepkilerden görüldüğü üzere DA baradaki gerilim sıçraması %1'den düşüktür. Batarya gerilimi ise çekilen akımın yükselmesinden oluşan gerilim düşümü nedeniyle bir miktar düşmektedir. Dönüştürücülerin bobin akımları da Şekil 4.8'de verilmiştir.



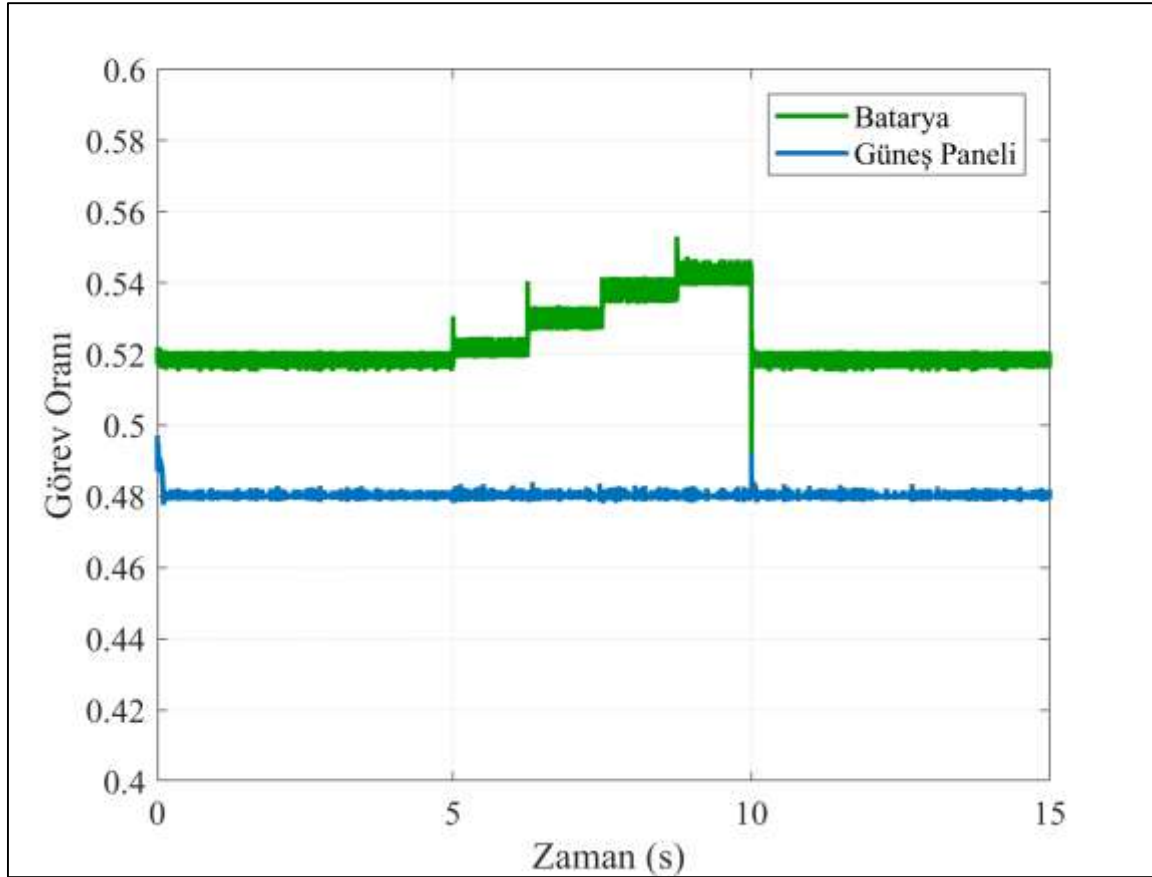
Şekil 4.8. Durum 2; dönüştürücülerin bobin akımları

Şekil 4.8’den görüldüğü üzere yük girişinde batarya dönüştürücüsünün akımı artmıştır. Akımlar bobin şarj-deşarjından dolayı testere dişi şeklindedir. Durum 3 için elde edilen grafikleri Şekil 4.9-4.12 arasında verilmiştir.



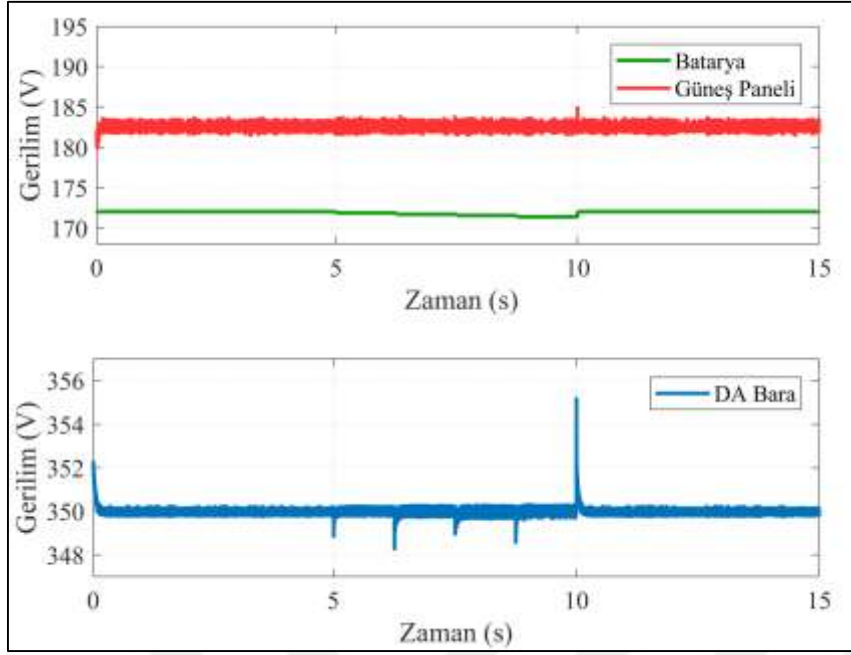
Şekil 4.9. Durum 3; yük ve kaynaklardan çekilen güçler

Şekil 4.9’da yer alan grafikte 5. saniyeden itibaren kademeli olarak yüklerin devreye alındığı görülmektedir. Buradaki amaç kademeli yük testi sırasında DA baranın tepkisini analiz etmektir. Şekil 4.9’dan görüldüğü üzere batarya yük girişlerine sorunsuz yanıt vermektedir. Güneş paneli ışınlam değeri sabit olduğu için gücü değişmemektedir. Şekil 4.10’da dönüştürücü görev oranları yer almaktadır.



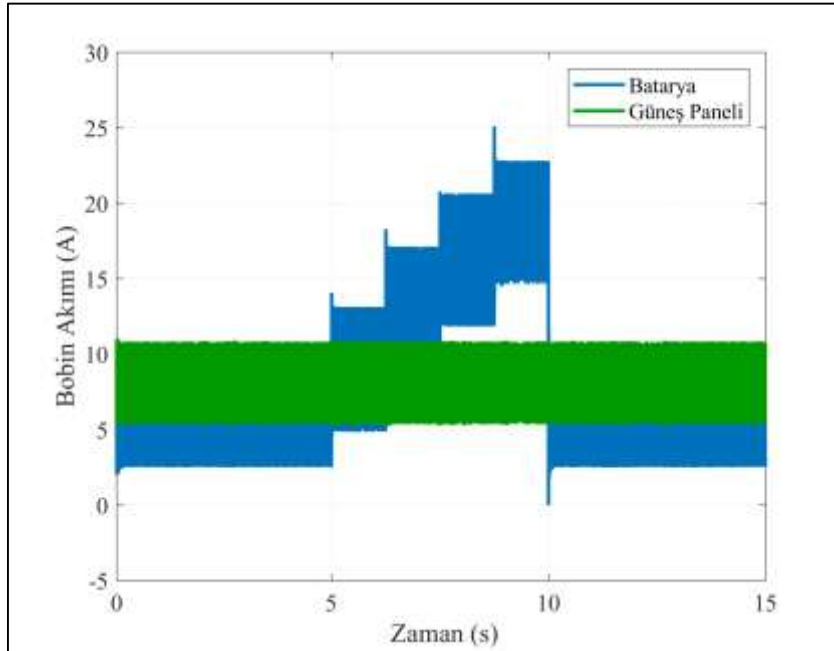
Şekil 4.10. Durum 3; dönüştürücü görev oranları

Şekil 4.10’dan da görüldüğü gibi kademeli yük girişlerinde görev oranı tepkileri oldukça dinamiktir. Güneş paneli görev oranı ışınlam ve sıcaklık sabit olduğu için sabittir. Buradan 10. saniyede devreye giren tüm yüklerin çıkmasından dolayı oluşan tepki daha büyüktür. Bu da görev oranı tepkisinin yük büyüklüğüne bağlı olduğunun göstergesidir. Şekil 4.11’de gerilim grafikleri yer almaktadır.



Şekil 4.11. Durum 3; batarya, güneş paneli ve DA bara gerilimleri

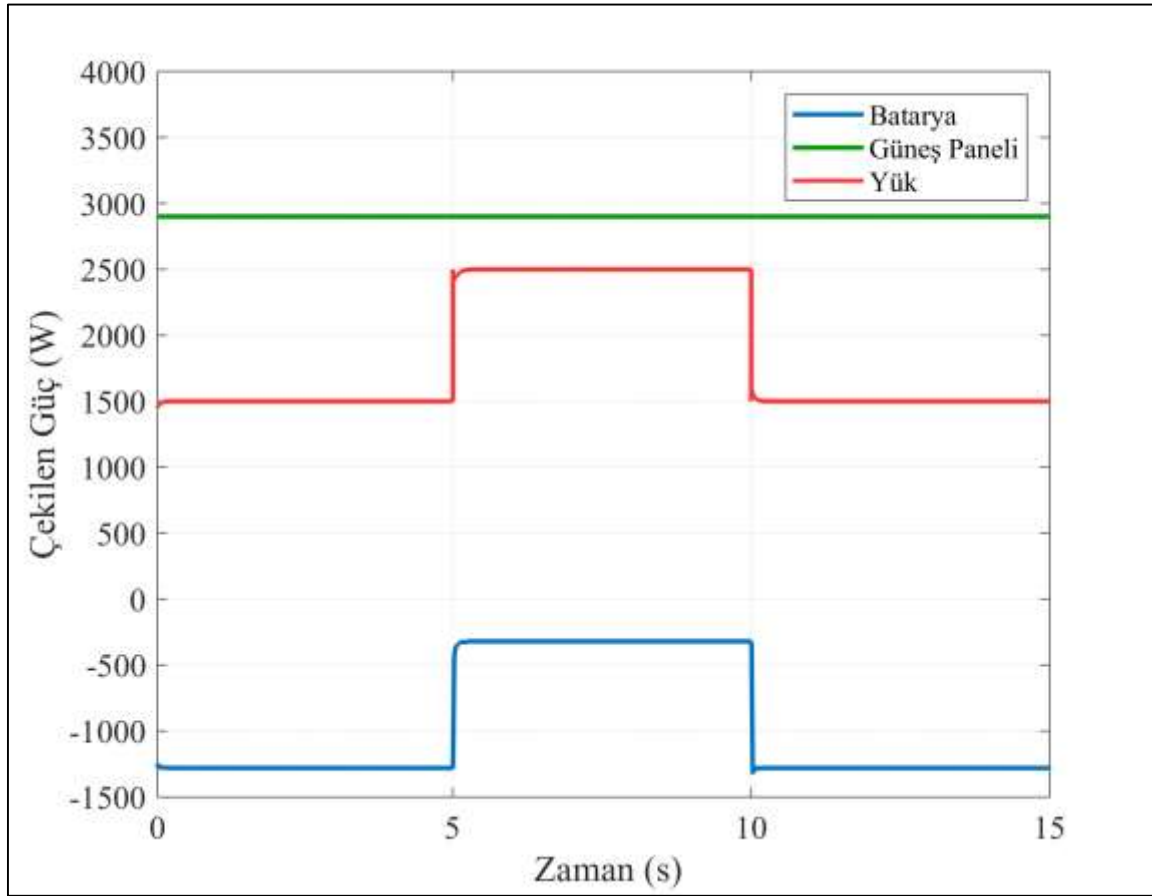
Şekil 4.11’de batarya, güneş paneli ve DA bara gerilimleri görülmektedir. DA bara geriliminden anlaşılabacağı üzere gerilim sıçramalarının büyüklüğü de yük büyüklüğüne bağlıdır. Burada oluşan maksimum gerilim sıçraması %2’nin altındadır. Şekil 4.12’de ise dönüştürücülerin bobin akımları verilmiştir.



Şekil 4.12. Durum 3; dönüştürücülerin bobin akımları

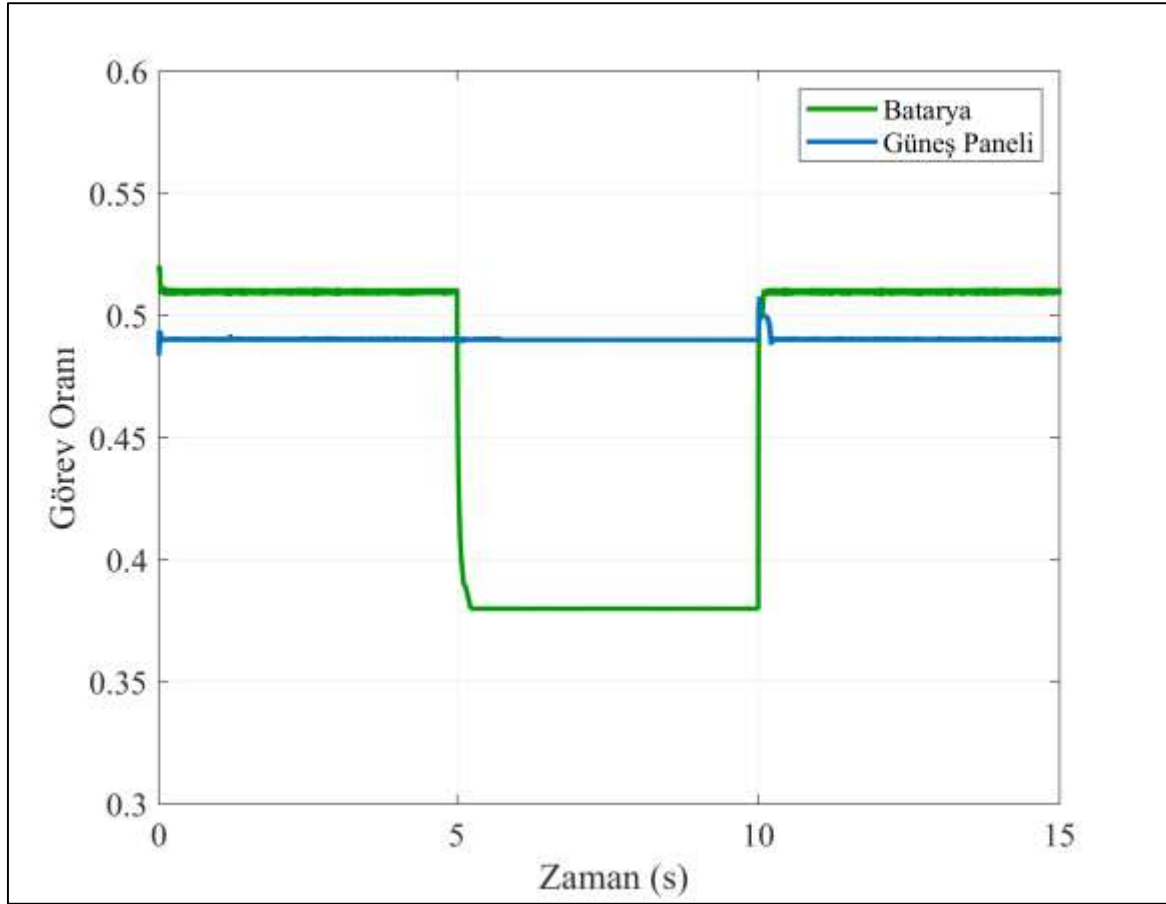
Şekil 4.12’den de batarya dönüştürücüsünün akımının yük akımını karşılamak için arttığı ve ısınım ve sıcaklığın sabit olmasından dolayı güneş paneli dönüştürücüsünün akımının sabit kaldığı anlaşılmaktadır.

Batarya şarj modu yük analizi için Şekil 4.13-4.16 arasında Durum 4’e ait grafikler verilmiştir.



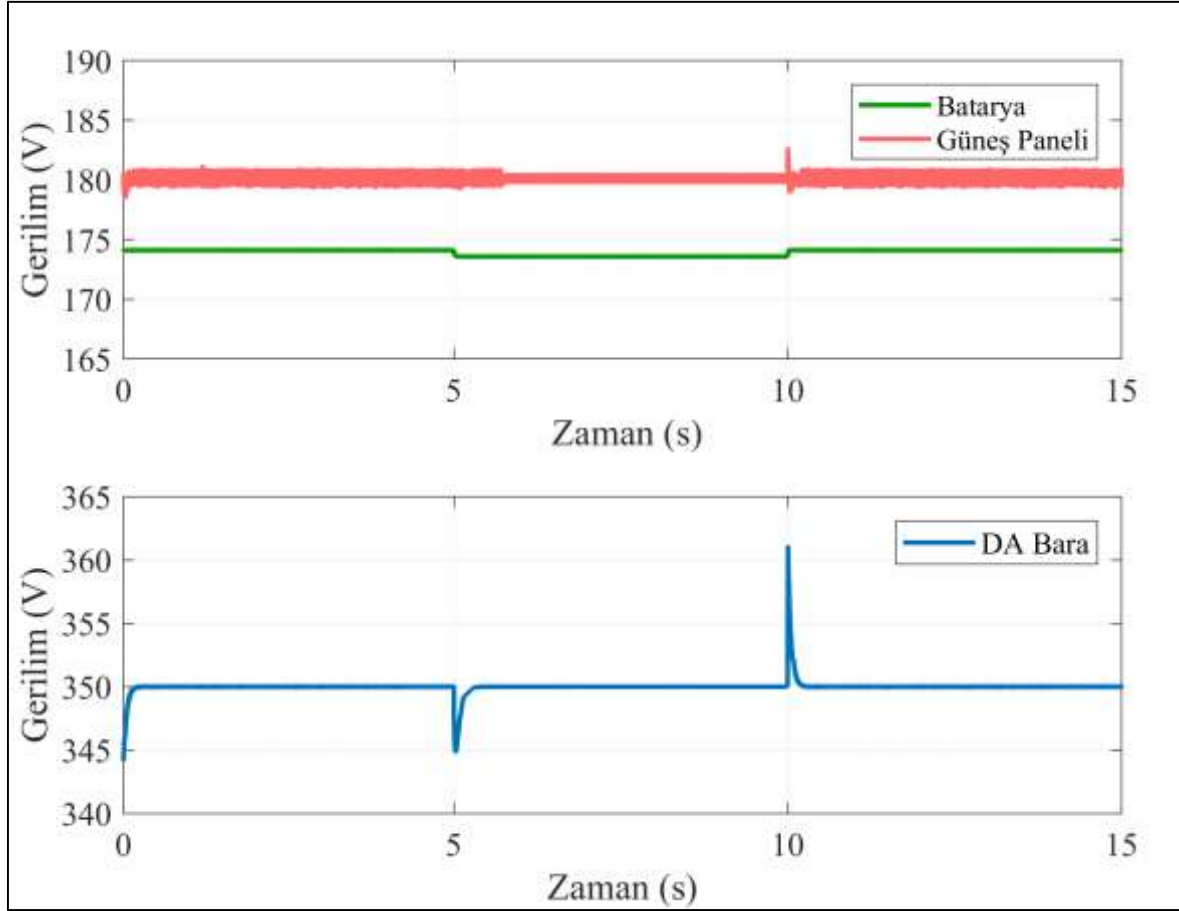
Şekil 4.13. Durum 4; yük ve kaynaklardan çekilen güçler

Şekil 4.13’ten görüldüğü gibi bataryadan çekilen güç negatiftir. Bu da bataryanın şarj modunda olduğunu gösterir. 5. saniyede devreye alınan yük nedeniyle güneş paneli gücü sabit olduğundan DA bara gerilimi değerini korumak için batarya, şarj gücünü düşürmüştür. Burada şarj durumundaki batarya şarj enerjisinden feragat ederek DA bara enerjisini yükseltir. Bunu batarya dönüştürücüsü, hızlı bir tepki göstererek sağlamaktadır. Şekil 4.14’te dönüştürücülerin görev oranları verilmiştir.



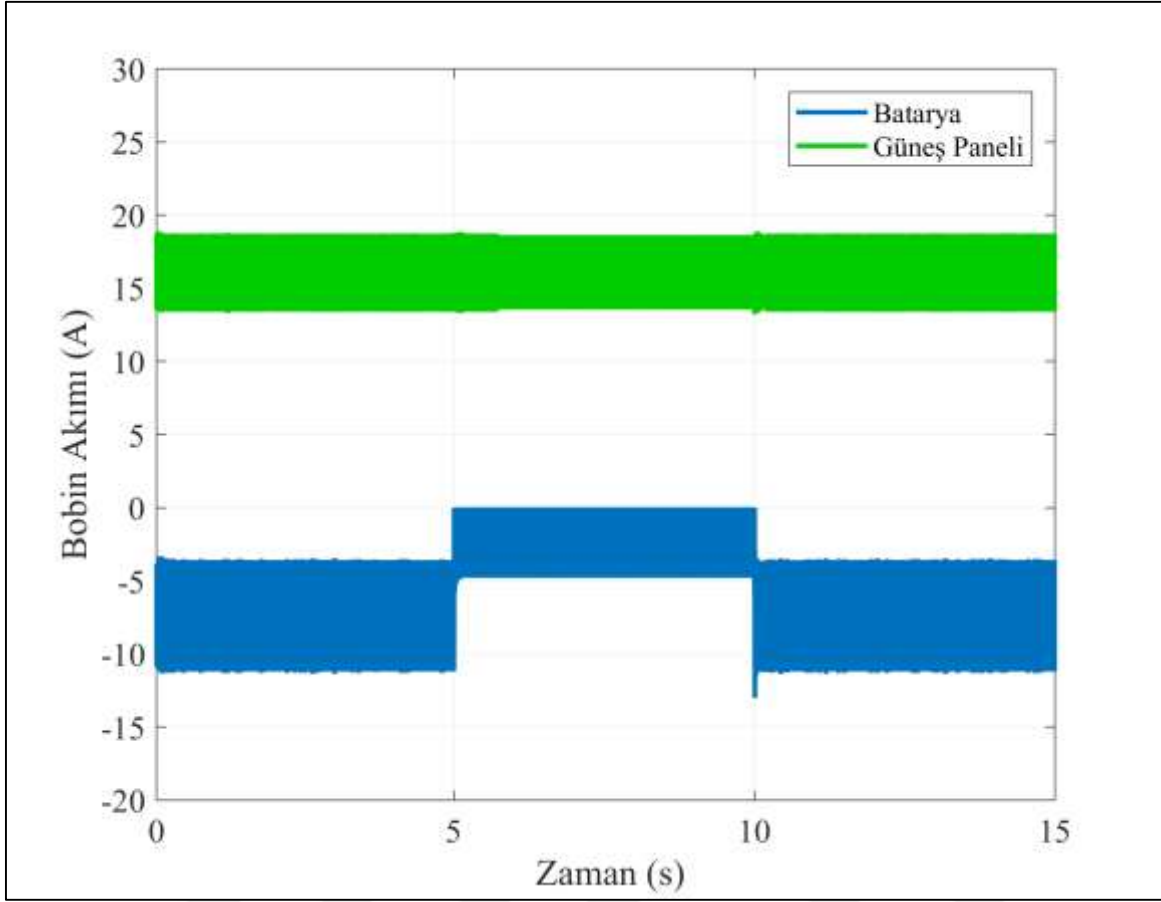
Şekil 4.14. Durum 4; dönüştürücü görev oranları

Şekil 4.14'te dönüştürücülerin görev oranları yer almaktadır. Görüleceği üzere yine güneş paneli ışınımı sabit olduğu için görev oranı sabittir. Ancak yük girişinde batarya dönüştürücüsünün görev oranı azalmaktadır. Yük çıkışında bataryanın ani güç talebinden kaynaklı güneş paneli geriliminde küçük bir salınım gerçekleşmektedir. Bu nedenle görev oranı bu salınıma tepki göstermektedir. Şekil 4.15'te gerilim grafikleri yer almaktadır.



