



**RÜZGÂR VE AKINTI ENERJİSİNDEN OLUŞAN
HİBRİT GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNDE AKILLI
ENERJİ YÖNETİMİ**

Yağmur KIRÇIÇEK

**2020
DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK**

**RÜZGÂR VE AKINTI ENERJİSİNDEN OLUŞAN HİBRİT GÜÇ ÜRETİM
SİSTEMİNDE AKILLI ENERJİ YÖNETİMİ**

Yağmur KIRÇIÇEK

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK**

**KARABÜK
Haziran 2020**

Yağmur KIRÇIÇEK tarafından hazırlanan “RÜZGÂR VE AKINTI ENERJİSİNDEN OLUŞAN HİBRİT GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNDE AKILLI ENERJİ YÖNETİMİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 18/06/2020

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ (GÜ)

Üye : Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Habibe TECİMER (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Engin GEDİK (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Abdülsamed TABAK (NEÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Yağmur KIRÇIÇEK

ÖZET

Doktora Tezi

RÜZGÂR VE AKINTI ENERJİSİNDEN OLUŞAN HİBRİT GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNDE AKILLI ENERJİ YÖNETİMİ

Yağmur KIRÇIÇEK

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

Haziran 2020, 141 sayfa

Yenilenebilir Enerji Kaynakları'nın (YEK) önemi giderek artmakta ve enerji talebindeki payı giderek genişlemektedir. Deniz, üzerinde rüzgâr enerjisi, yüzeyinde dalga enerjisi ve altında akıntı ve gelgit enerjisi bulunan doğal bir enerji kaynağıdır. Bu tez çalışmasında, açık deniz rüzgâr ve yüzeysel akıntı enerjisinden yararlanmak üzere yüksek potansiyelli bir güç üretim sisteminin prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Böylece açık deniz rüzgâr ve akıntı enerjisi kullanılarak Hibrit Güç Üretim Sistemi (HGÜS) kurulmuştur. Deniz ve okyanus enerji çeşidi de diğer YEK'ı gibi kendine özgü güç üretim karakteristiği bulunmaktadır. Doğası gereği bu güç üretimi zamana bağlı olarak süreklilik ve kararlılık arz etmemektedir. Ayrıca YEK'in doğası gereği kesintili ve kararsız olan bu enerji çeşitlerinin sürekliliğini sağlamak için enerji depolama birimine ihtiyaç vardır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan batarya teknolojileri yüksek enerji yoğunluğuna sahipken düşük güç yoğunlukları mevcuttur. Yüksek güç yoğunluğunu ise ultrakapasitör enerji depolama

teknolojisi sağlamaktadır. Böylece iki depolama birimi ile hibrit bir enerji depolama birimi oluşturulmaktadır. Tez kapsamında HGÜS'e batarya ve ultrakapasitörden oluşan Hibrit Enerji Depolama Sistemi (HEDS) eklemiştir. Bu tezin amacı; açık deniz rüzgâr ve akıntı enerjilerinden hibrit güç üretim sistemi oluşturmak, batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji depolama sistemini entegre etmek, akıllı enerji yönetim algoritmasıyla talep tarafındaki güç ihtiyacını sürekli olarak karşılamak ve kaliteli elektrik üretmektir.

Hibrit güç üretim sisteminde bulunan açık deniz rüzgâr enerjisi için Darrieus ve akıntı enerjisi için Savonius kanat tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Hibrit sistemin ilk olarak Matlab/Simulink ile simülasyon daha sonra deneysel çalışmaları yapılmıştır. Hibrit sistem 9 olası durumda çalıştırılmıştır ve en kritik geçiş durumu olan Durum 5 ve Durum 6'da yük gurubunda 12 W'lık ani güç değişimi gerçekleştirilmiştir. Ultrakapasitör 12 W ani gücü karşılayarak batarya gurubunun ani deşarj olmasının önüne geçmiştir. Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlarla, YEK'in kesintili yapısı enerji depolama birimleriyle kompanze edildiğini gösterilmiştir. Böylece talep tarafındaki enerji ihtiyacı sürekli ve kesintisiz olarak sağlandığı sonuçlarla birlikte gösterilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Açık deniz rüzgâr enerjisi, Akıntı enerjisi, Batarya, Ultrakapasitör, Hibrit enerji depolama, Akıllı enerji yönetim algoritması.