Şekil 4.15. Durum 4; batarya, güneş paneli ve DA bara gerilimleri

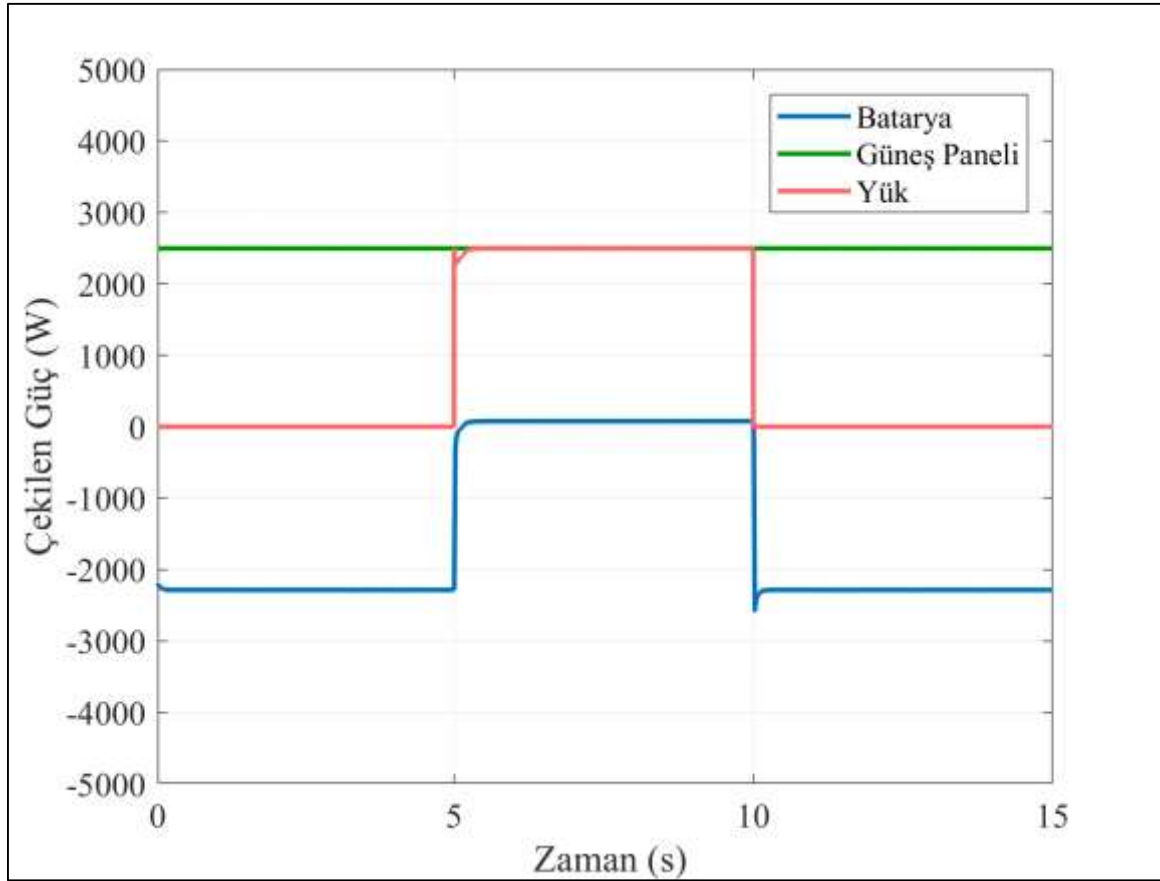
Şekil 4.15'te batarya, güneş paneli ve DA bara gerilimleri verilmiştir. DA bara geriliminin sıçrama değeri bir miktar daha fazla olmakla birlikte %3'ün altındadır. Bu da bataryanın deşarj modundaki DA bara regülasyonunun daha iyi olduğunu gösterir. Şekil 4.16'da durum 4 için dönüştürücülerin bobin akımları verilmiştir.



Şekil 4.16. Durum 4; dönüştürücülerin bobin akımları

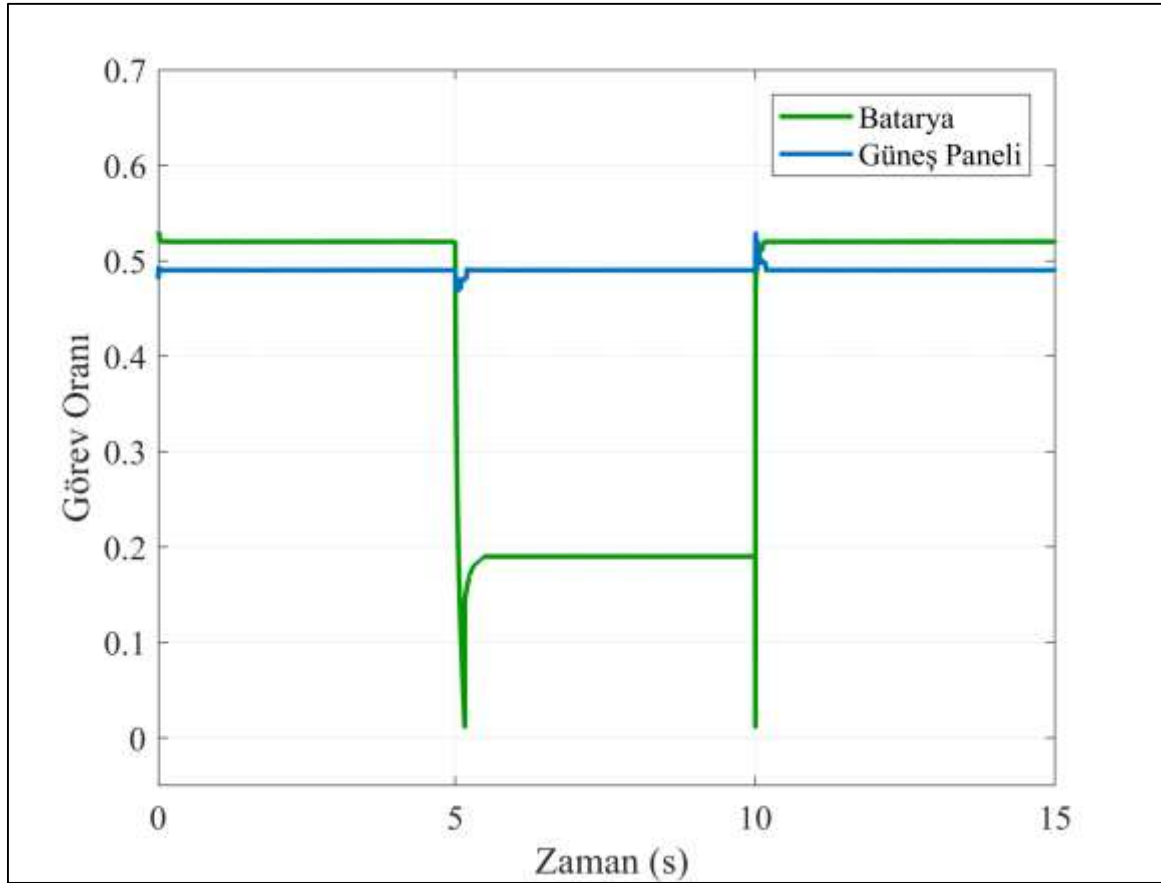
Batarya akım yönü şarj durumunda olduğu için negatiftir. Yük girişinde kesikli mod çalışmaya geçtiği de görülmektedir. Özellikle şarj ve deşarj geçiş durumlarında kesikli mod çalışmanın kaçınılmaz olduğu anlaşılmaktadır. Kesikli mod geçişini azaltmak için bobin değeri veya anahtarlama frekansı artırılabilir. Anahtarlama frekansı anahtarlama kayıplarına yol açacağı için istenildiği kadar arttırılamaz. Bobin değeri de maliyet ve boyutlandırmadan dolayı sınırlandırılmaktadır.

Durum 5 testi, sıfır yükten tam yüke çıkan talep için gerçekleştirilmiştir. Durum 5 grafikleri Şekil 4.17-4.20 arasında verilmiştir.



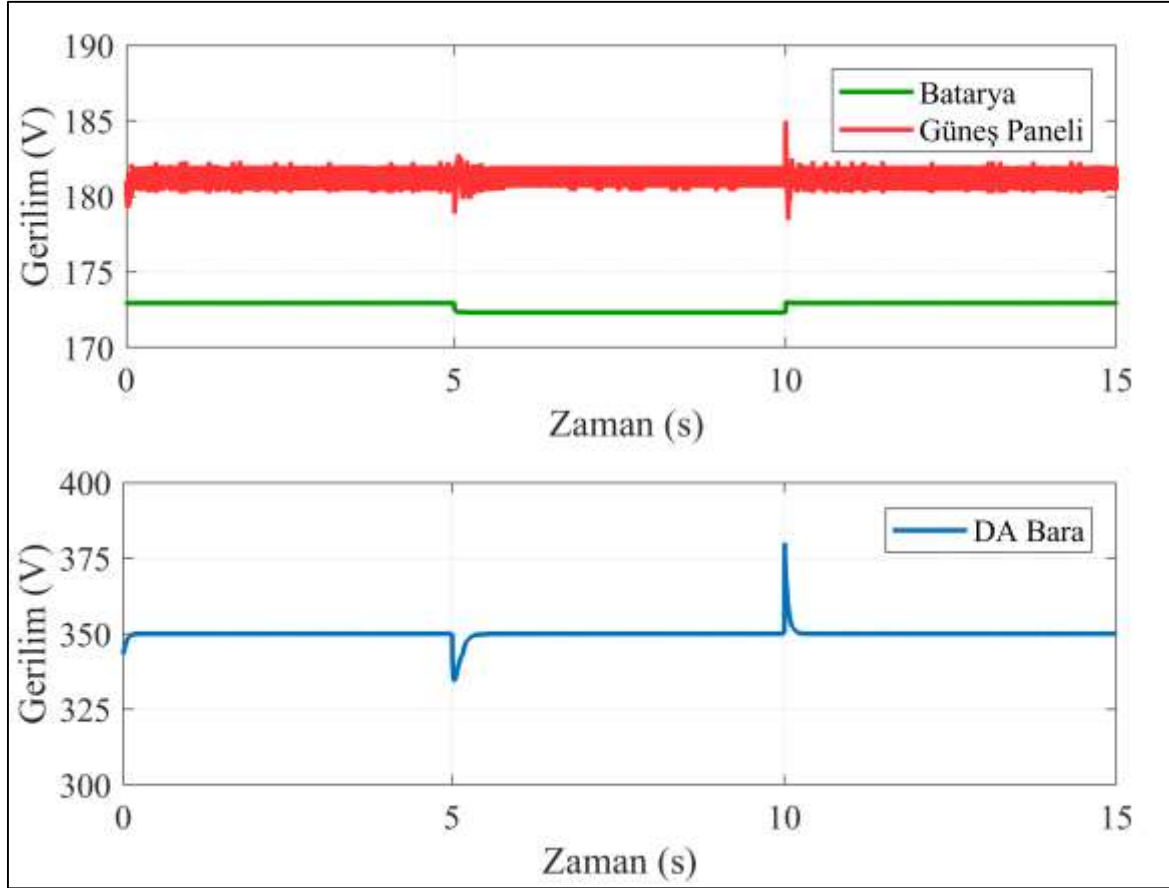
Şekil 4.17. Durum 5; yük ve kaynaklardan çekilen güçler

Şekil 4.17'den görüldüğü gibi ilk başta DA bara gücü sıfırdır. Güneş paneli tüm enerjisini bataryaya aktarmaktadır. Devreye 5. saniyede 2,5 KW'lık yük girdiğinde batarya güneş panelinden aldığı enerjinin tamamını keserek enerjinin DA baraya akmasını sağlar. Hatta dikkat edilirse batarya kendi enerjisinden çok küçük bir miktar DA baraya yollar. Bu nedenle aslında batarya şarj durumundan deşarj durumuna geçmektedir. Bu senaryo da devreye giren güç daha yüksek olduğu için salınımlar ve sıçramalar daha fazladır. Ancak çalışma sınırları aşılmamaktadır. Şekil 4.18'de dönüştürücü görev oranları verilmiştir.



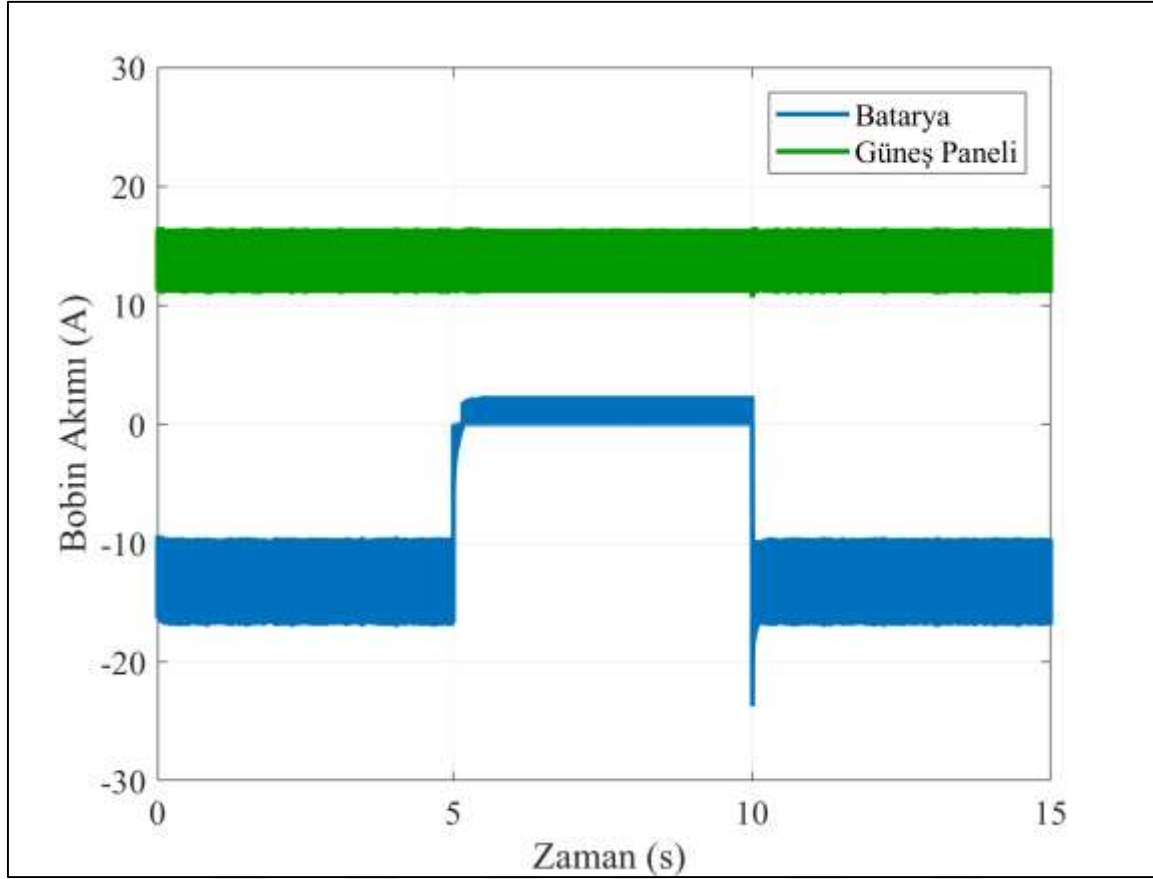
Şekil 4.18. Durum 5; dönüştürücü görev oranları

Şekil 4.18’de batarya görev oranı yük girişinde, önce oranını azaltarak sıfıra kadar düşmektedir. Ardından deşarj moduna geçerek görev oranını arttırmakta ve 0,2 seviyelerine sabitlemektedir. Güneş panelinin görev oranı bu mod değişimi sırasında küçük bir tepki göstermektedir. Şekil 4.19’da gerilim grafikleri yer almaktadır.



Şekil 4.19. Durum 5; batarya, güneş paneli ve DA bara gerilimleri

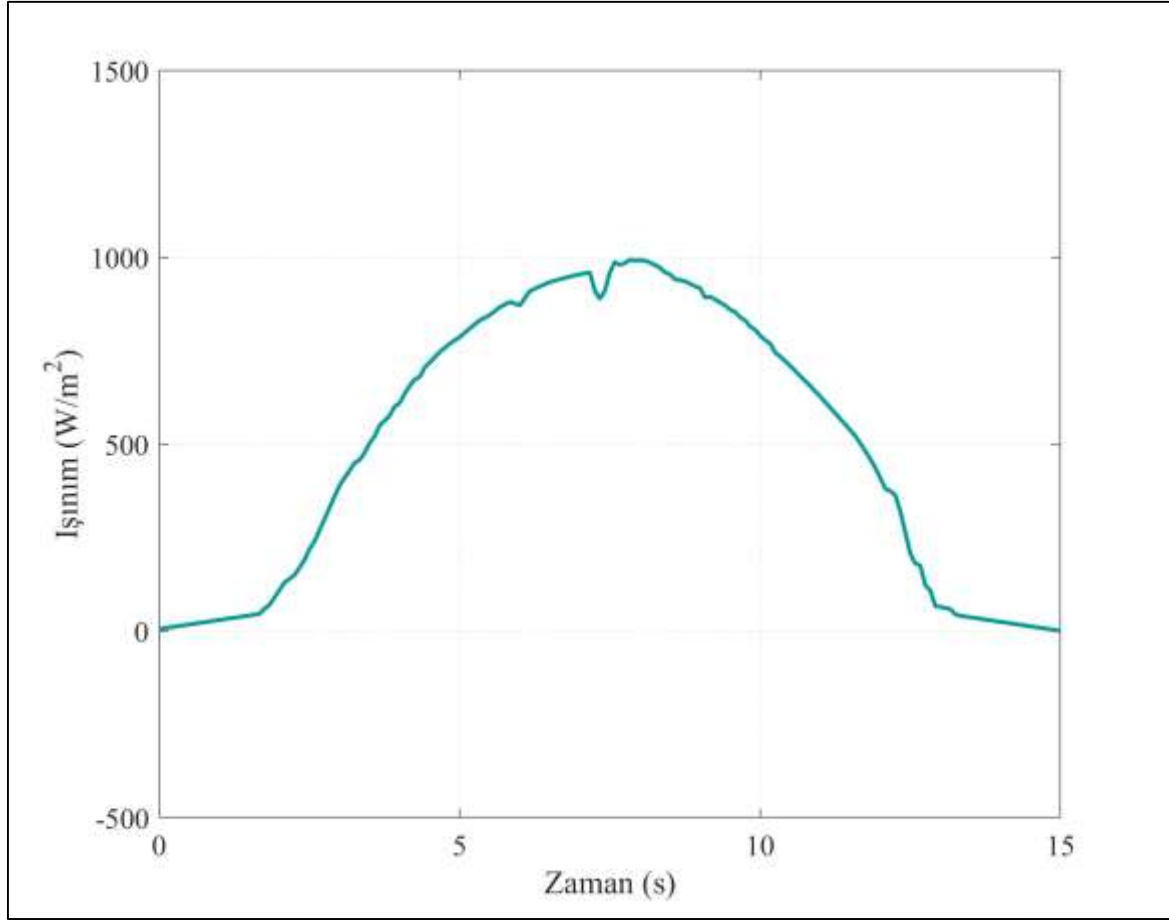
Şekil 4.19’da batarya, güneş paneli ve DA baraya ait gerilimleri görülmektedir. Buradaki güneş paneli tepkileri bataryanın mod değişiminden kaynaklanmaktadır. Batarya şarj durumunda olduğu zamanlarda (0-5 saniye ve 10-15 saniye arası) şarj geriliminden dolayı seviyesi daha yüksektir. Gerilim sıçramaları ise şimdiye kadarki testlerden daha yüksektir. Ancak maksimum noktası %8’in altındadır. Şekil 4.20’de bobin akımları verilmiştir.



Şekil 4.20. Durum 5; dönüştürücülerin bobin akımları

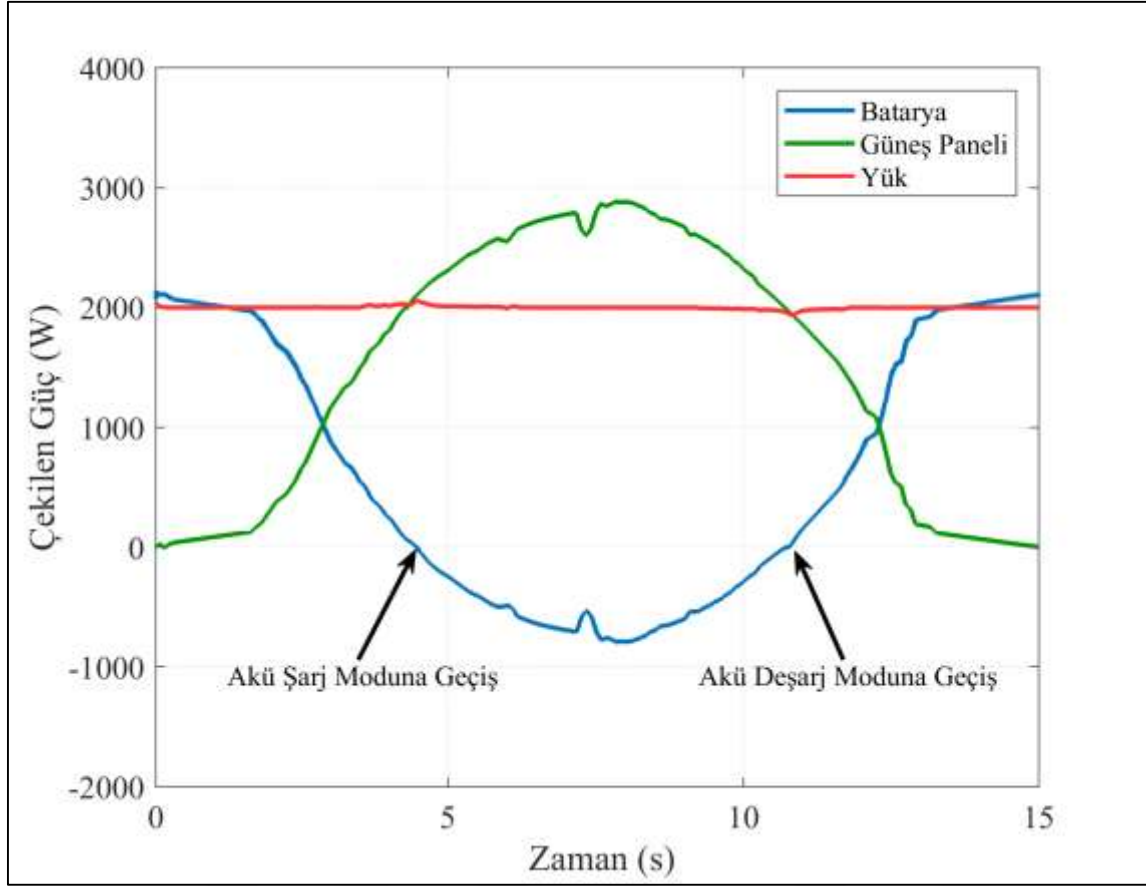
Şekil 4.20’de 5 ile 10. saniyeler arası bataryanın deşarj moduna geçtiği daha iyi anlaşılmaktadır. Durum 5 testi hem tam yük testi hem de durum geçişi dezavantajlarına sahip olduğu için sistemin en ağır testidir.

Durum 6 testleri Şekil 4.22-4.25 arasında yer almaktadır. Durum 6 için güneş paneline, ağustos ayına ait güneşli bir günde alınmış Şekil 4.21’de verilen ışıma verileri uygulanmıştır.



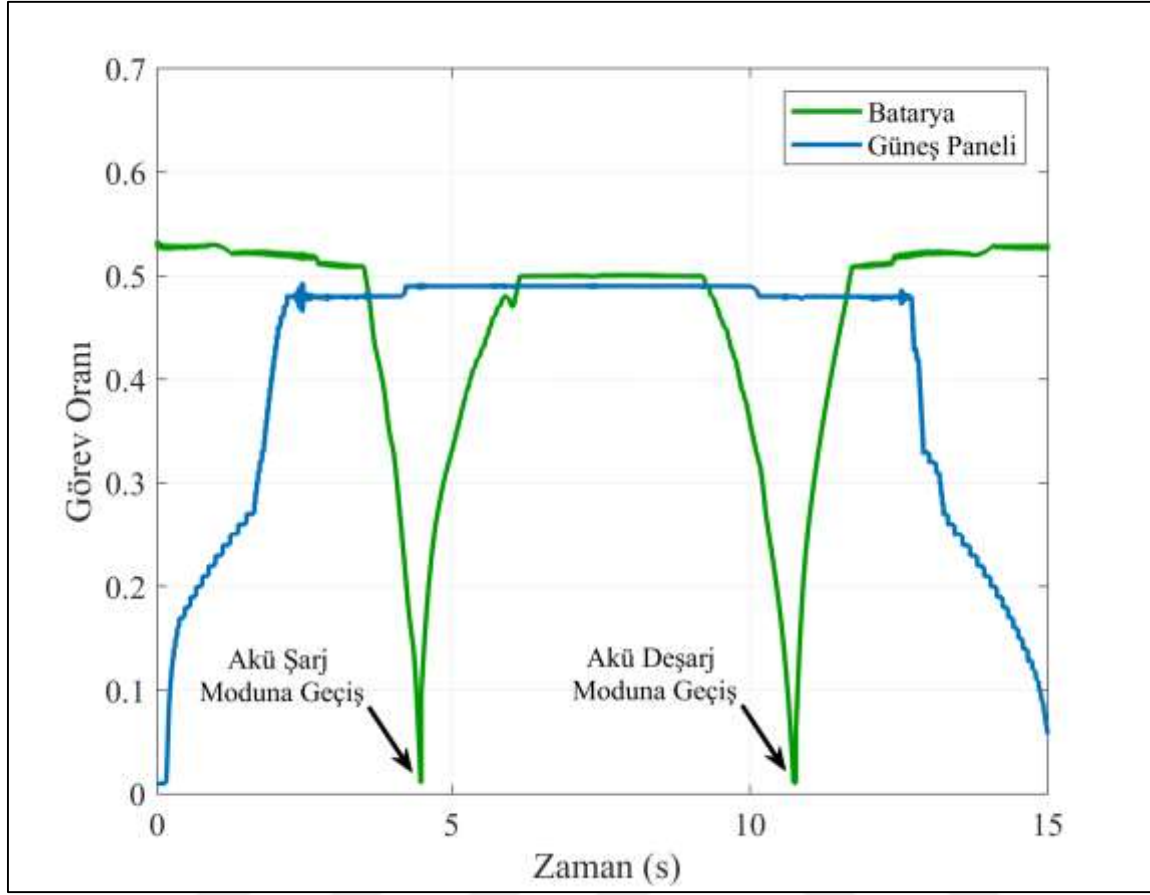
Şekil 4.21. Uygulanan ısıtım grafiği

Durum 6 çalışması için güneş paneline, gerçek ısıtım profilinde sistemi değerlendirebilmek için Şekil 4.21’de yer alan ağustos ayına ait bir ısıtım grafiği uygulanmıştır. Şekil 4.22’de çekilen güçlerin grafikleri yer almaktadır.



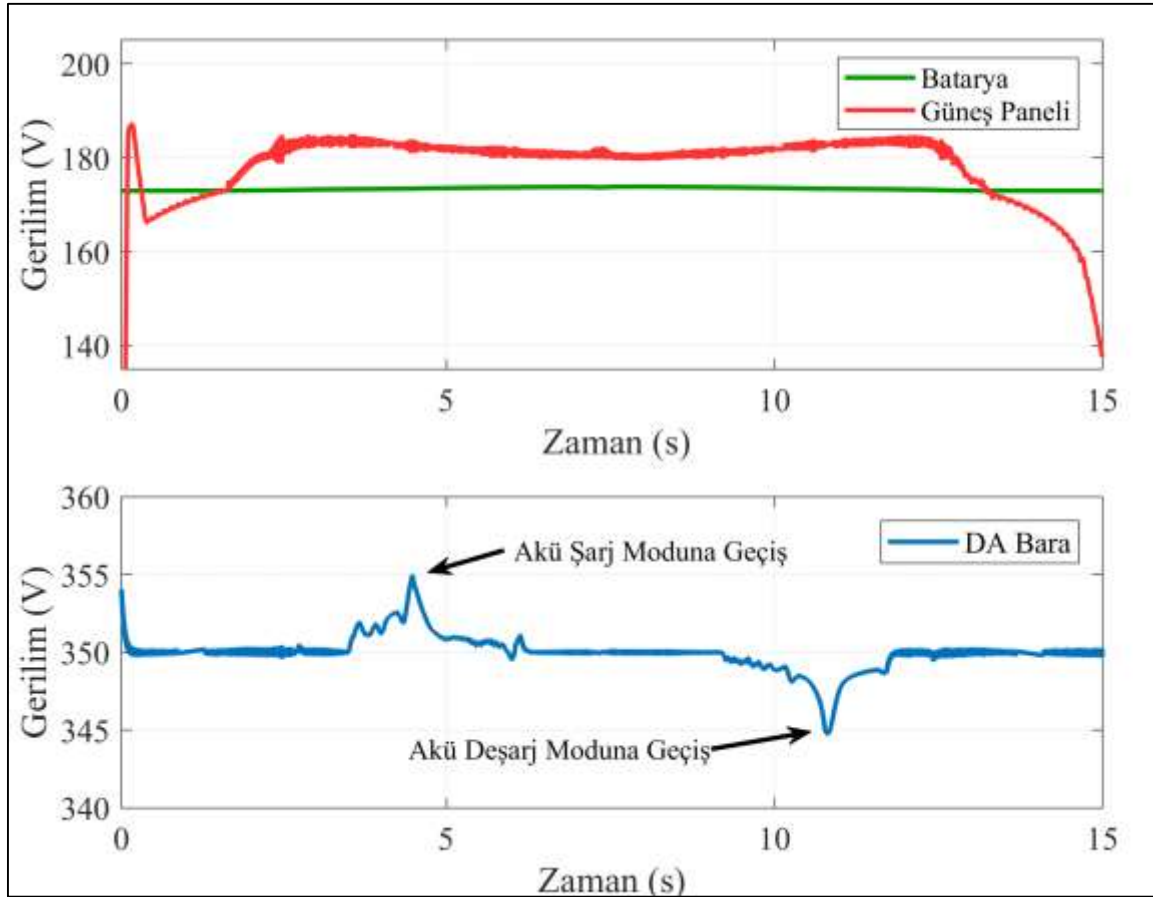
Şekil 4.22. Durum 6; yük ve kaynaklardan çekilen güçler

Şekil 4.22'de batarya, güneş paneli ve yükten çekilen güçler verilmiştir. Görüldüğü gibi güneş panelinin maksimum güç noktası takibi modunda, ışıınım değerini izlediği anlaşılmaktadır. Buna karşılık DA bara gerilim kararlılığının sağlanması için batarya önce çekilen gücü düşürmüş daha sonrada şarj durumuna geçmiştir. Durum geçişlerinde kararsızlığı önlemek için eklenmiş 5 V'luk tolerans, yük gücünün bu noktalarda bir miktar dalgalanmasına neden olmaktadır. Şekil 4.23'te dönüştürücülerin görev oranı grafiği görülmektedir.



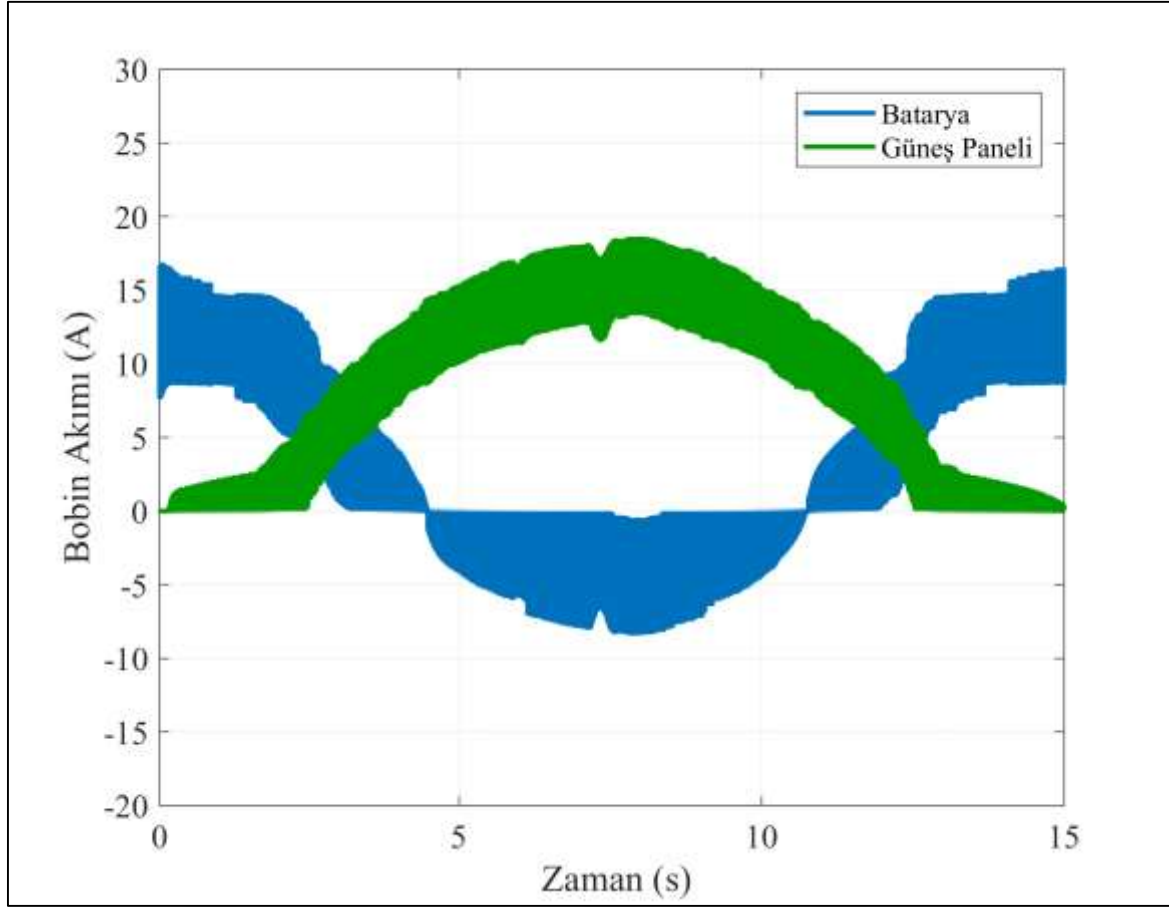
Şekil 4.23. Durum 6; dönüştürücü görev oranları

Şekil 4.23'te güneş paneli dönüştürücüsü maksimum güç noktası takibini sağlamaktadır. Batarya dönüştürücüsü de önce çekilen gücü düşürmek için görev oranını düşürmüştür. Görev oranı minimuma geldiğinde batarya, bara enerjisinin fazlasını depolamak için şarj moduna geçmiştir. Ardında şarj gücü yükselmeye başlamıştır. Böylece DA bara gerilimi dengede tutulmuştur. Şekil 4.24'te batarya, güneş paneli ve DA bara gerilimleri verilmiştir.



Şekil 4.24. Durum 6; batarya, güneş paneli ve DA bara gerilimleri

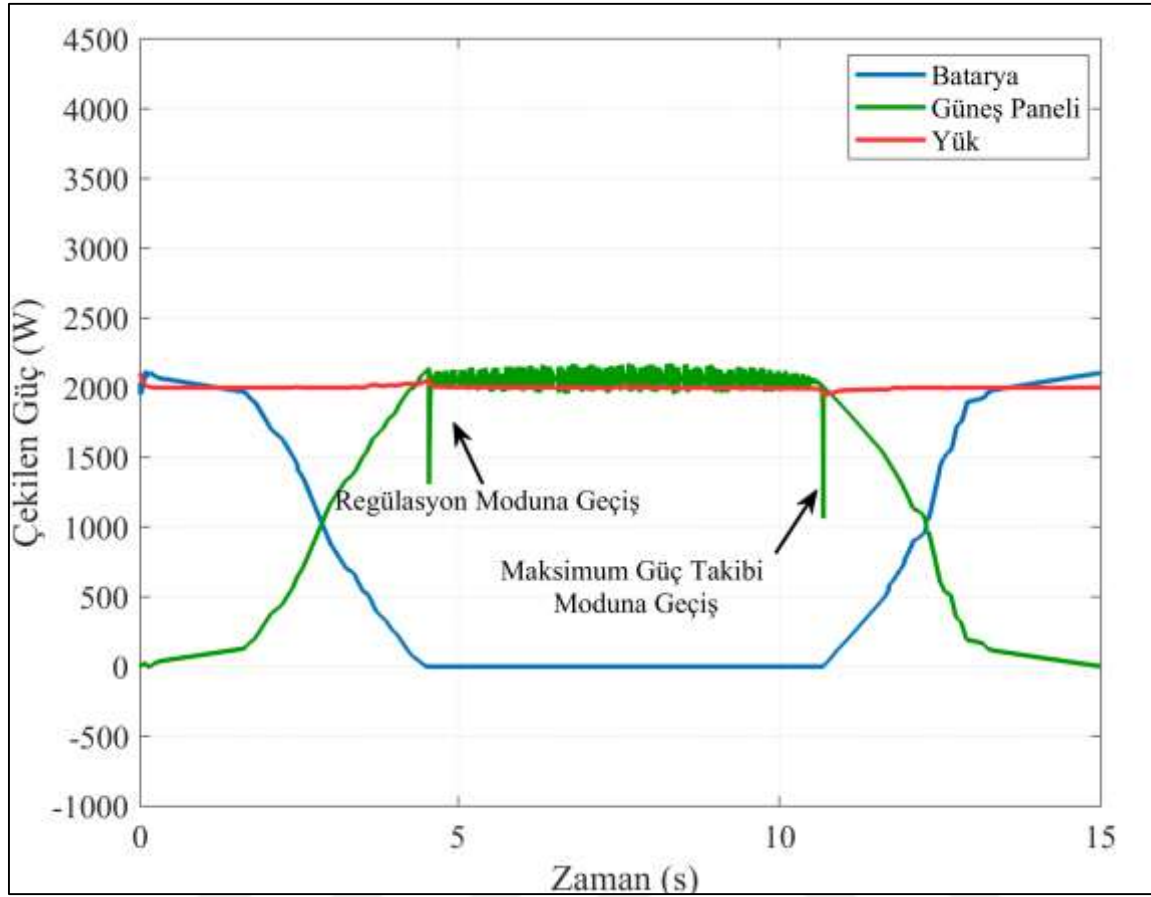
Şekil 4.24'te güneş paneli gerilimi maksimum güç noktası takibi için gerekli seviyelerde değişmektedir. DA bara gerilimi 5 V'luk bir sıçramaya sahiptir. Bu sıçrama geçiş noktalarında kararsızlık oluşmaması için belirlenmiş 5 V'luk toleranstan kaynaklanmaktadır. Böylece bu senaryoda gerilim sıçraması maksimum %1,5'in altındadır. Şekil 4.25'te dönüştürücülerin bobin akımları yer almaktadır.



Şekil 4.25. Durum 6; dönüştürücülerin bobin akımları

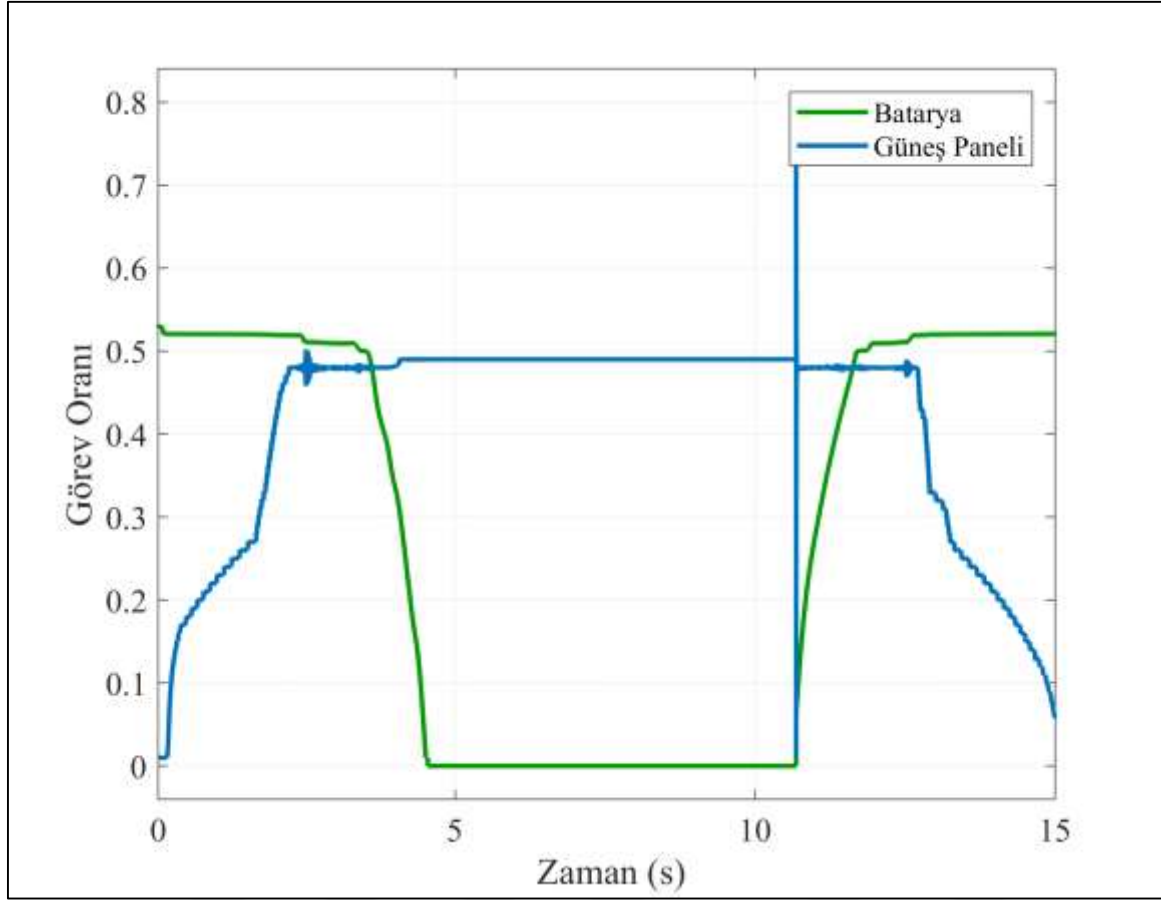
Şekil 4.25'te akım değişimleri ve deşarj modundan şarj moduna geçiş anı görülmektedir. Akımların ışınlım değişimine göre tepki gösterdiği, DA bara enerjisinin düştüğü noktada akımın ters yöne dönerek deşarj moduna geçtiği anlaşılmaktadır. Tam tersi durumda ise DA bara enerjisinin yüksek olduğu noktada, akım pozitif yöne dönerek, fazla enerji bataryaya aktarılmaktadır.

Son durum olan Durum 7 için güneş panelinin regülasyon modu analizleri gerçekleştirilmiştir. Durum 7 için uygulanan ışınlım grafiği Durum 6 için kullanılan grafik ile aynıdır (Bkz. Şekil 4.21). Durum 7 için elde edilen sonuçlar ise Şekil 4.26-4.29 arasında verilmiştir. Şekil 4.26'da batarya, güneş paneli ve yük tarafından çekilen güçler yer almaktadır.



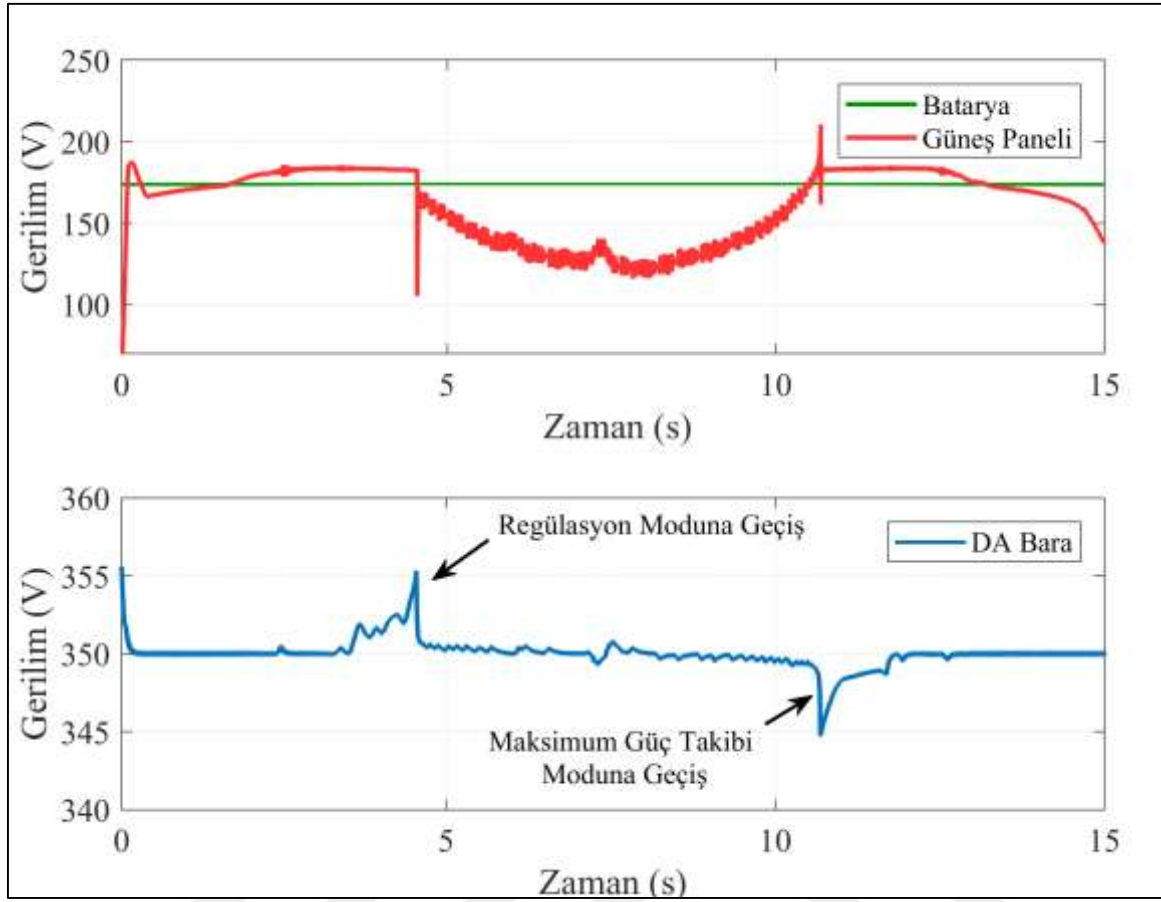
Şekil 4.26. Durum 7; yük ve kaynaklardan çekilen güçler

Şekil 4.26'da batarya devreden çıkıncaya kadar güneş paneli maksimum güç noktası takibi modunda çalışır. Batarya gücü sıfırlanmasına rağmen DA bara enerjisi yeterinden fazla olduğu ve batarya da dolu olduğu için güneş paneli maksimum güç noktası takibi modundan çıkarılmış ve DA bara sabit tutulmaya çalışılmıştır. Bataryanın desteği olmadığı için ve ısıtım sürekli değiştiği için güneş paneli gücü biraz salınımlıdır. Şekil 4.27'de dönüştürücülerin görev oranı değişimleri yer almaktadır.



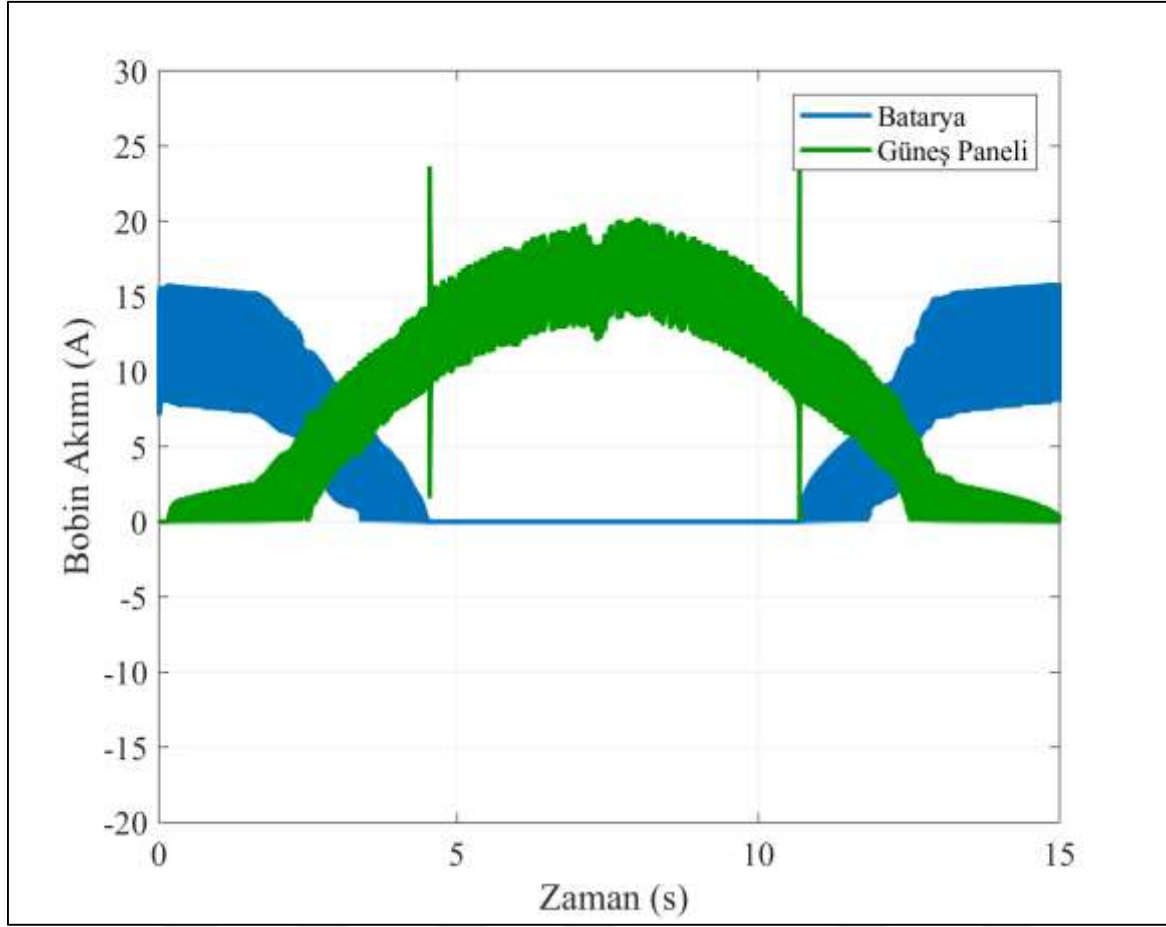
Şekil 4.27. Durum 7; dönüştürücülerin görev oranları

Şekil 4.27'de batarya görev oranının önce düştüğü sonra sıfırda sabit kaldığı görülmektedir. Güneş paneli gerilimi için ise ışınlam arttıkça gerilim değişimi hassaslaşmaktadır. Bu yüzden yük artışı ile oluşan gerilim düşümü ile güneş paneli gerilim düşümü birbirini dengelemektedir. Bu nedenle görev oranı sabit bir bölgeye sahiptir. Şekil 4.28'de batarya, güneş paneli ve DA bara gerilimleri verilmiştir.



Şekil 4.28. Durum 7; batarya, güneş paneli ve DA bara gerilimleri

Şekil 4.28’de güneş paneli gerilimi düşürülerek DA bara gerilimi sabit tutulmuştur. Yine belirlenen 5 V’luk geçiş toleransından dolayı DA bara geriliminde bir dalgalanma vardır ve bu dalgalanma %1,5’ten daha küçüktür. Şekil 4.29’da dönüştürücülerin bobin akımları yer almaktadır.



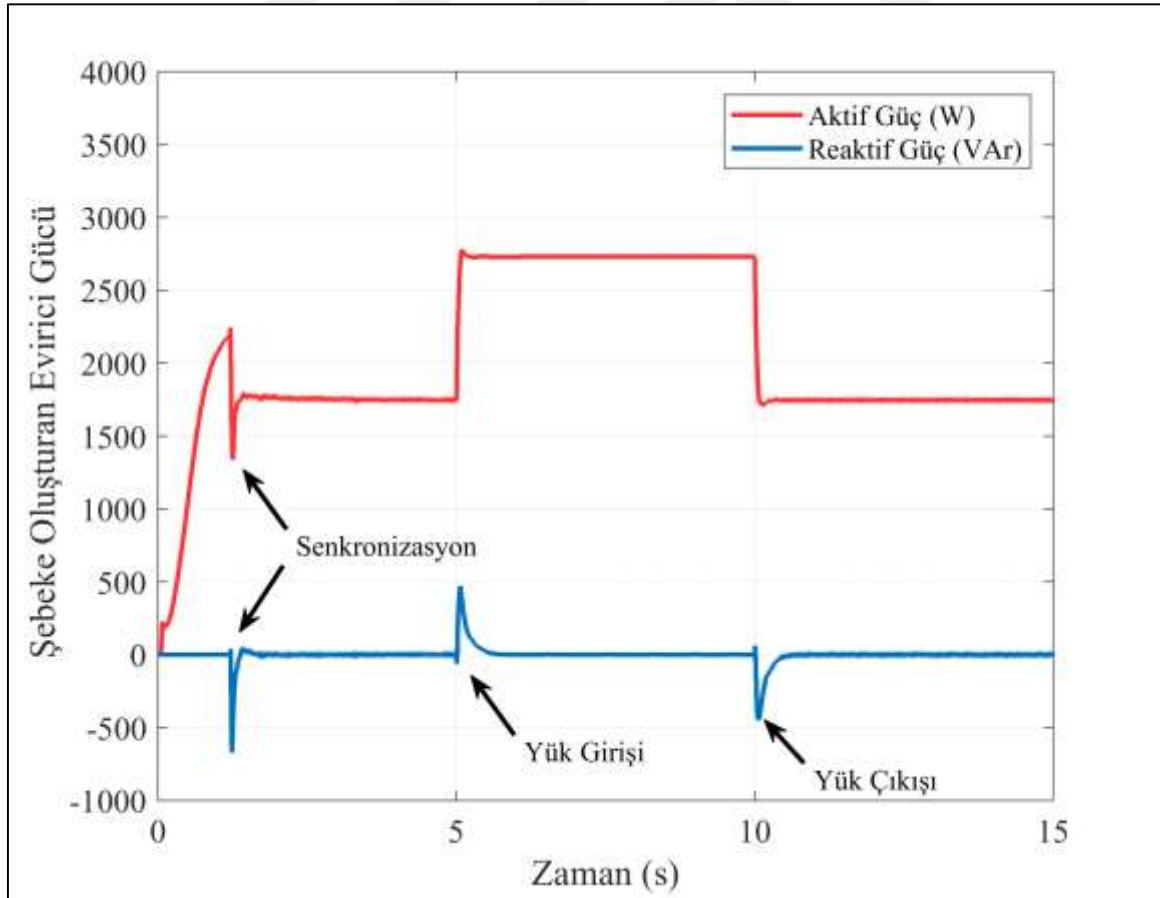
Şekil 4.29. Durum 7; dönüştürücülerin bobin akımları

Şekil 4.29'da batarya dönüştürücüsünün bobin akımının regülasyon moduna geçişte 0 A olması devreden çıktığı anlamına gelir. Güneş paneli akımının ışınlam grafiğini takip ettiği de bu grafikten anlaşılmaktadır.

DA bara analizlerinden anlaşıldığı gibi DA bara olası tüm durumlarda başarıyla kontrol edilmektedir. Özellikle dinamik geçiş anlarında DA bara gerilim seviyesi %8'ten daha az değişim göstermiştir. Burada önerilen regülasyon modu aslında verimli bir çalışma değildir. Sadece güvenlik amacıyla önerilmiştir. Normal şartlarda bu durumda mikro şebekenin ada modundan şebeke bağlantılı moda geçerek enerjisini şebekeye aktarması gereklidir. Bu çalışma durumu, bu tez konusunun dışında tutulmuştur ve ileriki çalışmalarda bu çalışma modu da hayata geçirilecektir. Ancak bir arıza veya acil bir durumda şebekeye bağlanılamaması halinde de elektriğin kesilmesine karşılık regülasyon modu daha faydalı olacaktır.

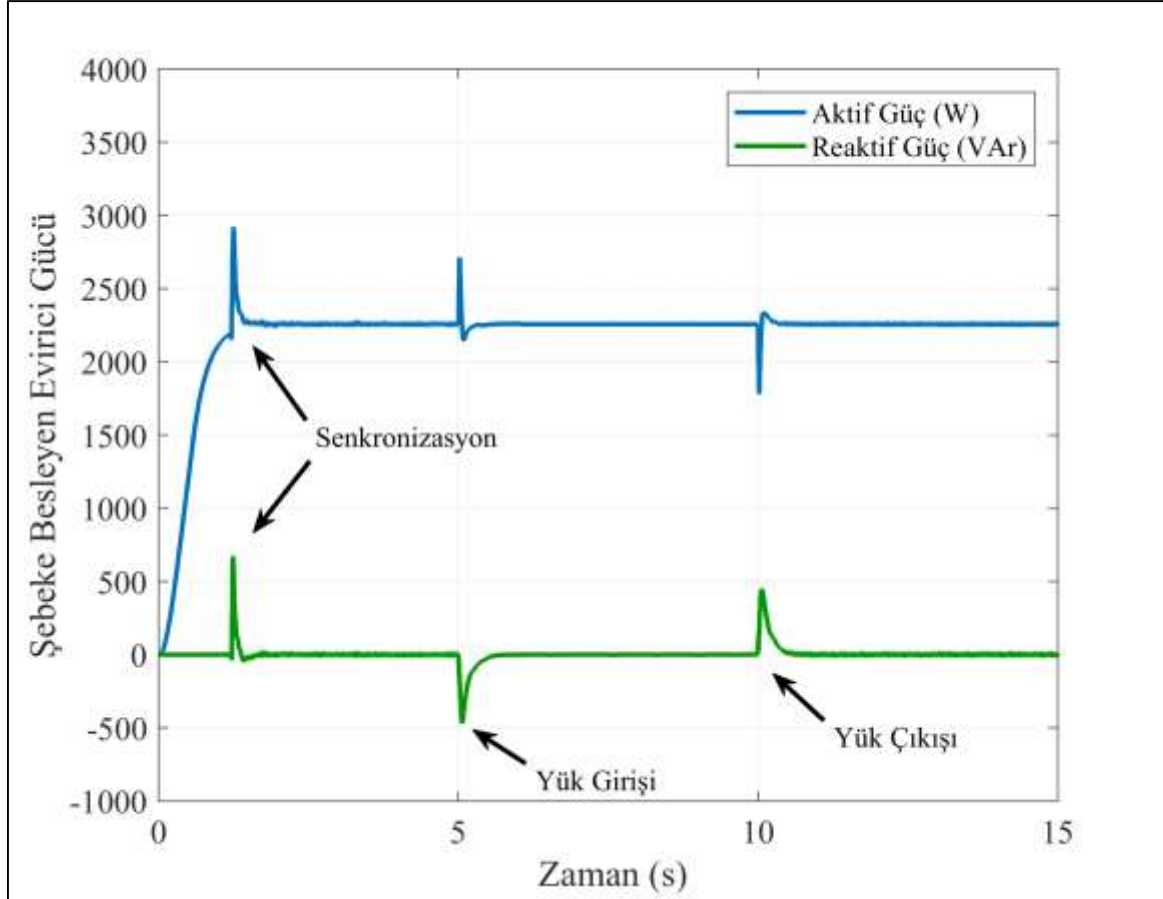
4.2. AA Bara Analizi

AA bara analizi AA baraya, aktif yük giriş-çıkışı, reaktif yük giriş-çıkışı ve rüzgâr hızı değişimi durumlarında öncelikle AA bara geriliminin kararlılığını dikkate alır. Gerilim kararlılığından sonra rüzgâr türbininin maksimum güç noktası takibi ve reaktif güç kontrolü değerlendirilir. Ayrıca tüm durumlarda AA baranın toplam harmonik bozulmasının istenen değerde yani %5'in altında kalması gerekir. Gerilim sıçramaları ise %10'un altında olmalıdır. Her test için simülasyon başlatıldıktan sonra öncelikle sistem tarafından senkronizasyon için gerekli hazırlıklar yapılır ve sistem 1,2. saniyede otomatik olarak senkronizasyona girer. Daha sonra sisteme 5. saniyede 1 KW'lık aktif yük alınmıştır ve ardından 10. saniyede devreden çıkarılmıştır. Rüzgâr hızı sabit 12 m/s ve türbin aktif gücü 2,3 KW seviyelerindedir. Türbin reaktif gücü ise 0 VAr seviyesinde tutulmaktadır. Şebeke oluşturan evirici aktif gücü 1,7 KW civarındadır. Şekil 4.30-4.36 arasında aktif yük testine ait grafikler yer almaktadır.



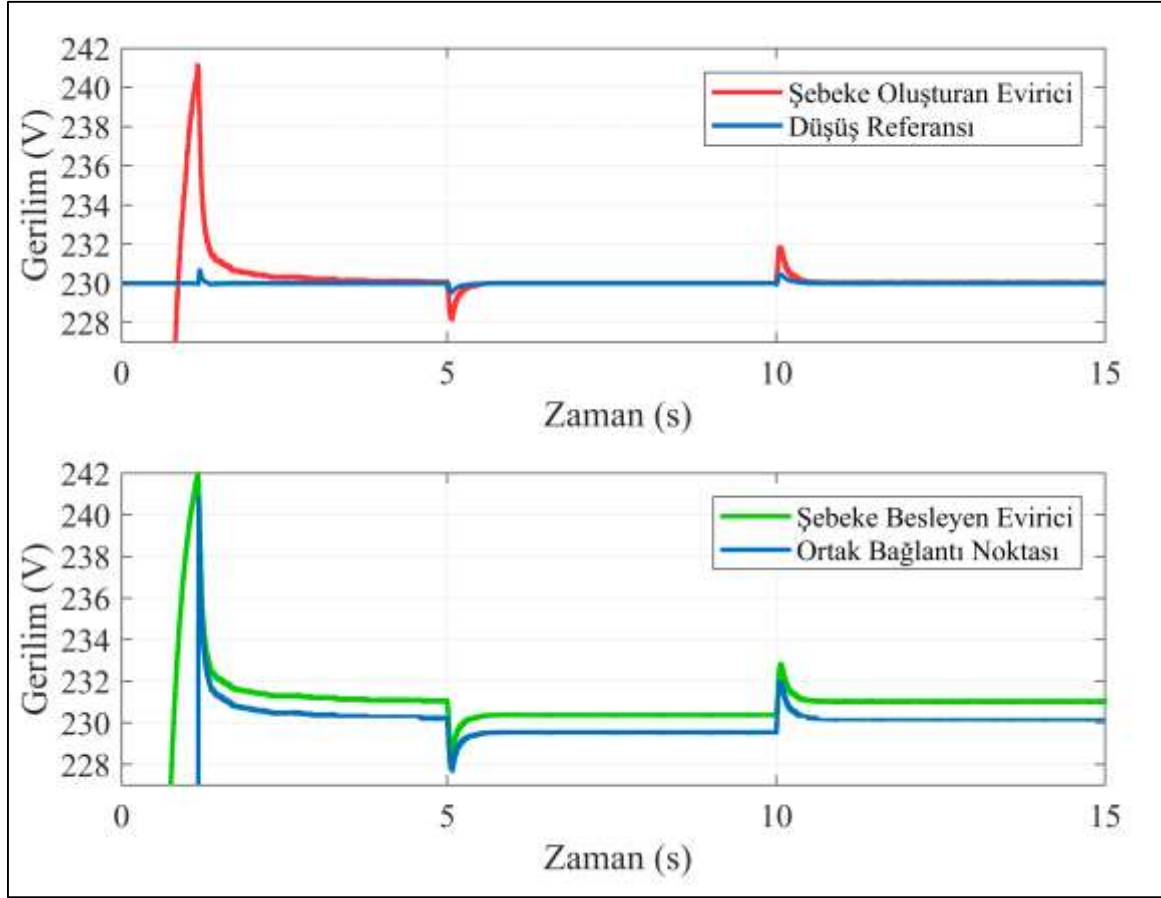
Şekil 4.30. Aktif yük testi; şebeke oluşturan evirici güçleri

Şekil 4.30'da şebeke oluşturan eviricinin aktif ve reaktif güçleri verilmiştir. Görüldüğü gibi 5. saniyede eviricinin gücü 1 KW artmış ve 10. saniyede 1 KW azalmıştır. Sistemde reaktif güç olmadığı için reaktif güç 0'dır. Geçiş anlarında türbin dinamik tepkisinden dolayı gerilim salınımı oluşmaktadır. Bu nedenle reaktif güç sıçraması yaşanmaktadır.



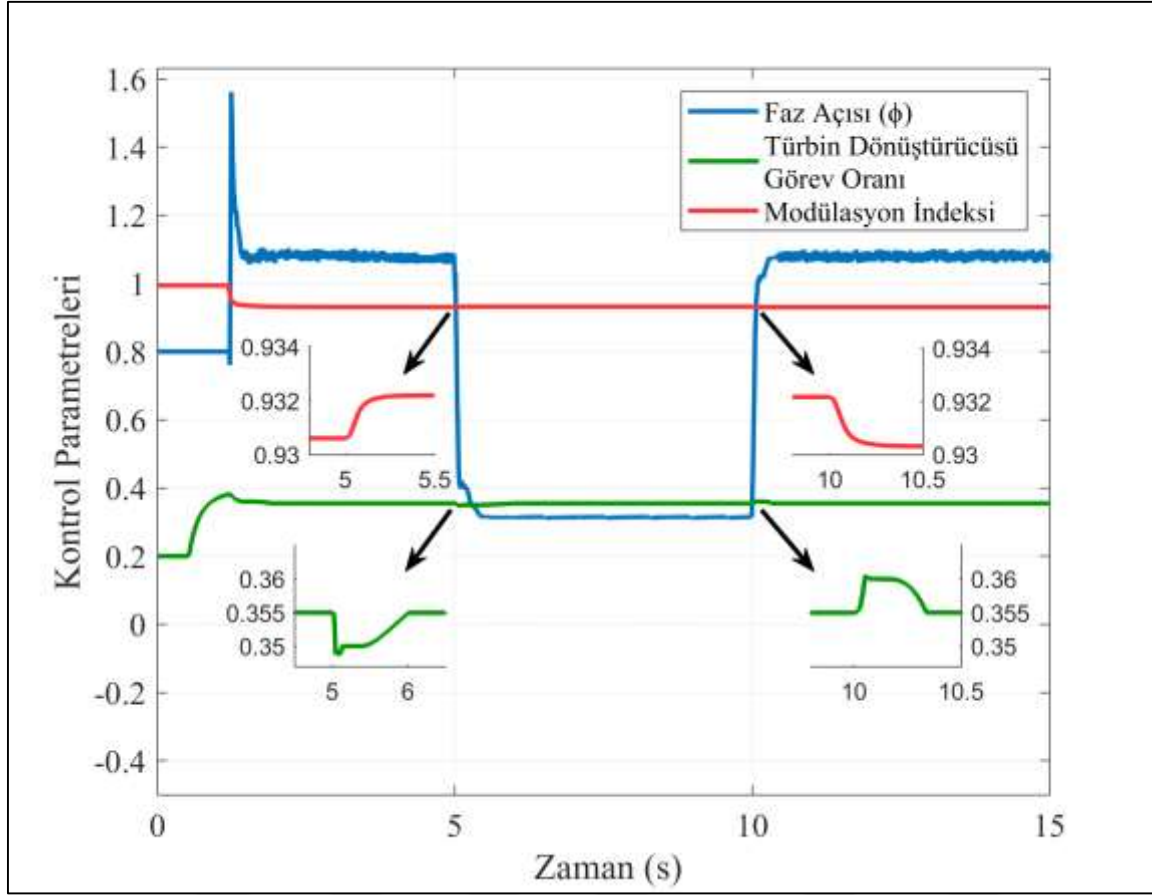
Şekil 4.31. Aktif yük testi; şebeke besleyen evirici güçleri

Şekil 4.31'de şebeke besleyen evirici güçleri verilmiştir. Rüzgâr hızı sabit olduğu için aktif gücü sabittir. Reaktif güç ise 0 VAr seviyesinde tutulmaktadır.



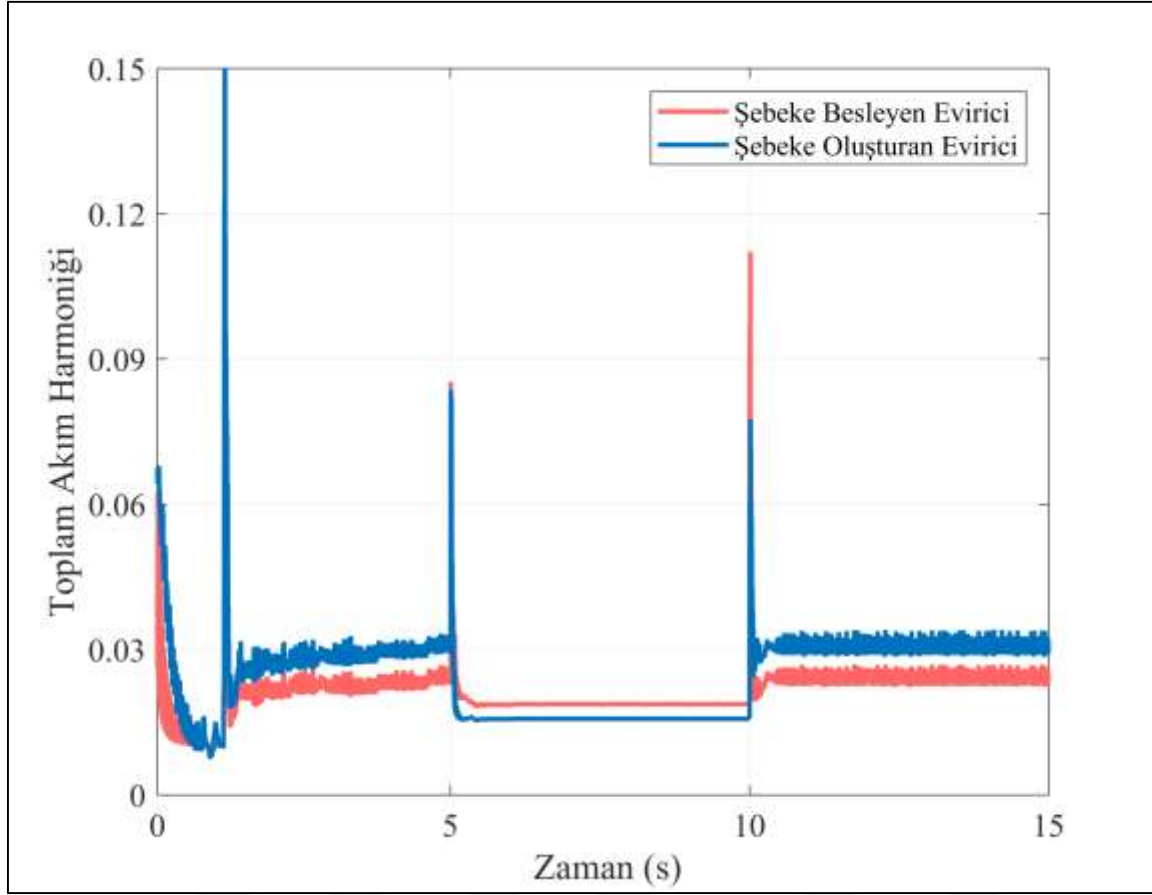
Şekil 4.32. Aktif yük testi; AA bara gerilimleri

Şekil 4.32’de AA baradaki farklı noktalardaki gerilimler verilmiştir. Gerilim sıçramaları %1’den küçüktür. Senkronizasyon esnasında bir sıçrama var gibi görünse de 241 V türbinin senkronizasyon öncesi gerilimidir. Şebeke oluşturan evirici bu noktada senkronizasyona girerek gerilimi düzenler. Şebeke oluşturan evirici düşüş referansını takip etmeye çalışmaktadır. Şebeke besleyen evirici ve yük arasındaki gerilim farkı hat direncinden kaynaklanmaktadır.



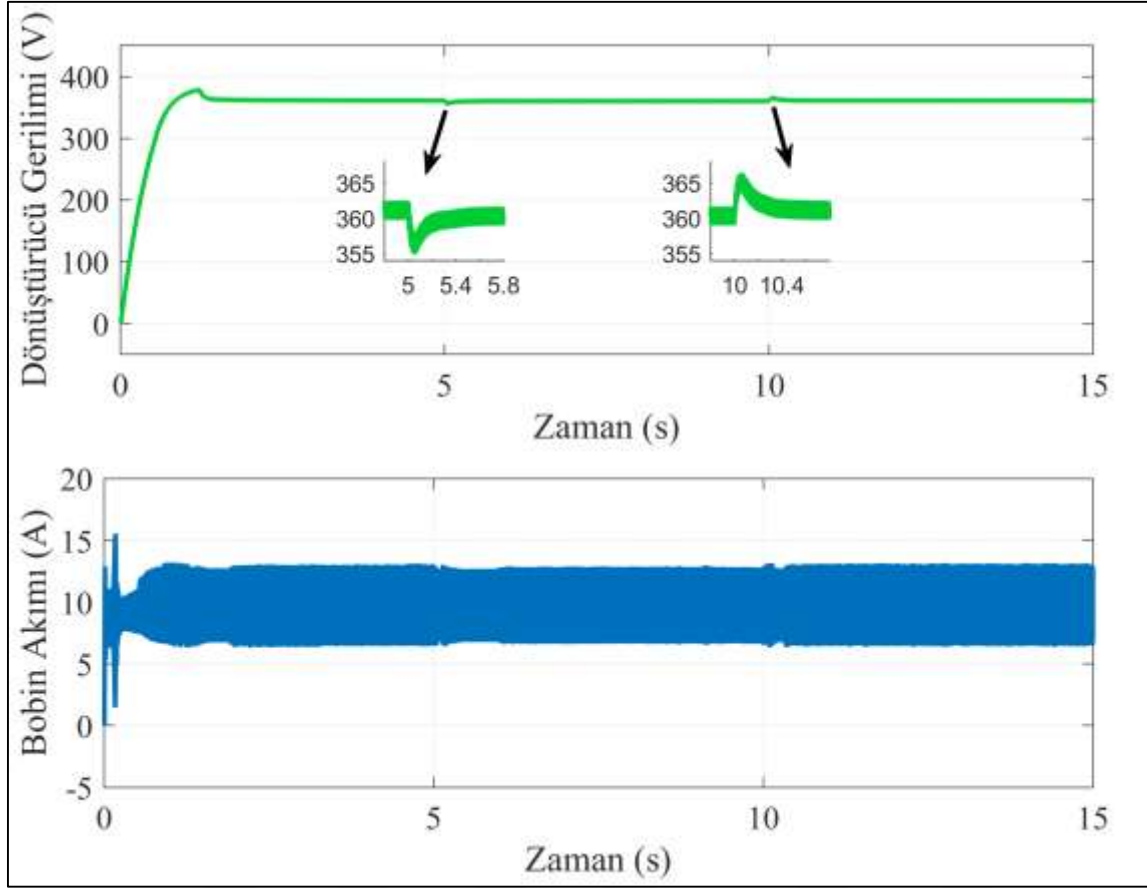
Şekil 4.33. Aktif yük testi; kontrol parametreleri

Şekil 4.33'te verilen kontrol parametreleri şebeke besleyen evirici faz açısı, türbin yükselten dönüştürücünün görev oranı ve şebeke oluşturan evirici modülasyon indeksidir. Görüldüğü gibi yük girişinde hem gerilim, hem aktif güç hem de türbin hızı değişim göstermiştir.



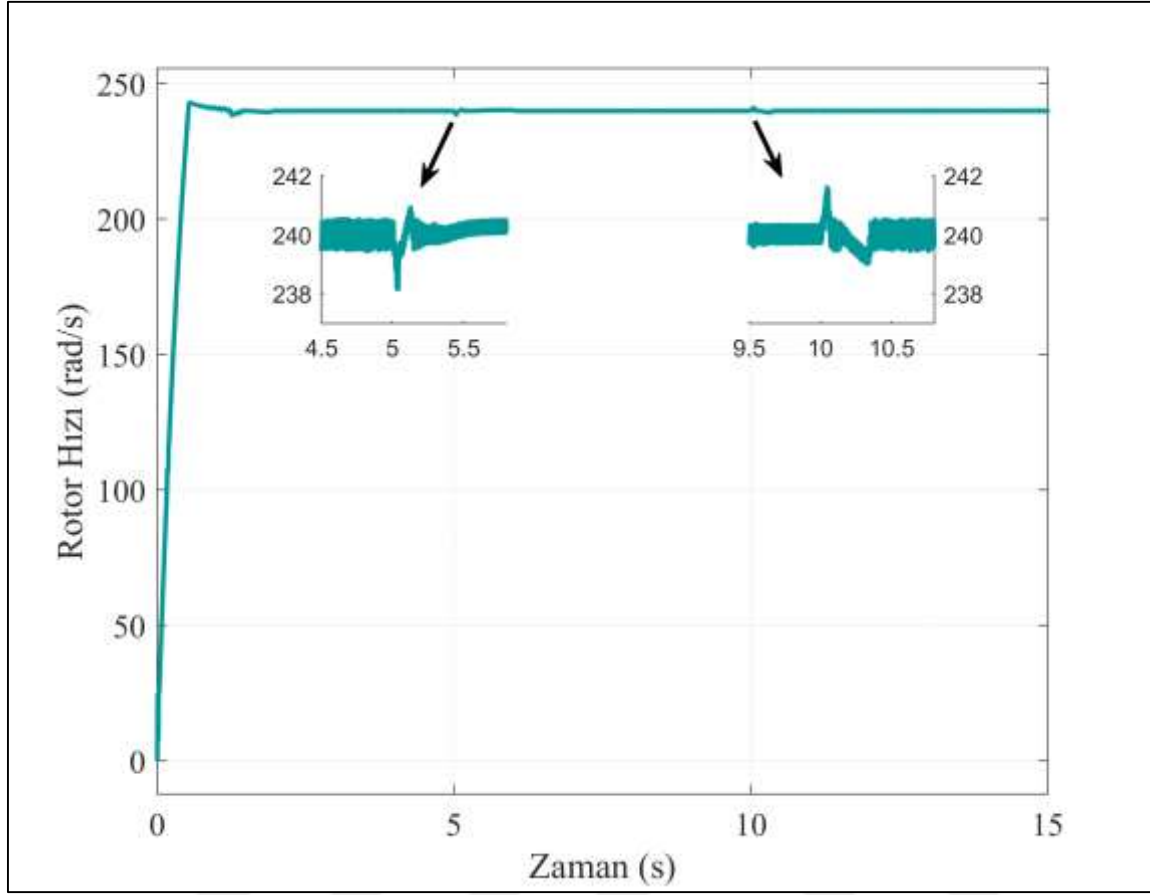
Şekil 4.34. Aktif yük testi; toplam akım harmoniği

Şekil 4.34'te geçiş noktaları haricinde toplam akım harmoniğinin %5'in altında olduğu görülmektedir. Burada ani geçişlerde harmonik ölçümü için küçük bir süre gereklidir. Bu kısa geçiş süresinde oluşan sıçramanın bir bölümünün nedeni budur.



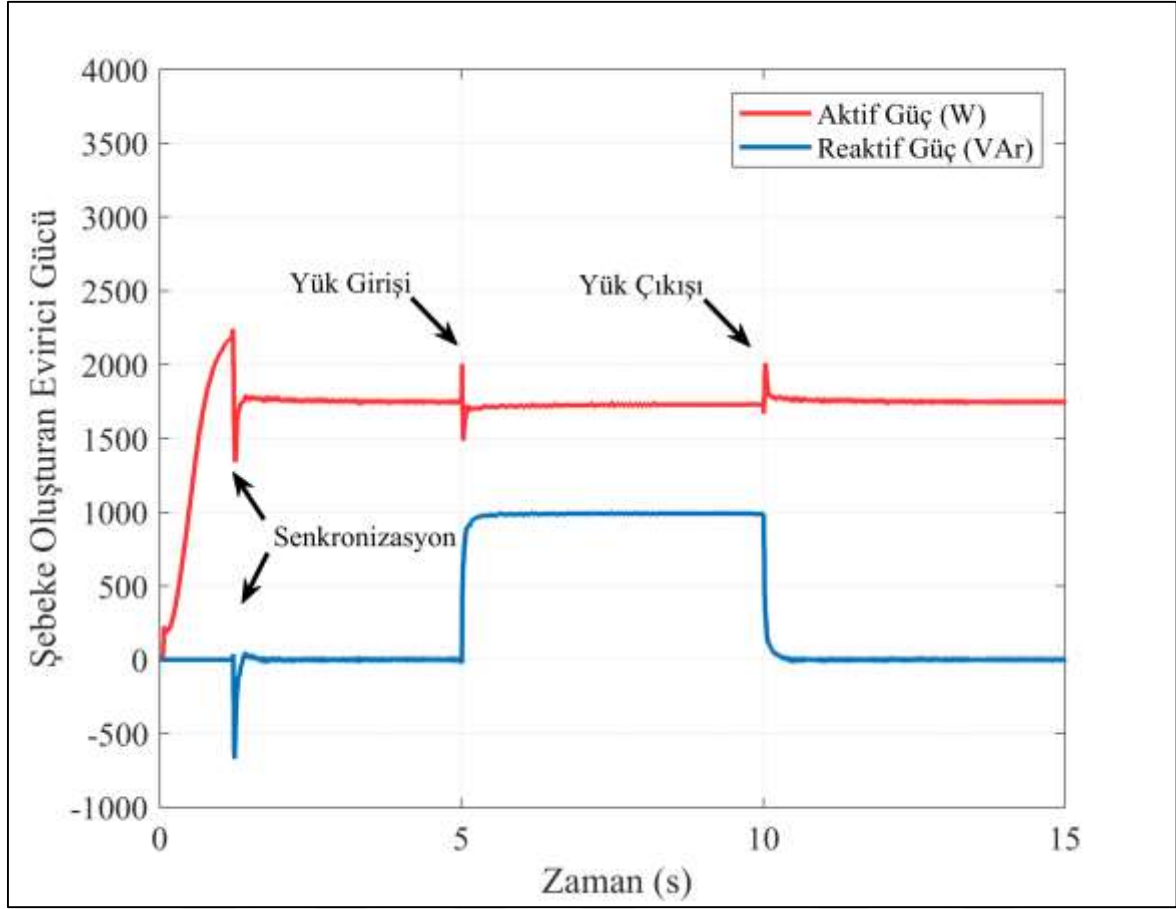
Şekil 4.35. Aktif yük testi; türbin dönüştürücüsü gerilimi ve akımı

Şekil 4.35'te türbin dönüştürücüsünün gerilimi ve akımı, Şekil 4.36'da ise türbin rotor hızı verilmiştir. Yük giriş-çıkışlarında %1,5'ten küçük gerilim salınımı ve %1'den küçük rotor hızı salınımı olduğu görülmektedir.



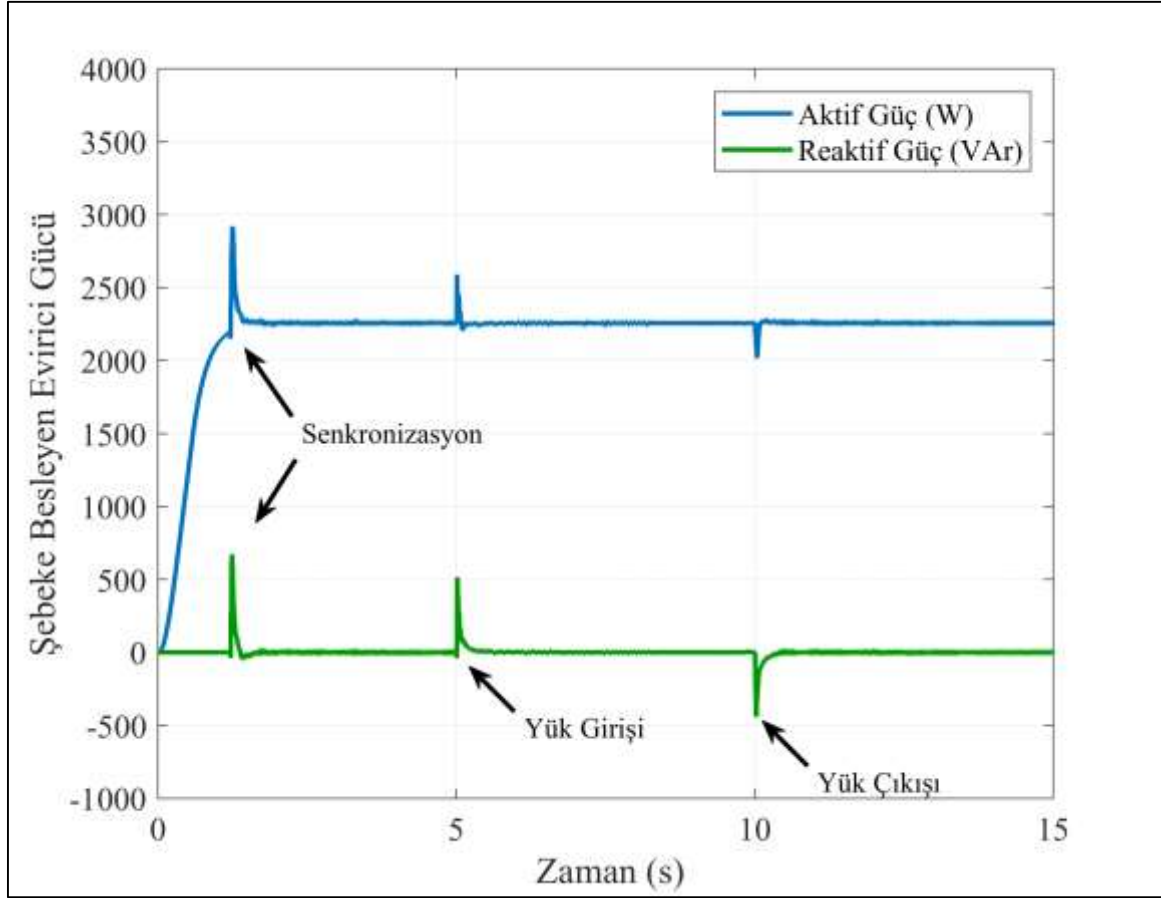
Şekil 4.36. Aktif yük testi; türbin rotor hızı

İkinci durum çalışması ise AA baraya 1 KVar'lık reaktif yük giriş-çıkış testidir. Sistem her testte 1,2. saniyede otomatik olarak senkronizasyona girer. Daha sonra sisteme 5. saniyede 1 KVar'lık reaktif yük alınmıştır ve ardından 10. saniyede devreden çıkarılmıştır. Rüzgâr hızı sabit 12 m/s ve türbin aktif gücü 2,3 KW seviyelerindedir. Türbin reaktif gücü ise 0 VAr seviyesinde tutulmaktadır. Şebeke oluşturan eviricinin aktif gücü 1,7 KW civarında sabittir. Şekil 4.37-4.41 arasında reaktif yük testine ait grafikler yer almaktadır.



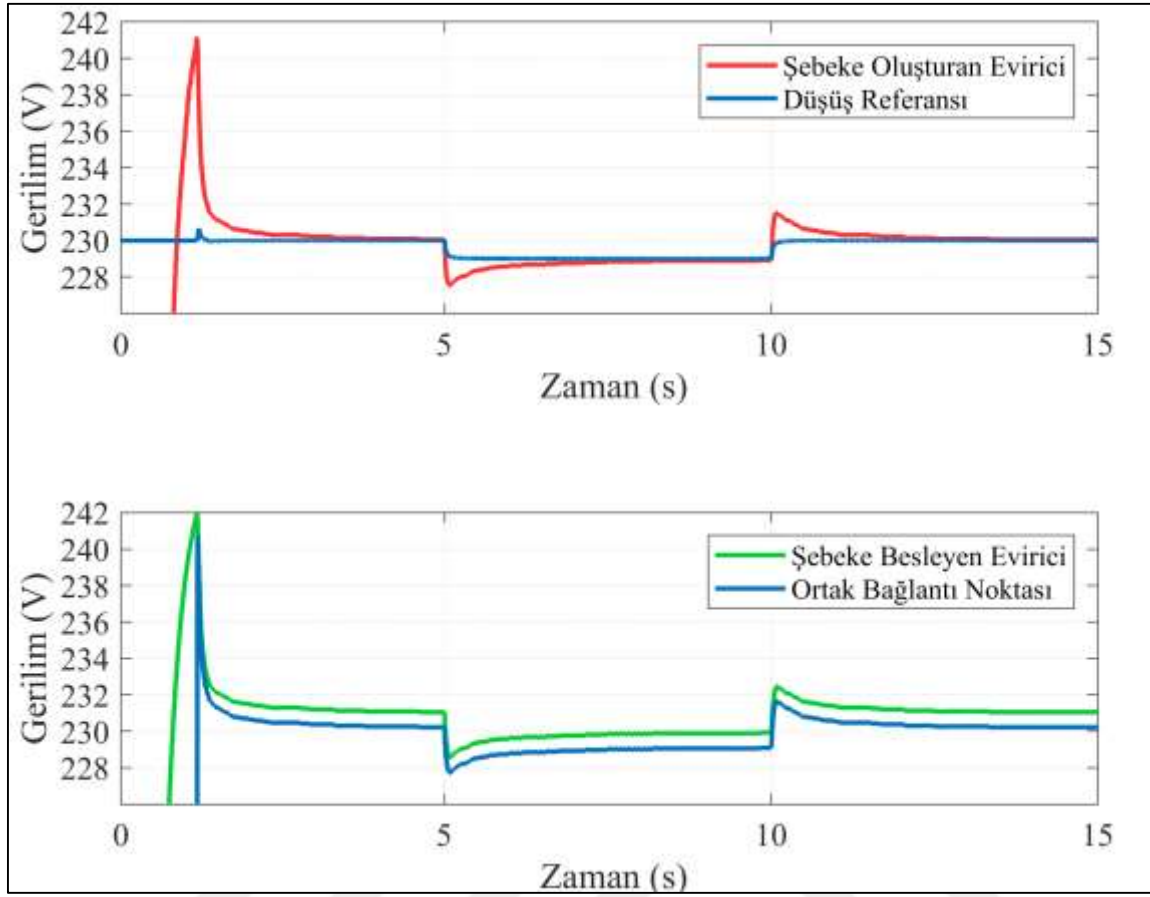
Şekil 4.37. Reaktif yük testi; şebeke oluşturan evirici güçleri

Şekil 4.37’de şebeke oluşturan eviricinin aktif ve reaktif güçleri verilmiştir. Görüldüğü üzere şebeke oluşturan eviricinin reaktif gücü 5. saniyede artmış ve 10. saniyede eski seviyesine geri dönmüştür.



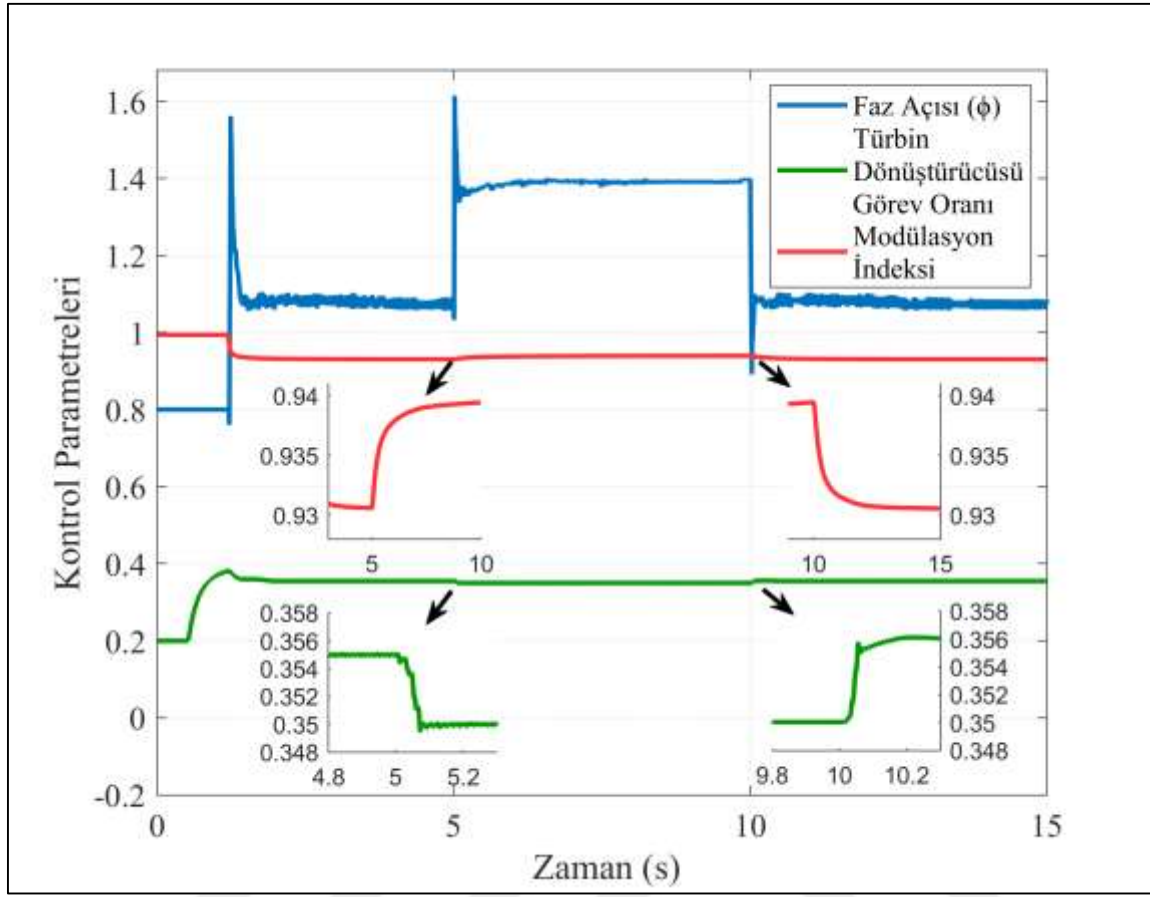
Şekil 4.38. Reaktif yük testi; şebeke besleyen evirici güçleri

Şekil 4.38’de şebeke besleyen evirici güçleri verilmiştir. Görüldüğü gibi rüzgâr hızı sabit olduğu için geçişler dışında şebeke besleyen eviricinin aktif ve reaktif güçleri sabittir.



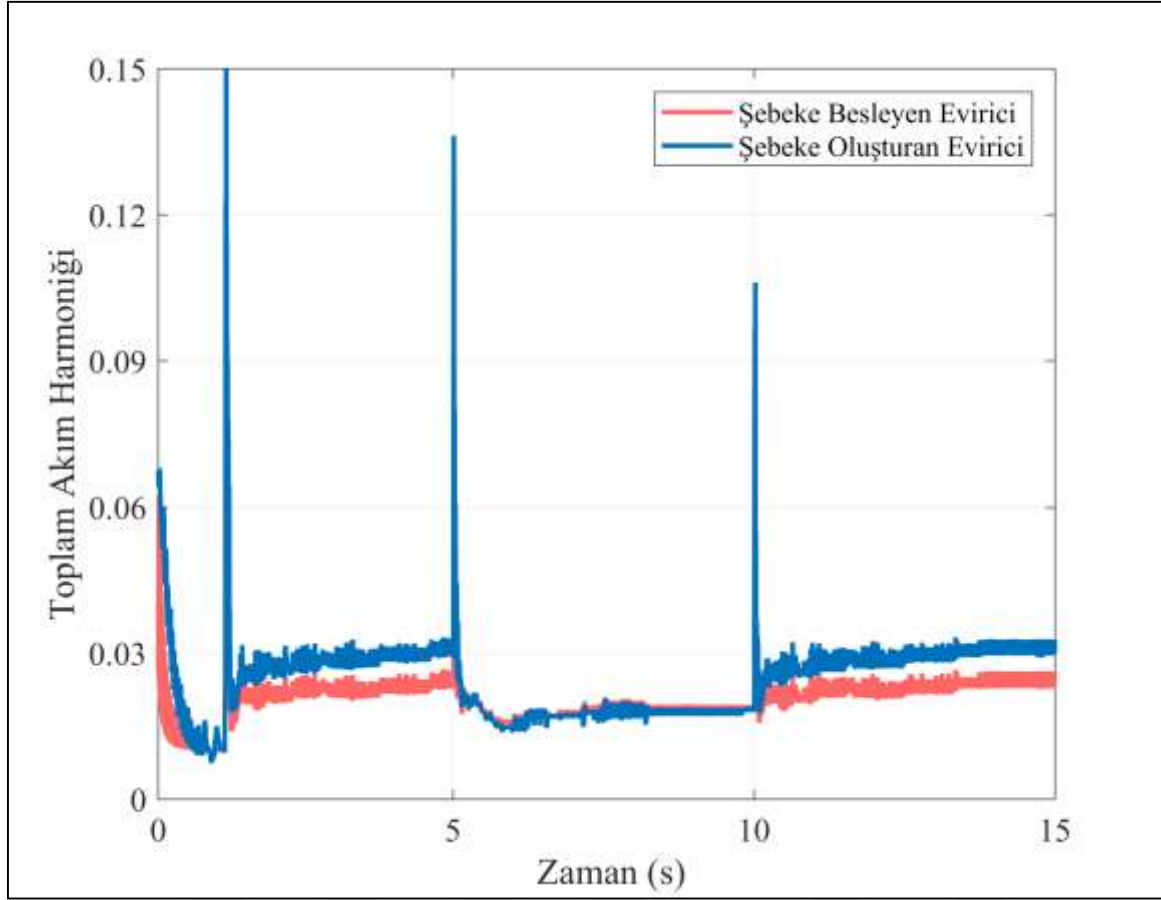
Şekil 4.39. Reaktif yük testi; AA bara gerilimleri

Şekil 4.39’da AA bara gerilimleri verilmiştir. Yine 1,2. saniyede 241 V’luk gerilim rüzgâr türbini senkronizasyon öncesi gerilimidir. Senkronizasyondan sonra şebeke oluşturan evirici AA bara gerilim seviyesini düzenler. Gerilim dalgalanmaları %1,5’ten küçüktür. Şebeke besleyen evirici ile yük arasındaki gerilim farkı hat direncinden kaynaklanmaktadır.



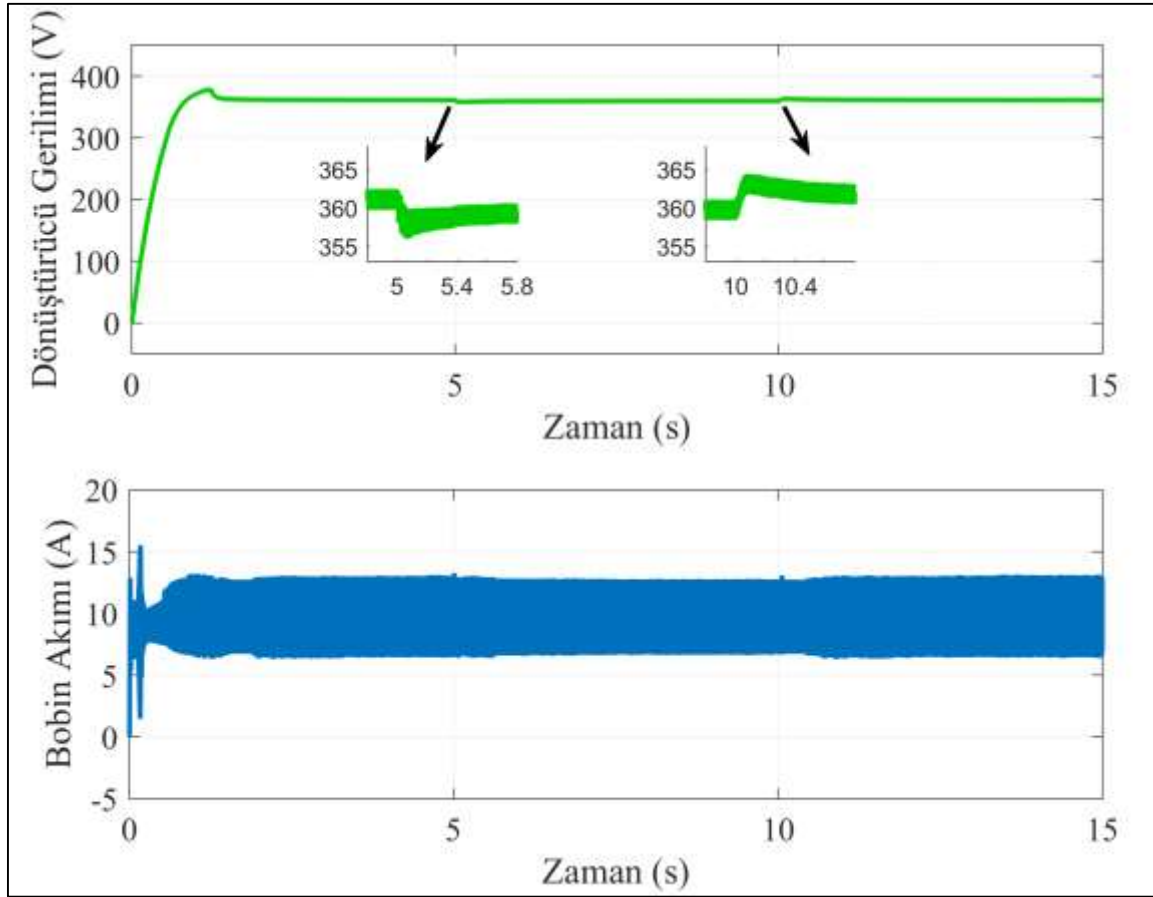
Şekil 4.40. Reaktif yük testi; kontrol parametreleri

Şekil 4.40'ta verilen kontrol parametreleri şebeke besleyen evirici faz açısı, türbin yükselten dönüştürücünün görev oranı ve şebeke oluşturan evirici modülasyon indeksidir. Reaktif yük devreye girdiğinde AA bara gerilimi düşmeye başlar. Modülasyon indeksi artarak gerilimi dengelemeye çalışır. İlk anda rüzgâr türbini de reaktif yük alır. Buna tepki olarak faz açısı artarak reaktif güç şebeke oluşturan eviriciye kaydırılır. Bu arada rotor hızı düşmeye başladığı için görev oranı düşer. Böylece çekilen akım azaltılır ve rotor hızı normale döner.



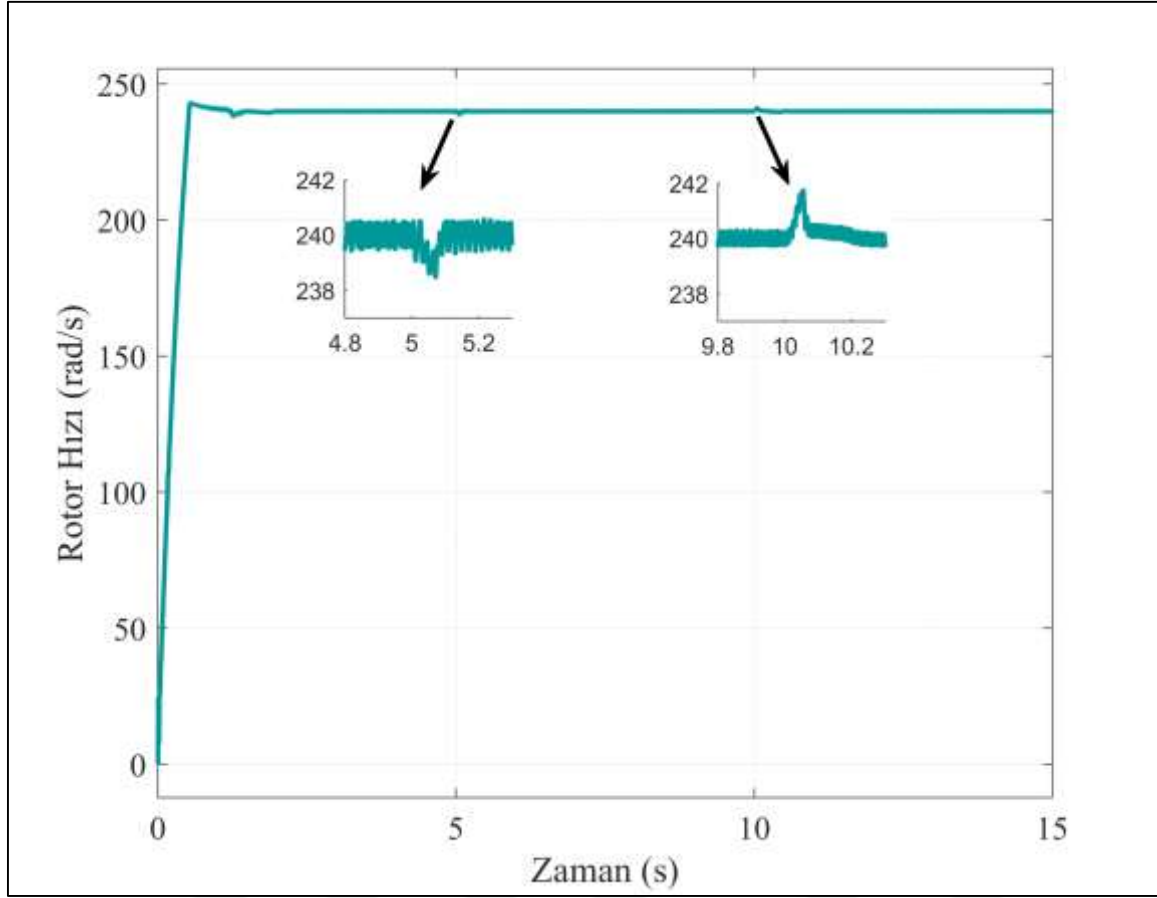
Şekil 4.41. Reaktif yük testi; toplam akım harmoniği

Şekil 4.41’de toplam akım harmoniği verilmiştir. Görüldüğü üzere eviricilerin çıkış akımları harmoniği %5’in altındadır.



Şekil 4.42. Reaktif yük testi; türbin dönüştürücüsü gerilimi ve akımı

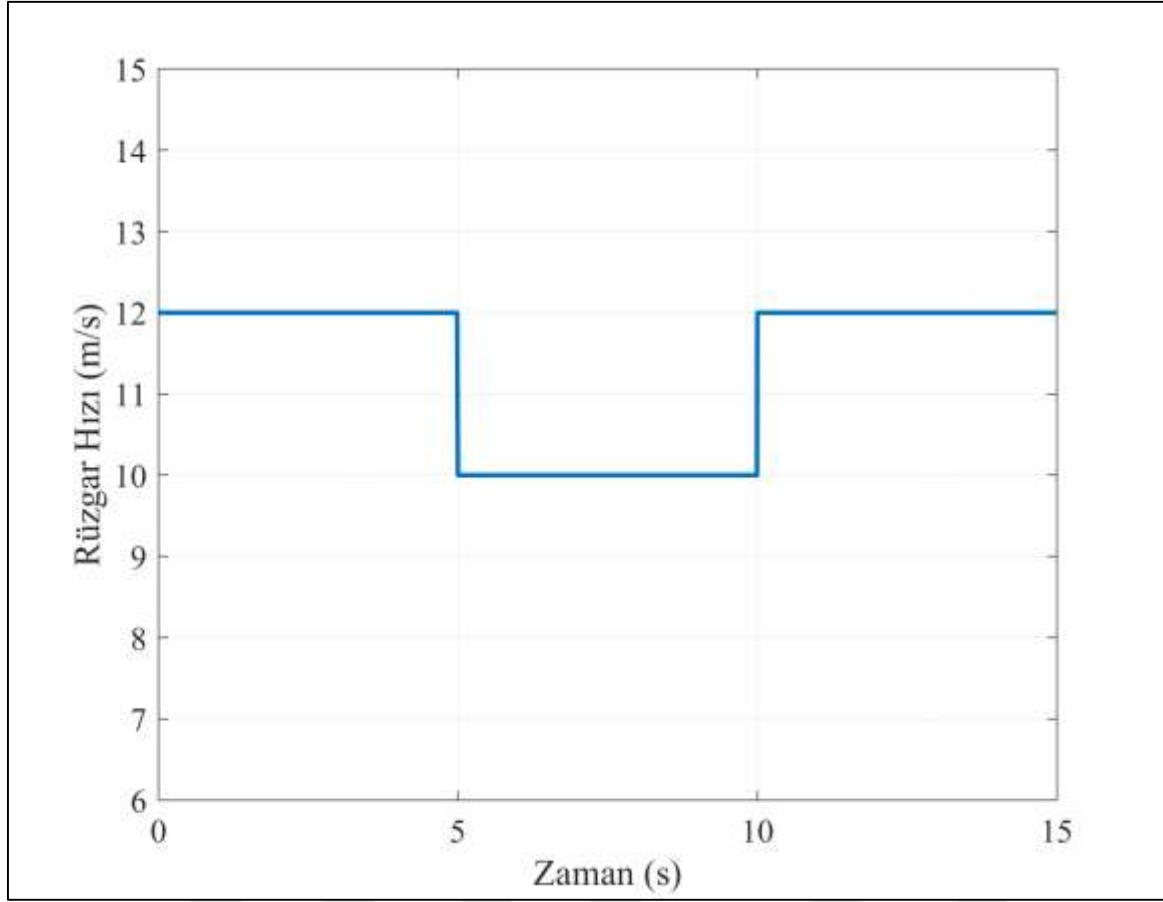
Şekil 4.42’de rüzgâr türbini dönüştürücüsünün çıkış gerilimi ve bobin akımı verilmiştir. Bu gerilim aynı zamanda şebeke besleyen eviricinin DA besleme gerilimidir. Gerilim dalgalanması %1,5’in altındadır.



Şekil 4.43. Reaktif yük testi; türbin rotor hızı

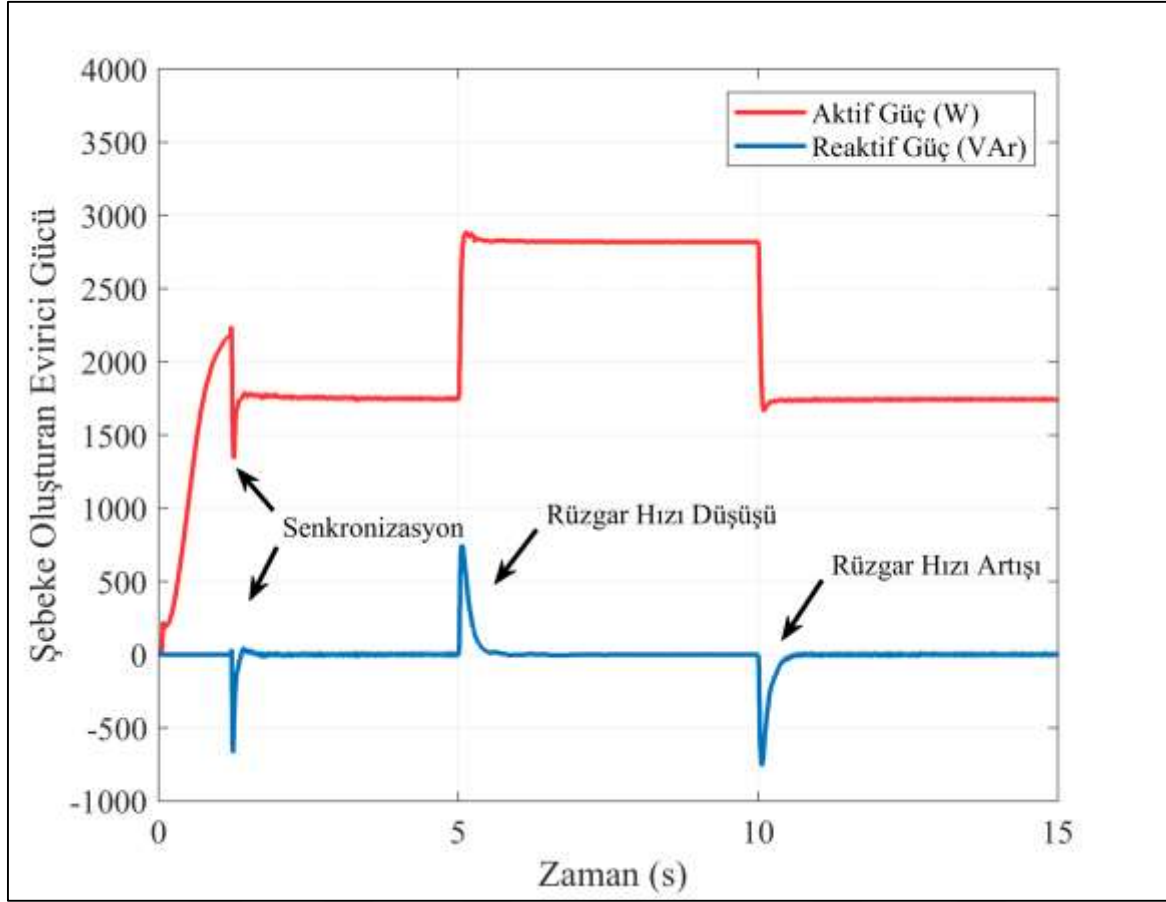
Şekil 4.43'te rüzgâr türbini rotor hızı grafiği yer almaktadır. Buradan, geçiş durumlarında hız değişiminin %1'in altında olduğu görülmektedir.

Üçüncü durum çalışması ise rüzgâr hızı değişimi testidir. Sistem her testte 1,2. saniyede otomatik olarak senkronizasyona girer. Türbin aktif gücü ilk başta 2,3 KW ve reaktif gücü 0 KVAR değerindedir. Şebeke oluşturan evirici aktif gücü 1,7 KW ve reaktif gücü 0 KVAR değerindedir. Şekil 4.44'te görülen rüzgâr hızı grafiği ile 5. saniyede rüzgâr hızı 12 m/s'den 10 m/s hıza düşürülmektedir. 10. saniyede ise tekrar 12 m/s hıza çıkarılmaktadır. Türbin reaktif gücü ise 0 VAR seviyesinde tutulmaktadır. Şekil 4.45-4.51 arasında rüzgâr hızı testine ait grafikler yer almaktadır.



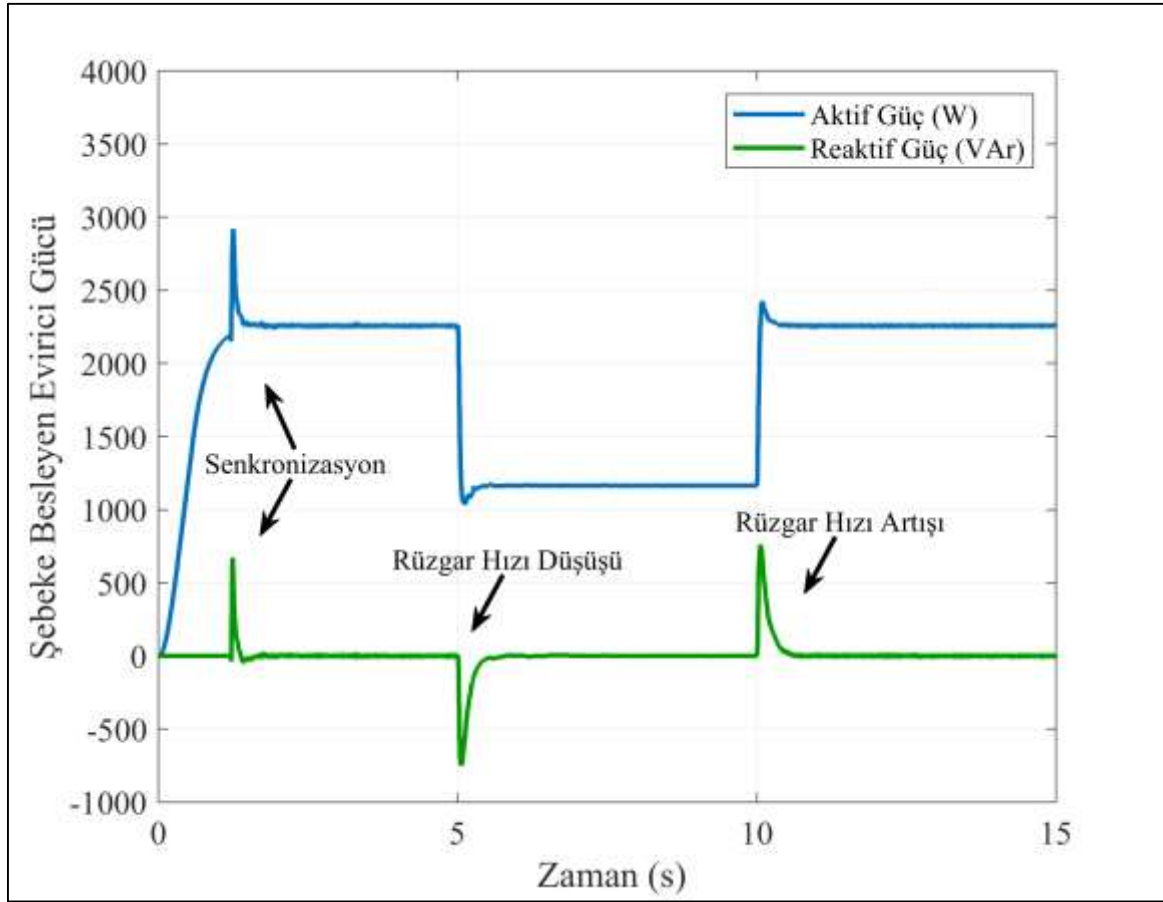
Şekil 4.44. Rüzgâr türbinine uygulanan rüzgâr hızı grafiği

Şekil 4.44'te rüzgâr hızı 5. saniyeye kadar 12 m/s'dir. 5. saniyede rüzgâr hızı 2 m/s düşürülerek darbe hız düşüşü oluşturulur. 10. saniyede 2 m/s hız yükselişi ile darbe hız yükselişi elde edilir. Böylece sistemin dinamik hız değişimine verdiği tepki analiz edilmiştir.



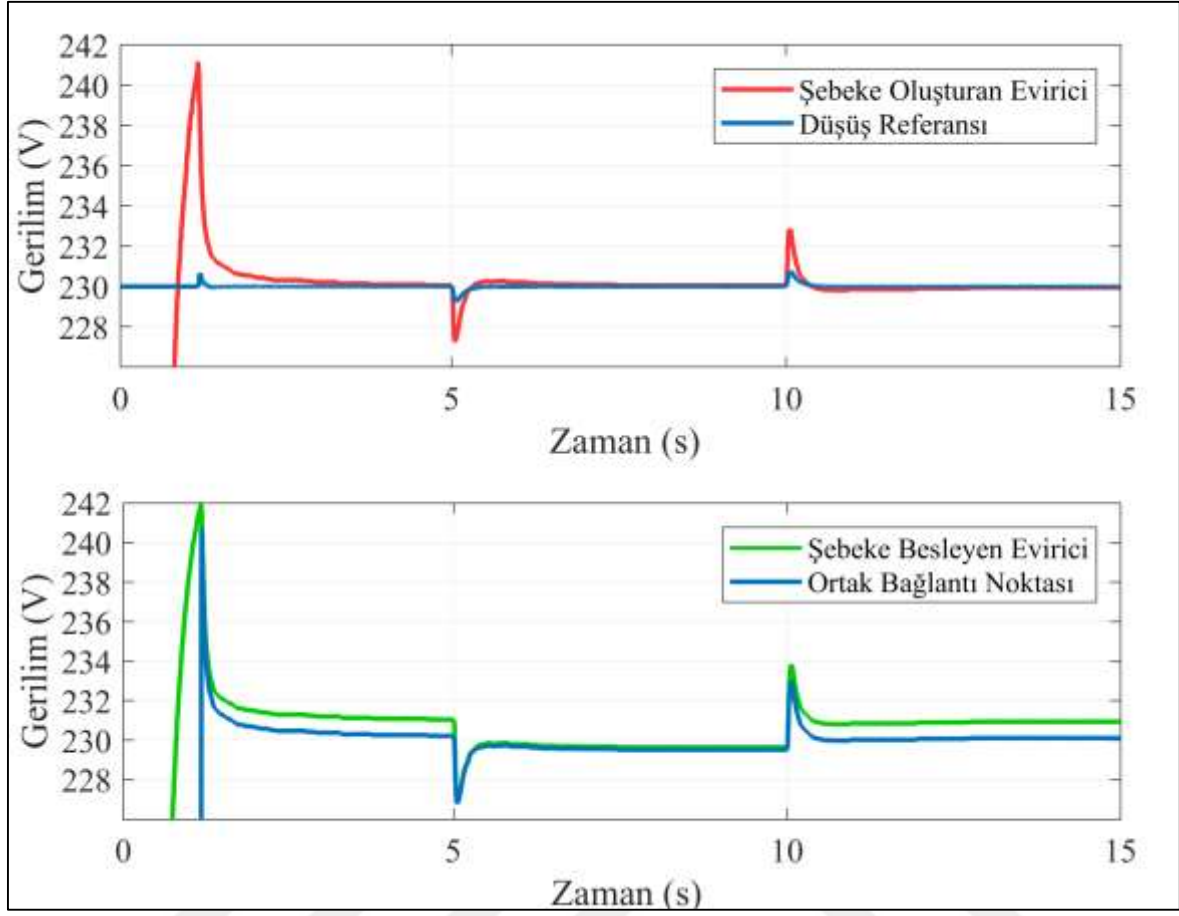
Şekil 4.45. Rüzgâr hızı değişimi testi; şebeke oluşturan evirici güçleri

Şekil 4.45'te şebeke oluşturan eviricinin aktif ve reaktif güçleri verilmiştir. Görüldüğü üzere rüzgâr hızı 5. saniyede düştüğünde türbin gücü de düştüğü için şebeke oluşturan eviricinin aktif gücü yükselmiştir. Devrede reaktif güç olmadığı için reaktif güç sıfırdır.



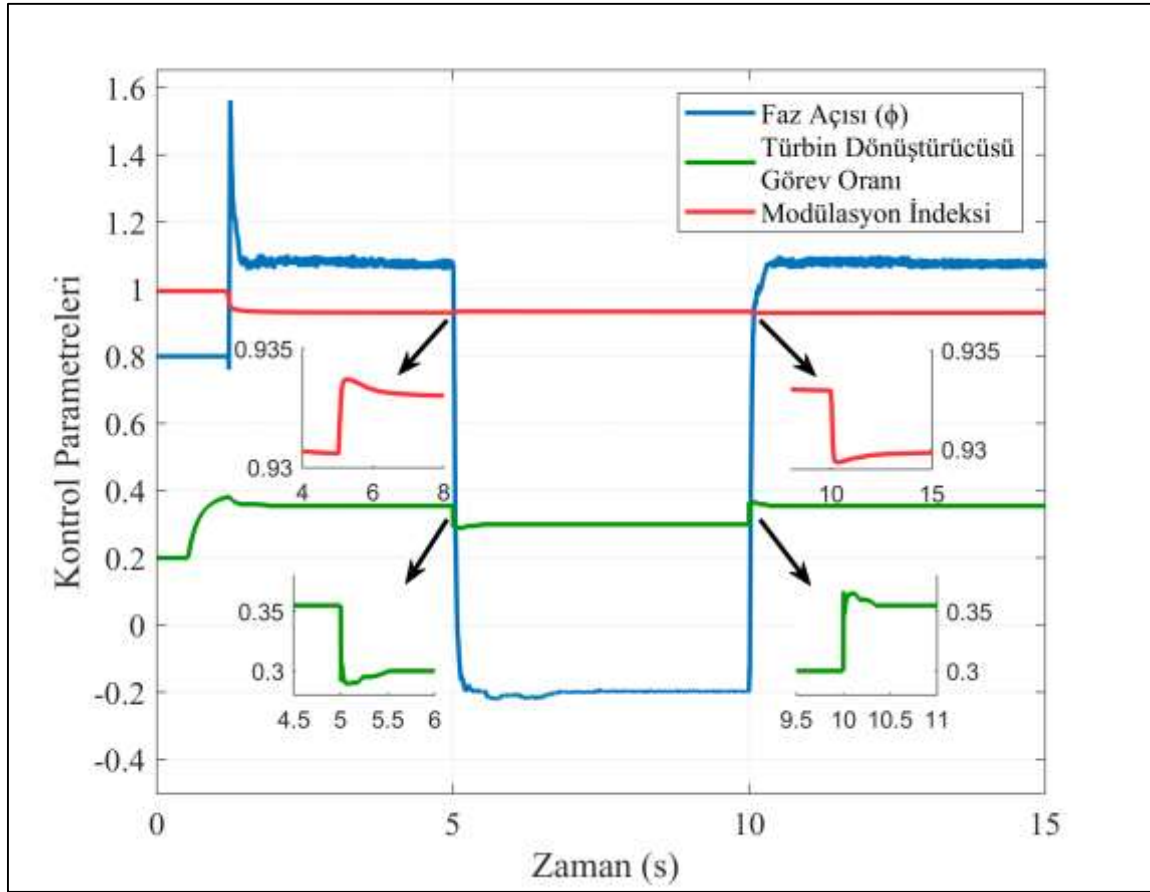
Şekil 4.46. Rüzgâr hızı değişimi testi; şebeke besleyen evirici güçleri

Şekil 4.46’da şebeke besleyen evirici güçleri verilmiştir. Buradan rüzgâr hızı düşüncü aktif gücün düştüğü ve reaktif gücün sabit tutulduğu, rüzgâr hızı yükselince aktif gücün yükseldiği anlaşılmaktadır.



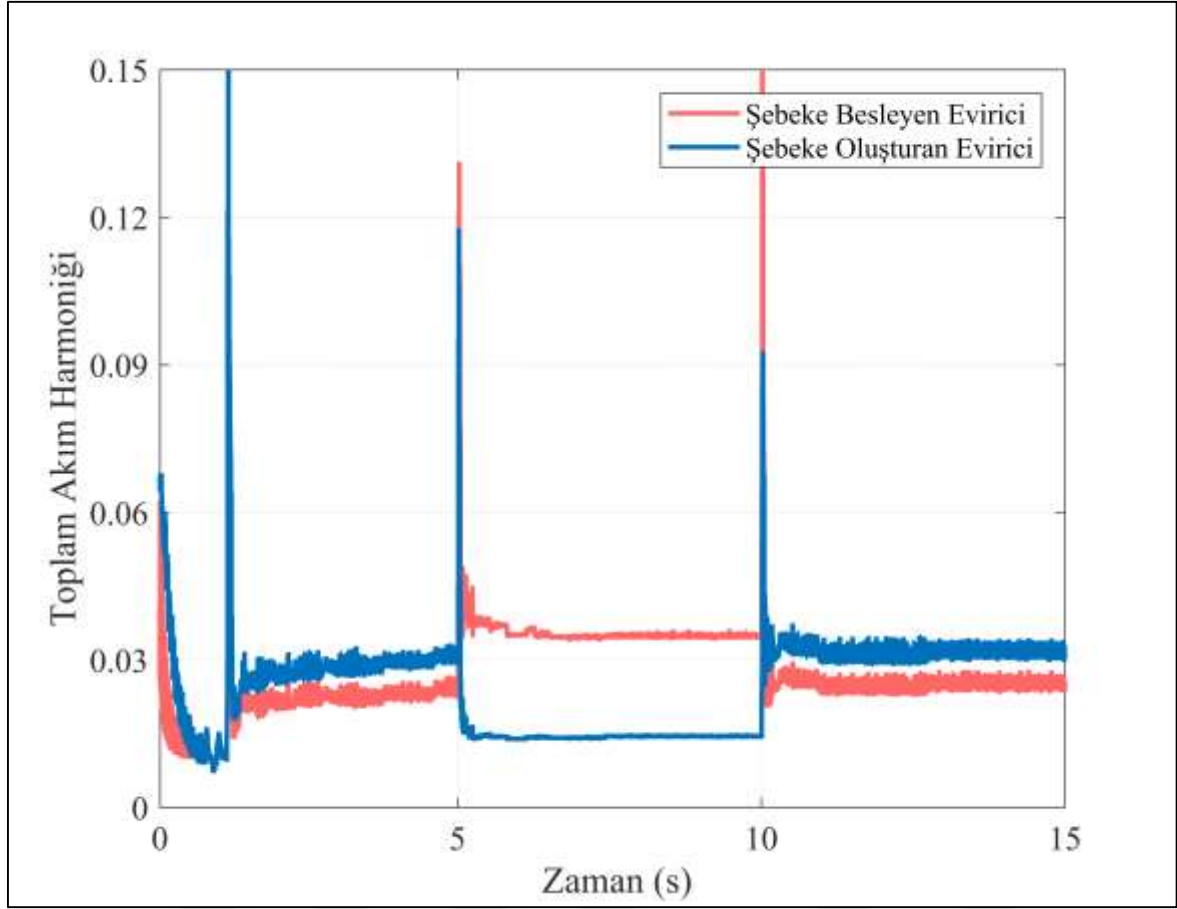
Şekil 4.47. Rüzgâr hızı değişimi testi; AA bara gerilimleri

Şekil 4.47’de AA bara gerilimleri verilmiştir. Aynı şekilde sistem 1,2. saniyede senkrona 241 V değerinde girmiş ve daha sonra gerilim düzenlemesi 230 V’ta sağlanmıştır. Gerilim salınımları maksimum %1,3 civarındadır.



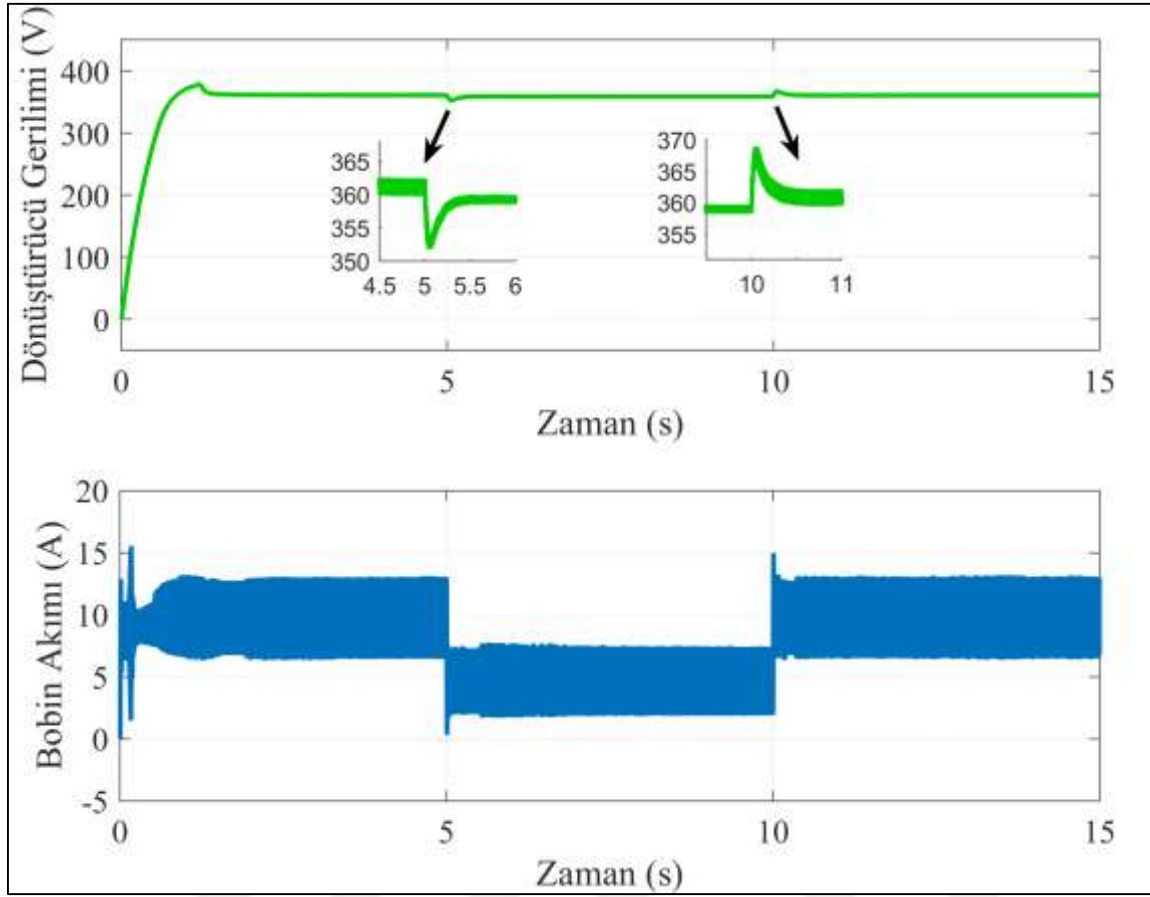
Şekil 4.48. Rüzgâr hızı değişimi testi; kontrol parametreleri

Şekil 4.48’de kontrol parametreleri yer almaktadır. Faz açısı, türbin gücü düştüğü için yük atmak amacıyla 5. saniyede düşmüştür. 10. saniyede rüzgâr hızına bağlı olarak eski seviyesine dönmüştür. Modülasyon indeksi, rüzgâr hızı düşünce türbin katkısı azaldığından, gerilim düşüşü yaşandığı için bir miktar artmıştır. Görev oranı ise rüzgâr hızı düşüşünde maksimum güç noktası takibi için gerekli uç hız oranının düşmesinden dolayı (Bkz. Eş. 2.76) rotor hızını dengelemek için düşmüştür. Çünkü aynı yük durumunda rüzgâr hızının düşmesi rotor hızını daha fazla düşürme eğilimindedir.



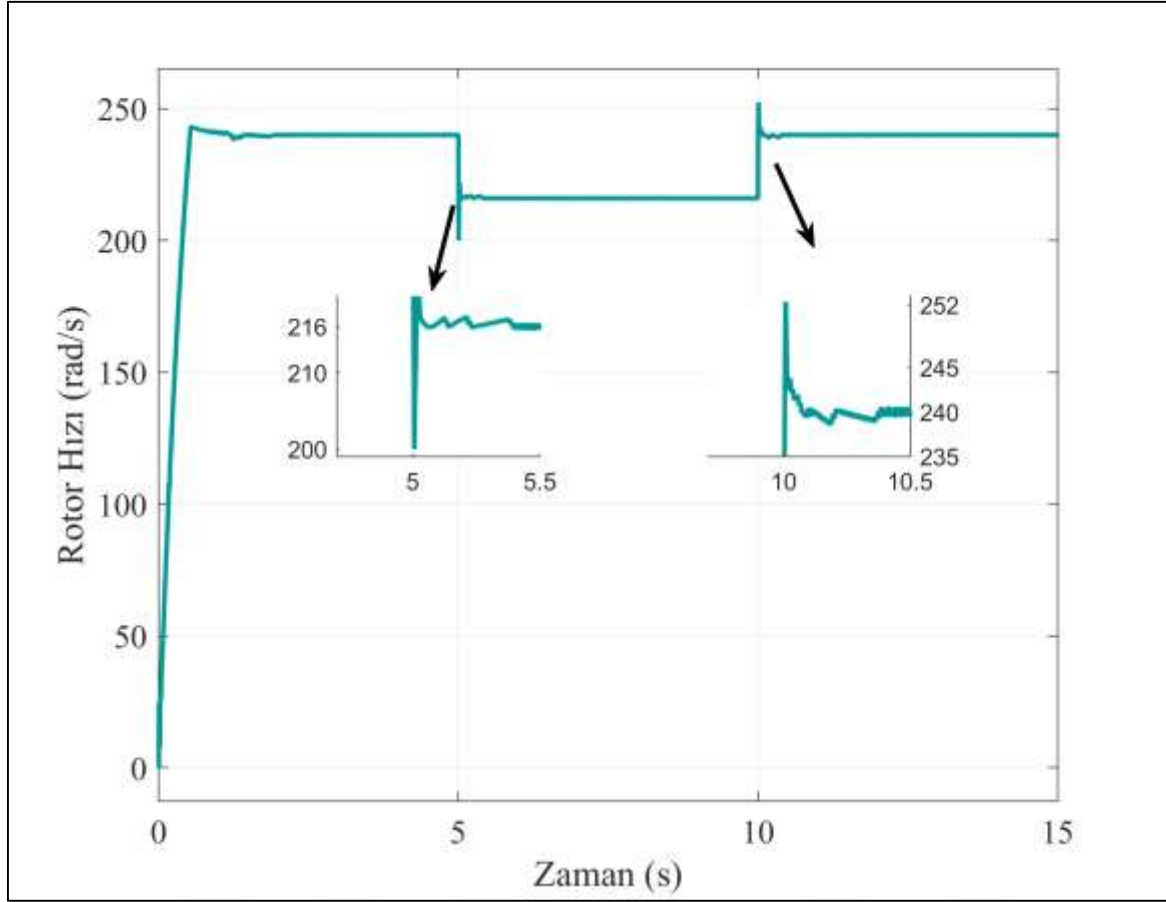
Şekil 4.49. Rüzgâr hızı değişimi testi; toplam akım harmoniği

Şekil 4.49’da evirici çıkış akımlarının toplam harmonik bozulumu verilmiştir. Görüldüğü üzere geçiş durumları haricinde harmonik %5’in altındadır.



Şekil 4.50. Rüzgâr hızı değişimi testi; türbin dönüştürücüsü gerilimi ve akımı

Şekil 4.50’de rüzgâr türbini dönüştürücüsünün çıkış gerilimi yani şebeke besleyen eviricinin giriş gerilimi ve dönüştürücünün bobin akımı verilmiştir. Gerilim, geçiş noktalarında %2,5 civarında salınım oluşturmuştur. Akım ise rüzgâr hızı düşüşünden dolayı düşüş göstermiştir.



Şekil 4.51. Rüzgâr hızı değişimi testi; türbin rotor hızı

Son olarak Şekil 4.51’de türbin rotor hızı verilmiştir. Türbin karakteristiğinden anlaşılacağı gibi 10 m/s rüzgâr hızındaki türbin hızı nominal hızın %90’ı civarındadır (Bkz. Şekil 2.17). Şekil 4.51’deki grafikte de rüzgâr hızı düştüğünde rotor hızının da düştüğü, böylece generatörün maksimum güç noktasındaki uç hızını takip etmeye çalıştığı görülmektedir. Burada rotor hızı sıçrama değerinin, çok kısa bir süre için %7 seviyelerine ulaştığı gözlemlenebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ada modunda çalışan bir hibrit AA-DA mikro şebeke tasarlanmıştır. DA barada güneş paneli grubu ve batarya enerji depolama sistemi, AA barada ise sabit mıknatıslı senkron generatörden oluşan rüzgar türbini ve AA yükler yer almaktadır. Güneş paneli için bir maksimum güç noktası takibi dönüştürücüsü, batarya enerji depolama sistemi için şarj-deşarj dönüştürücüsü, rüzgâr türbini için şebeke besleyen evirici ve tüm sistemi birbirine bağlayan bir şebeke oluşturan evirici tasarlanmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının gelecek için önemi tartışılmaz bir konudur. Ancak bu kaynakların şebeke sistemlerine katılımında çok fazla sorunlar yer almaktadır. Bu sorunlar literatürde yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Hibrit AA-DA mikro şebekeler, şebekelerin akıllanmasında, talep dengelenmesinde, üretilen yerde tüketimin sağlanmasında ve yenilenebilir enerji kaynaklarının katılımında avantajlar sağlaması bakımından günümüzün ve geleceğin şebeke teknolojileridir. Ancak özellikle ada modu çalışmalarında yenilenebilir enerji kaynaklarının öngörülemez doğası, sistemin doğrusal olmaması, şebekenin büyük atalet kapasitesinin eksiliği gibi sebeplerden dolayı hassasiyeti yüksektir. Ayrıca sistem, tamamının ele alınmasının mümkün olmadığı kadar büyüktür. Bu nedenle literatürde belli bir parçası veya durumu için optimum çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmada sistemin olabildiğince en geniş çerçevesi ele alınarak sistemin küresel ölçekte optimum çalışmasının sağlanması amaçlanmıştır. Tüm sistemleri ve birbirinden bağımsız durumları bir araya getirerek kararlı bir sistem oluşturmak için gerekli sorunların üstesinden gelinmiştir. Bunun için çeşitli çalışma senaryoları, kontrol ve yönetim algoritmaları önerilmiştir. Böylece tüm çalışma senaryolarında otonom çalışabilen ve kararlı kalabilen bir mikro şebeke yapısı tasarlanmıştır. Daha sonra güneş panelinin maksimum güç noktası takibi dinamik davranışını ve takip verimini geliştirmek için INFO meta sezgisel algoritması ile optimize edilmiş doğrusal olmayan oransal-integral (N-PI) kontrolü önerilmiştir. Bunun için öncelikle INFO algoritması, literatürdeki yeni meta sezgisel algoritmalarından FOX, NOA, CDO ve WSO algoritmaları ile karşılaştırılmış ve diğerlerinden daha başarılı bulunmuştur. Ayrıca maksimum güç noktası takibi için PI ve N-PI performansları karşılaştırılarak N-PI çalışmanın PI çalışmaya üstünlüğü gösterilmiştir. Ardından AA bara güç paylaşımı ve güç kalitesini sağlamak için faz açısı temelli düşüş kontrol yöntemine dayalı geniş ölçekte INFO algoritması ile optimize edilmiş N-PI kontrol önerilmiştir. N-PI

kontrolcünün daha düşük aşım sergilemesi ve daha hızlı yerleşmesi sayesinde çalışma sınırları arttırılmıştır. Geniş ölçekte yapılan INFO optimizasyonu sayesinde küresel optimum çalışma noktası tespit edilmiştir. AA baradaki asıl hedef gerilim kararlılığının ve güç kalitesinin korunmasıdır. Gerilim seviyesinde, genellikle ülkemizdeki AA şebekeler için de tanınan IEC60038 standardında belirtilen $\pm\%10$ seviyeleri uygun seviyelerdir. Buradaki çalışmada tüm durumlarda DA bara için $\%8$ 'in altında ve AA bara için $\%2$ 'nin altında bir kontrol sağlanmıştır. IEEE 519 standardına göre ise düşük gerilim uygulamalarında izin verilen maksimum akım toplam harmonik bozulumu (THD) değeri $\%5$ 'in altında olmalıdır. Yapılan çalışmada akım THD değeri $\%3,5$ sınırın altında tutulmuştur. Ayrıca INFO algoritmasının arama esnasındaki aşırı değerleri tespit eden ve sonlandıran bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritma arama hızını $\%17$ arttırmıştır.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinin önündeki zorluklar şöyledir;

- Öncelikle sistem çok büyük bir sistemdir. Simülasyon ortamında sistemin tamamını yeterince hızlı ve geniş bir şekilde çalıştırabilecek kadar iyi bir bilgisayar bulmak zordur. En son nesil işlemciye sahip bir bilgisayarlar bile yeterli değildir.
- Uygulama ortamı için de aynı problem söz konusudur. Sistem büyük ve maliyetlidir. Ayrıca optimizasyon algoritmalarının sisteme uygulama problemi vardır. Çünkü belirli aralıklarda rastgele değer test eden algoritmalar sistemi arızaya götürebilecek çok yüksek değerler üretebilmektedir. Bunun için önce arıza ve güvenlik sistemlerinin üzerinde hassas geliştirmeler yapmak gerekir.
- Simülasyon ortamında bile parametre optimizasyonları sistemin büyüklüğünden dolayı günler sürmektedir. Ayrıca yine optimizasyon için gerekli olan performans ölçeğinin belirlenmesi problemi vardır. Örneğin gerilim kararlılığı üzerinde optimizasyon sağlanırken çok iyi gerilim regülasyonu sağlayan parametreler aşırı güç salınımına neden olabilmektedir. Performans kriterine güç salınımı da eklendiğinde güç sapmalarının büyüklüğü ölçek olarak gerilim sapmalarından daha büyük olduğu için bu kez ölçekleme veya ağırlık atama problemi ortaya çıkmaktadır. Tüm bunlar çözülsede başka bir parametrenin davranışı istenen performansta çıkmayabilir. Bu nedenle performans kriterinin belirlenmesi böyle büyük sistemlerde önemlidir.
- Sistem durum geçişleri çok fazladır. Örneğin senkronizasyon öncesi kontrol parametresi ve senkronizasyon sonrası parametreleri çok farklıdır. Ayrıca senkron

öncesi hatanın elde edilişi ile sonrasındaki elde edilişi de farklıdır. Bu nedenle senkronizasyon anında takip edilen hata büyüklükleri aniden değişmektedir. Bu durum sistemin aşırı salınımına ve hatta senkronundan çıkmasına neden olmaktadır. Çözüm olarak senkron öncesi, senkron anı ve senkron sonrası güç paylaşımı durumlarında parametrelerin ve kontrolcü hata son değerlerinin değişmesi gereklidir. (Çünkü kontrolcüler son değerlerini arttırıp azaltır. Bir durumun son değeri bir sonraki durumun ilk değeri olur.) Ya da her durum için uygun bir yönetim fonksiyonu bulunmalıdır. Hatta bu noktalar için öngörülü ve tahmin edici yapılar eklenebilir.

Bu çalışmanın sonunda gelecek araştırmalarda yapılması planlananlar;

- Bu sistem üzerinde şebeke oluşturan eviricinin sanal senkron makine temelli kontrolü üzerinde çalışmak,
- AA baraya yenilenebilir enerji kaynaklı şebeke destekleyen bir evirici bağlayarak güç paylaşımı üzerinde çalışmak,
- Şebeke bağlantılı moda geçerek mikro şebekenin çalışabileceği diğer senaryoları incelemek,
- Senkronizasyon öncesi, geçişi ve sonrası durumların tek ve basit kontrolü üzerinde çalışmak,
- Çeşitli optimizasyon ve sezgisel yöntemlerin sistemin geneli üzerindeki performansını incelemek,
- Sistem üzerinde kontrolcü olarak optimum doğrusal olmayan fonksiyonlar üzerinde çalışmak,
- Ayrıca bu çalışmaların uygulama altyapılarını da kurarak özellikle gerçek sistem üzerinde güvenlik sorunlarını ortadan kaldırmak ve küresel sistem üzerinde kolay ve güvenilir bir optimizasyon sağlamanın önünü açmak şeklindedir.



KAYNAKLAR

1. Shrestha, A., Mustafa, A. A., Htike, M. M., You, V., and Kakinaka, M. (2022). Evolution of energy mix in emerging countries: Modern renewable energy, traditional renewable energy, and non-renewable energy. *Renewable Energy*, 199, 419-432.
2. Østergaard, P. A., Duic, N., Noorollahi, Y., and Kalogirou, S. (2022). Renewable energy for sustainable development. *Renewable Energy*, 199, 1145-1152.
3. Olabi, A. G., and Abdelkareem, M. A. (2022). Renewable energy and climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112111.
4. Naidu, R. S. R. K., Palavalasa, M., and Chatterjee, S. (2022). Integration of hybrid controller for power quality improvement in photo-voltaic/wind/battery sources. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129914.
5. Gupta, S., Ramkumar, R., Lakshmi, M., Vinoth kumar, M., Surendar, R., and Mayavel, N. (2022). Soft switched DC-DC converter for hybrid power generation photo voltaic panels using fuzzy logic controller. *Materials Today: Proceedings*, 66, 1343-1351.
6. Abazari, A., Monsef, H., and Wu, B. (2019). Coordination strategies of distributed energy resources including FESS, DEG, FC and WTG in load frequency control (LFC) scheme of hybrid isolated micro-grid. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 109, 535-547.
7. Mousavi Somarin, H., and Parvari, R. (2020). Micro-grid stabilizer design using sliding mode controller. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 116, 105519.
8. Azimi, S. M., and Lotfifard, S. (2021). A nonlinear controller design for power conversion units in islanded micro-grids using interconnection and damping assignment tracking control. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(1), 284-292.
9. Saidu, M. M., Jaiswal, S. P., Jayaswal, K., Mitra, S., and Bhadoria, V. S. (2022). A survey on: Automation of micro grid and micro distributed generation. *Materials Today: Proceedings*, 49, 3192-3196.
10. Wang, H., Xing, H., Luo, Y., and Zhang, W. (2023). Optimal scheduling of micro-energy grid with integrated demand response based on chance-constrained programming. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 144, 108602.
11. Negahdari, M. R., Ghaedi, A., Nafar, M., and Simab, M. (2023). Optimal planning of a micro-grid containing tidal barrage equipped to the hydro-pumps. *IET Renewable Power Generation*, 17(9), 2215-2224.
12. Samende, C., Bhagavathy, S. M., and McCulloch, M. (2022). Power loss minimisation of off-grid solar DC nano-grids—part II: A quasi-consensus-based distributed control algorithm. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(1), 38-46.

13. Satheesh Kumar, S., Ashok Kumar, B., and Senthilrani, S. (2023). Review of electric vehicle (EV) charging using renewable solar photovoltaic (PV) nano grid. *Energy and Environment*, 0(0).
14. Bagheri, A., Jabbari, A., and Mobayen, S. (2021). An intelligent ABC-based terminal sliding mode controller for load-frequency control of islanded micro-grids. *Sustainable Cities and Society*, 64, 102544.
15. Elmouatamid, A., Ouladsine, R., Bakhouya, M., El Kamoun, N., Khaidar, M., and Zine-Dine, K. (2020). Review of control and energy management approaches in Micro-grid systems. *Energies*, 14(1), 168-198.
16. Maakoul, O., Beaulanda, R., El Omari, H., Abid, A., and Essabri, E. (2020). Modeling and optimal energy management of a micro-hybrid-grid, equipped with a renewable energy source, a conventional source, and a cogeneration unit. *Journal of Electrical Systems*, 16(4), 582-603.
17. Banerjee, B., Jayaweera, D., and Islam, S. (2016). Micro Grid Planning and Operation. In *Smart Power Systems and Renewable Energy System Integration*, 57, 29-47.
18. Huimin, Z., Chao, X., Shun, Y., Yun, T., Bing, L., Jing, T., and Zhongjie, Z. (2015). *Based on micro-grid small-signal model grid off-grid seamless handover stability study*. 2015 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City, Halong Bay.
19. Zhang, D., Wu, Y., Xiong, L., and Zhao, C. (2019). Analysis of inertia characteristics of direct-drive permanent-magnet synchronous generator in micro-grid. *Energies*, 12(16), 3141-3158.
20. Saha, S., Saleem, M. I., and Roy, T. K. (2023). Impact of high penetration of renewable energy sources on grid frequency behaviour. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 145, 108701.
21. Fuchs, F. W., Hoffmann, N., Reese, J., Wessels, C., Lohde, R., Grunau, S., and Gebhardt, F. (2012). *Research laboratory for grid-integration of distributed renewable energy resources - Integration analysis of DERs*. 2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), Novi Sad.
22. Zhu, J. R., Jin, Y., Zhu, W., Lee, D.-K., and Bohlooli, N. (2023). Multi-objective planning of micro-grid system considering renewable energy and hydrogen storage systems with demand response. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(41), 15626-15645.
23. Jami, M., Shafiee, Q., Gholami, M., and Bevrani, H. (2020). Control of a super-capacitor energy storage system to mimic inertia and transient response improvement of a direct current micro-grid. *Journal of Energy Storage*, 32, 101788.
24. Kengam, S., and Sreejith, S. (2019). *An efficient energy management system for hybrid renewable energy sources*. 2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), Vellore.

25. Cetinbas, I., Tamyurek, B., and Demirtas, M. (2022). The hybrid Harris hawks optimizer-arithmetic optimization algorithm: A new hybrid algorithm for sizing optimization and design of microgrids. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 10, 19254-19283.
26. Hosseinzadeh, M., and Salmasi, F. R. (2018). Fault-tolerant supervisory controller for a hybrid AC/DC micro-grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(4), 2809-2823.
27. Pejmanfar, R., Haghifam, M., Soleymani, S., and Tavassoli, B. (2017). Large signal stabilization of hybrid AC/DC micro-grids using nonlinear robust controller. *Energies*, 10(12), 1985-2010.
28. Huang, J., Xiao, J., Wen, C., Wang, P., and Zhang, A. (2019). Implementation of bidirectional resonant DC transformer in hybrid AC/DC micro-grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(2), 1532-1542.
29. Saponara, S., Saletti, R., and Mihet-Popa, L. (2019). Hybrid micro-grids exploiting renewables sources, battery energy storages, and bi-directional converters. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 9(22), 4973-4991.
30. Abidi, H., Sidhom, L., and Chihi, I. (2023). Systematic literature review and benchmarking for photovoltaic MPPT techniques. *Energies*, 16(8), 3509-3554.
31. Bollipo, R. B., and Mikkili, S. (2020). Hybrid, optimization, intelligent and classical PV MPPT techniques: Review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(1), 9-34.
32. Govinda, C. V., Udhay, S. V., Rani, C., Wang, Y., and Busawon, K. (2018). *A review on various MPPT techniques for wind energy conversion system*. 2018 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Chennai.
33. Hussein, I., Çelik, Ö., and Teke, A. (2022). A hybrid random parameters modification to MPPT algorithm to mitigate interharmonics from single-phase grid-connected PV systems. *Energy Reports*, 8, 6234-6244.
34. Yaramasu, V., Dekka, A., Durán, M. J., Kouro, S., and Wu, B. (2017). PMSG-based wind energy conversion systems: survey on power converters and controls. *IET Electric Power Applications*, 11(6), 956-968.
35. Bouzid, A. M., Guerrero, J. M., Cheriti, A., Bouhamida, M., Sicard, P., and Benghanem, M. (2015). A survey on control of electric power distributed generation systems for microgrid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 751-766.
36. Mirafzal, B., and Adib, A. (2020). On grid-interactive smart inverters: Features and advancements. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 8, 160526-160536.

37. Nezhad, A. A., Zaker, B., Arani, A. A. K., and Gharehpetian, G. B. (2017). *Impact of non-MPPT operation mode of PV system considering inverter fault current limiting*. 2017 Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC), Semnan.
38. Majumder, R., Chaudhuri, B., Ghosh, A., Majumder, R., Ledwich, G., and Zare, F. (2010). Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop. *IEEE Transactions on Power Systems: A Publication of the Power Engineering Society*, 25(2), 796-808.
39. Huang, X., Wang, K., Qiu, J., Hang, L., Li, G., and Wang, X. (2019). Decentralized control of multi-parallel grid-forming DGs in islanded microgrids for enhanced transient performance. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 7, 17958-17968.
40. Guo, X., Lu, Z., Wang, B., Sun, X., Wang, L., and Guerrero, J. M. (2014). Dynamic phasors-based modeling and stability analysis of droop-controlled inverters for microgrid applications. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(6), 2980-2987.
41. Planas, E., Gil-de-Muro, A., Andreu, J., Kortabarria, I., and Martínez de Alegría, I. (2013). General aspects, hierarchical controls and droop methods in microgrids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, 147-159.
42. Rathnayake, D. B., Akrami, M., Phurailatpam, C., Me, S. P., Hadavi, S., Jayasinghe, G., Zabihi, S., and Bahrani, B. (2021). Grid forming inverter modeling, control, and applications. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 9, 114781-114807.
43. Verma, D., Nema, S., Shandilya, A. M., and Dash, S. K. (2016). Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1018-1034.
44. Vadivel, S., Ramasamy, S., Mikkili, S., Ahsan, M., Haider, J., Islam, M. M., and Ustun, T. S. (2023). Hybrid social grouping algorithm-perturb and observe power tracking scheme for partially shaded photovoltaic array. *International Journal of Energy Research*, 2023, 1-18.
45. Yan, Z., Huang, Y., Tan, S.-C., Tang, C. Y., and Hui, S. Y. (2023). A self-adaptive-step-size incremental-resistance-MPPT technique for reverse-electrodialysis system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics (1982)*, 70(4), 3814-3824.
46. Bisht, R., and Sikander, A. (2022). An improved method based on fuzzy logic with beta parameter for PV MPPT system. *Optik*, 259, 168939.
47. Abdelsalam, A. K., Massoud, A. M., Ahmed, S., and Enjeti, P. N. (2011). High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(4), 1010-1021.
48. Sahoo, J., Samanta, S., and Bhattacharyya, S. (2020). Adaptive PID controller with P&O MPPT algorithm for photovoltaic system. *IETE Journal of Research*, 66(4), 442-453.

49. Zagbba, L., Khennane, M., Borni, A., Fezzani, A., Bouchakour, A., Mahammed, I. H., and Oudjana, S. H. (2019). *A genetic algorithm based improve P&O-PI MPPT controller for stationary and tracking grid-connected photovoltaic system*. 2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Agadir.
50. Jain, S., and Agarwal, V. (2004). A new algorithm for rapid tracking of approximate maximum power point in photovoltaic systems. *IEEE Power Electronics Letters*, 2(1), 16-19.
51. Mousa, H. H. H., Youssef, A.-R., and Mohamed, E. E. M. (2019). Variable step size P&O MPPT algorithm for optimal power extraction of multi-phase PMSG based wind generation system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 108, 218-231.
52. Kumar, S. S., Jayanthi, K., and Kumar, N. S. (2016). *Maximum power point tracking for a PMSG based variable speed wind energy conversion system using optimal torque control*. 2016 International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT), Ramanathapuram.
53. Emna, M. E., Adel, K., and Mimouni, M. F. (2013). The wind energy conversion system using PMSG controlled by vector control and SMC strategies. *International Journal of Renewable Energy Research*, 3(1), 41-50.
54. Srivastava, B. B., and Tripathi, S. (2015). Tracking of maximum power from wind using fuzzy logic controller based on PMS. *Asian Journal For Convergence In Technology (AJCT)*, 1(2), 1-10.
55. Yazdani, S., Ferdowsi, M., Davari, M., and Shamsi, P. (2020). Advanced current-limiting and power-sharing control in a PV-based grid-forming inverter under unbalanced grid conditions. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 8(2), 1084-1096.
56. Wang, K., Huang, X., Fan, B., Yang, Q., Li, G., and Crow, M. L. (2018). Decentralized power sharing control for parallel-connected inverters in islanded single-phase micro-grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6), 6721-6730.
57. De Brabandere, K., Bolsens, B., Van den Keybus, J., Woyte, A., Driesen, J., and Belmans, R. (2007). A voltage and frequency droop control method for parallel inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(4), 1107-1115.
58. Guerrero, J. M., GarcíadeVicuna, L., Matas, J., Castilla, M., and Miret, J. (2004). A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(5), 1205-1213.
59. Armstrong, B., Neevel, D., and Kusik, T. (2001). New results in NPID control: Tracking, integral control, friction compensation and experimental results. *IEEE Transactions on Control Systems Technology: A Publication of the IEEE Control Systems Society*, 9(2), 399-406.
60. Gambier, A., and Yunazwin Nazaruddin, Y. (2018). *Nonlinear PID control for pitch systems of large wind energy converters*. 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), Copenhagen.

61. Gambier, A., and Nazaruddin, Y. Y. (2018). Collective pitch control with active tower damping of a wind turbine by using a nonlinear PID approach. *IFAC-PapersOnLine*, 51(4), 238-243.
62. Mosaad Ali, O. A., El-Zoghby, H. M., and Ghany, A. G. M. A. (2018). *Maximum power point tracking for hybrid wind-solar energy system using optimum controllers techniques*. 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo.
63. Pathak, D., Sagar, G., and Gaur, P. (2020). An application of intelligent non-linear discrete-PID controller for MPPT of PV system. *Procedia Computer Science*, 167, 1574-1583.
64. Shamseldin, M. A. (2023). Design of auto-tuning nonlinear PID tracking speed control for electric vehicle with uncertainty consideration. *World Electric Vehicle Journal*, 14(4), 78-94.
65. Kler, D., Rana, K. P. S., and Kumar, V. (2018). A nonlinear PID controller based novel maximum power point tracker for PV systems. *Journal of the Franklin Institute*, 355(16), 7827-7864.
66. Ahmadianfar, I., Heidari, A. A., Noshadian, S., Chen, H., and Gandomi, A. H. (2022). INFO: An efficient optimization algorithm based on weighted mean of vectors. *Expert Systems with Applications*, 195, 116516.
67. Farhat, M., Kamel, S., Atallah, A. M., Abdelaziz, A. Y., and Tostado-Véliz, M. (2023). Developing a strategy based on weighted mean of vectors (INFO) optimizer for optimal power flow considering uncertainty of renewable energy generation. *Neural Computing and Applications*, 35(19), 13955-13981.
68. Zhuo, Y., Li, L., Tang, J., Meng, W., Huang, Z., Huang, K., Hu, J., Qin, Y., Zhan, H., and Liang, Z. (2023). Optimal real-time power dispatch of power grid with wind energy forecasting under extreme weather. *Mathematical Biosciences and Engineering: MBE*, 20(8), 14353-14376.
69. Elnagi, M., Kamel, S., Ramadan, A., and F. Elnaggar, M. (2023). Photovoltaic models parameters estimation based on weighted mean of vectors. *Computers, Materials and Continua*, 74(3), 5229-5250.
70. Al-Masri, H., Alhuwaishel, F., Alismail, F., Sabeeh, S., and Kanakri, H. (2015). *Investigation of MPPT for PV applications by mathematical model*. 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Rome.
71. Osterwald, C. R., Campanelli, M., Kelly, G. J., and Williams, R. (2015). *On the reliability of photovoltaic short-circuit current temperature coefficient measurements*. 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), New Orleans.
72. Ramos-Hernanz, J., López-Guede, J. M., Zulueta, E., and Fernández-Gámiz, U. (2017). Reverse saturation current analysis in photovoltaic cell models. *WSEAS Transactions on Power Systems*, 12, 231-238.

73. De Soto, W., Klein, S. A., and Beckman, W. A. (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy (Phoenix, Ariz.)*, 80(1), 78-88.
74. Ikegami, T., Maezono, T., Nakanishi, F., Yamagata, Y., and Ebihara, K. (2001). Estimation of equivalent circuit parameters of PV module and its application to optimal operation of PV system. *Solar Energy Materials and Solar Cells: An International Journal Devoted to Photovoltaic, Photothermal, and Photochemical Solar Energy Conversion*, 67(1-4), 389-395.
75. Alex, V., Finkbeiner, S., and Weber, J. (1996). Temperature dependence of the indirect energy gap in crystalline silicon. *Journal of Applied Physics*, 79(9), 6943-6946.
76. Keshari, K., Neeli, S., and Vijayakumar, K. (2017). *Design of a sliding-mode-controlled dc-dc converter for MPPT in grid-connected PV System*. 2017 IEEE International Conference on Electrical, Instrumentation and Communication Engineering (ICEICE), Karur.
77. Glasner, I., and Appelbaum, J. (2002). *Advantage of boost vs. buck topology for maximum power point tracker in photovoltaic systems*. Proceedings of 19th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, Jerusalem.
78. Hayat, A., Faisal, A., Javed, M. Y., Hasseb, M., and Rana, R. A. (2016). *Effects of input capacitor (cin) of boost converter for photovoltaic system*. 2016 International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube), Quetta.
79. Abdourraziq, M. A., Abdourraziq, S., and Maaroufi, M. (2018). Efficiency optimisation of a microcontroller-based PV system employing a single sensor fuzzy-logic controller. *IET Power Electronics*, 11(3), 539-547.
80. Rugh, W. J. (1987). Design of nonlinear PID controllers. *AIChE Journal American Institute of Chemical Engineers*, 33(10), 1738-1742.
81. Muñoz-Galeano, N., López-Lezama, J., and Villada-Duque, F. (2019). Methodology for teaching the buck converter: step by step description of the design. *Revista Espacios*, 40(44), 1-11.
82. Viswanatha, V. and Venkata, V. S. R. (2018). Microcontroller based bidirectional buck–boost converter for photo-voltaic power plant. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 5(3), 745-758.
83. Liu, J., and Chen, W. (2013). *Generalized DQ model of the permanent magnet synchronous motor based on extended park transformation*. 2013 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), Tainan.
84. Barisa, T., Sumina, D., and Kutija, M. (2015). *Control of generator- and grid-side converter for the interior permanent magnet synchronous generator*. 2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Palermo.

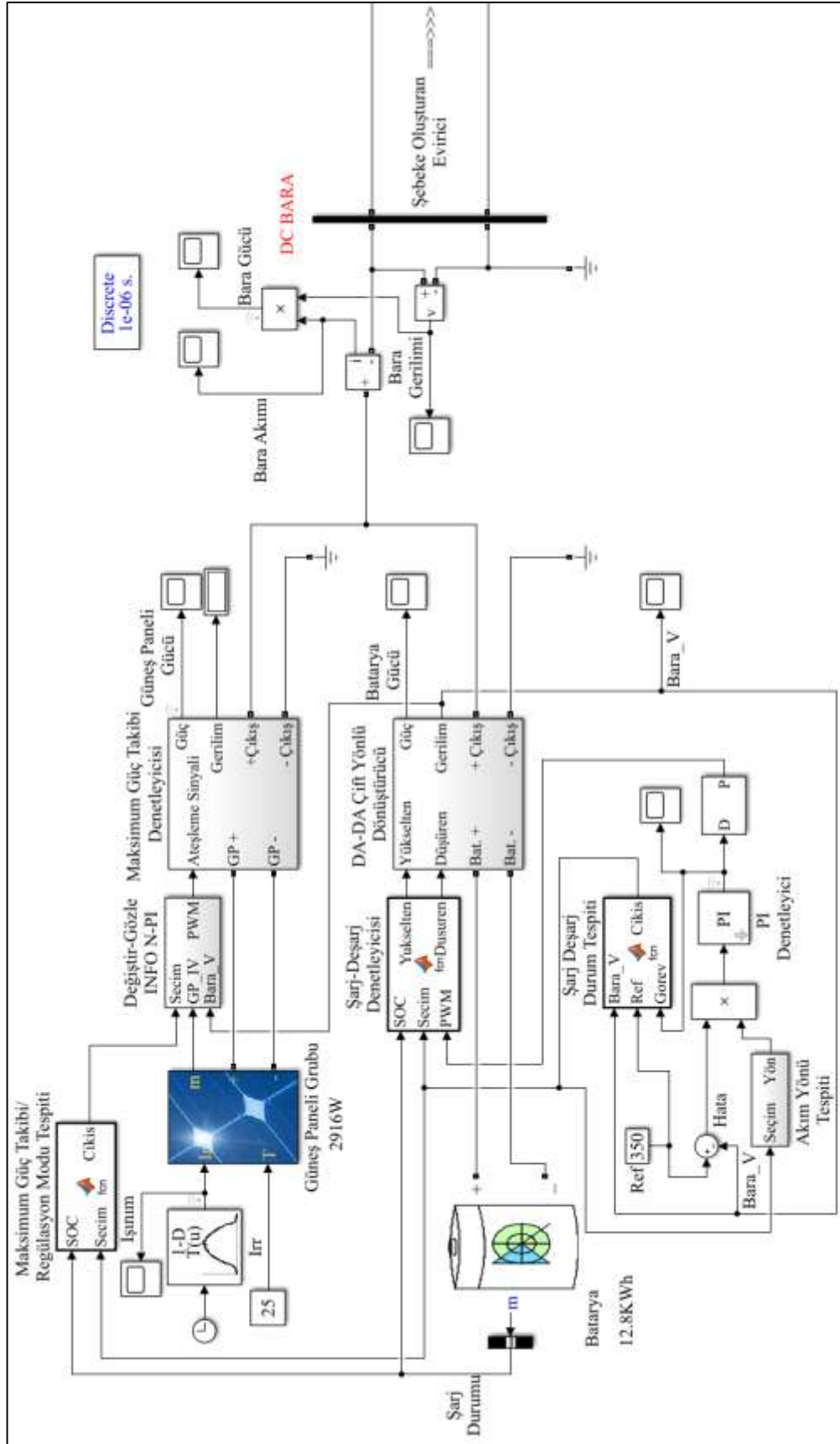
85. İnternet: Three-phase permanent magnet synchronous machine with sinusoidal or trapezoidal back electromotive force, or five-phase permanent magnet synchronous machine with sinusoidal back electromotive force - Simulink. (n.d.). Mathworks.com. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/permanentmagnetsynchronousmachine.html>, Son Erişim Tarihi: 28.10.2023.
86. Jallad, J., Mekhilef, S., and Mokhlis, H. (2017). Frequency regulation strategies in grid integrated offshore wind turbines via VSC-HVDC technology: A review. *Energies*, 10(9), 1244-1273.
87. İnternet: Implement model of variable pitch wind turbine - Simulink. (n.d.). Mathworks.com. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/windturbine.html>, Son Erişim Tarihi: 28.10.2023.
88. Jadric, I., Borojevic, D., and Jadric, M. (2002). *A simplified model of a variable speed synchronous generator loaded with diode rectifier*. PESC97. Record 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Formerly Power Conditioning Specialists Conference 1970-71. Power Processing and Electronic Specialists Conference 1972, St. Louis.
89. Mahdi, A. J., Tang, W. H., and Wu, Q. H. (2011). *Derivation of a complete transfer function for a wind turbine generator system by experiments*. 2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference, Wuhan.
90. İnternet: Voltage Source Inverter Reference Design. (n.d.). www.ti.com. URL: https://www.ti.com/lit/ug/tiduay6e/tiduay6e.pdf?ts=1698145705087&ref_url=https%25A%252F%252Fwww.google.com%252F, Son Erişim Tarihi: 28.10.2023.
91. Jiang, S., Liu, Y., Liang, W., Peng, J., and Jiang, H. (2019). Active EMI filter design with a modified LCL-LC filter for single-phase grid-connected inverter in vehicle-to-grid application. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(11), 10639-10650.
92. Cha, H., and Vu, T.-K. (2010). *Comparative analysis of low-pass output filter for single-phase grid-connected Photovoltaic inverter*. 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Palm Springs.
93. Araujo, S. V., Engler, A., Sahan, B., and Antunes, F. L. M. (2007). *LCL filter design for grid-connected NPC inverters in offshore wind turbines*. 2007 7th International Conference on Power Electronics, Daegu.
94. Dursun, M., and Dosoglu, M. K. (2018). *LCL filter design for grid connected three-phase inverter*. 2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Ankara.
95. Grujić, L. T. (1995). New lyapunov method based methodology for asymptotic stability. *IFAC Proceedings Volumes*, 28(8), 485-490.
96. Armstrong, B., Gutierrez, J. A., Joseph, R., and Wade, B. (2003). *The stability of nonlinear PID control with arbitrary partial-state knowledge*. Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington.

97. Mohammed, H., and Rashid, T. (2023). FOX: a FOX-inspired optimization algorithm. *Applied Intelligence*, 53(1), 1030-1050.
98. Abdel-Basset, M., Mohamed, R., Jameel, M., and Abouhawwash, M. (2023). Nutcracker optimizer: A novel nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization and engineering design problems. *Knowledge-Based Systems*, 262, 110248.
99. Shehadeh, H. A. (2023). Chernobyl disaster optimizer (CDO): a novel meta-heuristic method for global optimization. *Neural Computing and Applications*, 35(15), 10733-10749.
100. Ayyarao, T. S. L. V., Ramakrishna, N. S. S., Elavarasan, R. M., Polumahanthi, N., Rambabu, M., Saini, G., Khan, B., and Alatas, B. (2022). War strategy optimization algorithm: A new effective metaheuristic algorithm for global optimization. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 10, 25073-25105.
101. Demirtas, M., and Koc, K. (2022). Parameter extraction of photovoltaic cells and modules by INFO algorithm. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 10, 87022-87052.
102. Mirzal, A., Yoshii, S., and Furukawa, M. (2006). PID parameters optimization by using Genetic Algorithm. *ISTECS Journal*, 8, 34-43.

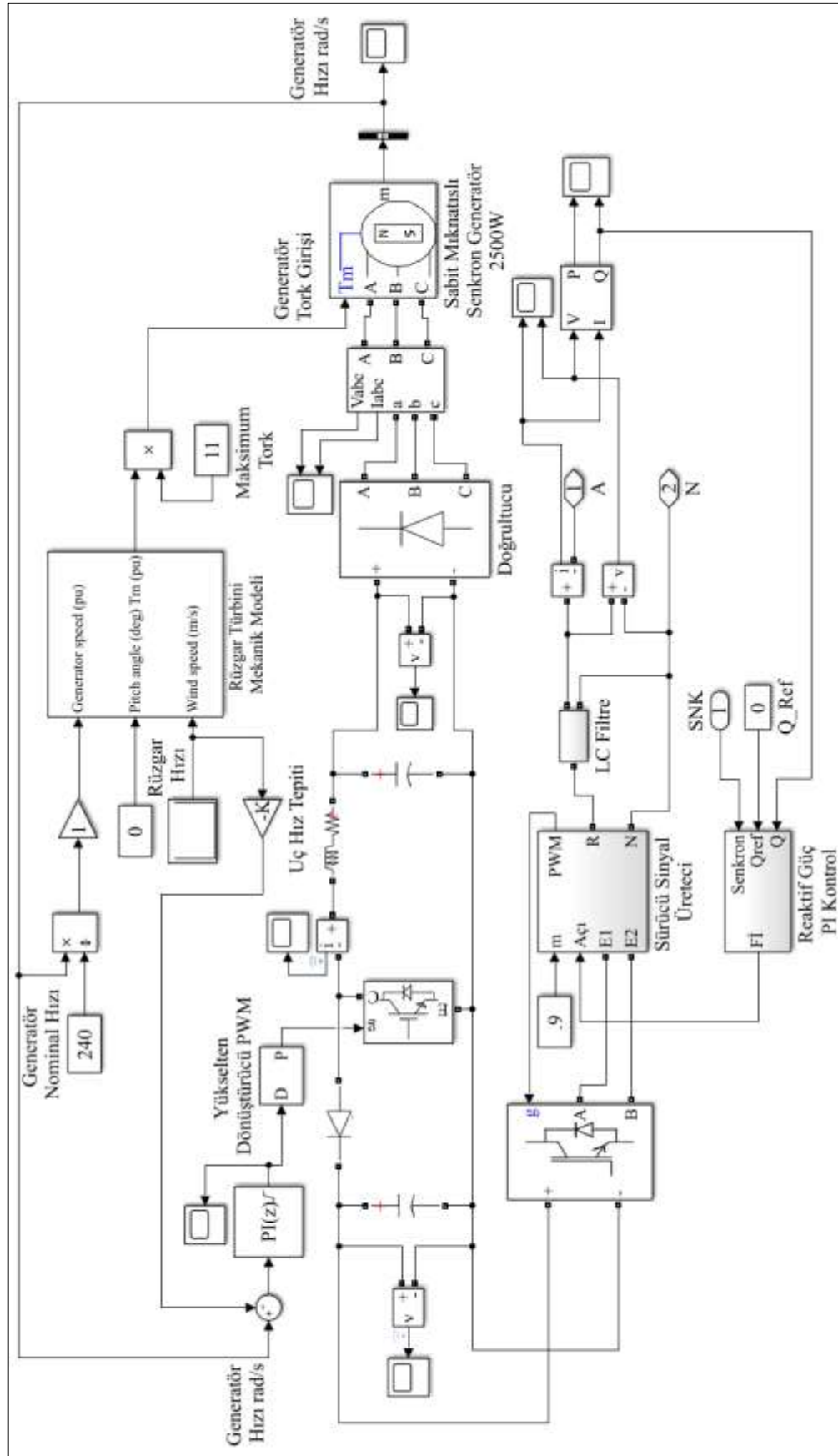


EKLER

EK-1. DA bara simülasyon görüntüsü



EK-3. Rüzgâr türbini kontrolü simülasyon görüntüsü





Gazili olmak ayrıcalıktır