Bilim Kodu : 92806

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

SMART ENERGY MANAGEMENT IN HYBRID POWER PRODUCTION SYSTEM CONSISTING OF WIND AND FLOW ENERGY

Yağmur KIRÇİÇEK

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Energy Systems Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

June 2020, 141 pages

The importance of Renewable Energy Resources (RES) is gradually increasing and its share in energy demand is expanding. It is a natural energy source with wind energy on the over, wave energy on the surface and current and tidal energy under in the sea. In this thesis, a high potential prototype of power generation system has been produced to take advantage of offshore wind and marine current energy. Thus, Hybrid Power Generation System (HPGS) was establishing using offshore wind and marine current energy. The sea and ocean energy types have their own unique power generation characteristics like the other RES. By its nature, this power generation does not show continuity and determination depending on time. In addition, an energy storage unit is needed to ensure the continuity of these energy types, which are intermittent and unstable due to the nature of RES. Battery technologies that are widely used today have high energy density while low power density. The high power density provides ultracapacitor energy storage technology. Thus, a hybrid

energy storage unit is created with two storage units. Within the scope of the thesis, Hybrid Energy Storage System (HESS) consisting of battery and ultracapacitor was added to HPGS. The purpose of this thesis is to create a hybrid power generation system from offshore wind and marine current energies, to integrate the hybrid energy storage system consisting of battery and ultracapacitor, to meet the load power on the demand side with the smart energy management algorithm and to produce quality electricity.

Darrieus blade for offshore wind energy and Savonius blade for marine current energy were designed and manufactured in the hybrid power generation system. Simulation of the hybrid system first with Matlab/Simulink and then experimental studies were done. The hybrid system was operated in 9 possible cases and 12 W sudden power change was made in the load group in the most critical transition case that Case 5 and Case 6. The ultracapacitor supplied 12 W suddenly power, preventing the battery group from sudden discharge. With the results obtained within the scope of the thesis, RES's intermittent structure has been shown to be compensated by energy storage units. Thus, it has been shown with the results that the energy on the demand side is provided continuously and uninterruptedly.

Key Word : Offshore wind energy, Flow energy, Battery, Ultracapacitor, Hybrid energy storage, Smart energy management algorithm.

Science Code : 92806

TEŞEKKÜR

Tez dönemim süresince, çalışmalarına yön veren ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, sevgili eşim Dr. Öğr. Üyesi Ahmet AKTAŞ'a ve maddi-manevi her anlamda yanımda oldukları için anneme, babama ve abime tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, "Açık deniz rüzgâr ve akıntı enerjisinden oluşan hibrit güç üretim sistemine batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji depolama sisteminin entegre edilerek hibrit sistemlerin akıllı enerji yönetimi" adlı TÜBİTAK 117E767 nolu 1001 projesi tarafından desteklenmiştir. Tez çalışmaları kapsamında kullanılan ekipman ve malzemelerin temin edilmesi her türlü desteği sağladığı için TÜBİTAK-EEEAG birim ve çalışanlarına teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xviii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	14
HİBRİT GÜÇ ÜRETİM SİSTEMLERİ VE HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ.....	14
2.1. HİBRİT GÜÇ ÜRETİM SİSTEMLERİ.....	14
2.2. HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ.....	19
2.2.1. Enerji Depolama Sistemleri.....	19
2.2.2. Hibrit Enerji Depolama Sistemleri	21
BÖLÜM 3	25
DARRİEUS VE SAVONİUS TÜRBİN TASARIMI VE ÜRETİMİ.....	25
3.1. DARRİEUS KANAT AERODİNAMİĞİ VE TÜRBİN TASARIMI	32
3.1.1. Güç Katsayısı.....	38
3.1.2. Kanat Uç Hız Oranı	38
3.1.3. Türbin Katılığı	39
3.1.4. Darrieus Kanat Türbin Tasarımı.....	40
3.2. SAVONİUS KANAT AERODİNAMİĞİ VE TÜRBİN TASARIMI	42
3.2.1. Savonius Kanat Türbin Tasarımı	47

3.3. DARRIEUS VE SAVONIUS TÜRİN ÜRETİMİ.....	48
BÖLÜM 4	53
HİBRİT SİSTEMİN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARI	53
4.1. AÇIK DENİZ RÜZGÂR GENARATÖR VE KONTROL ALGORİTMASI.....	54
4.2. YÜZEYSEL AKINTI GENARATÖR VE KONTROL ALGORİTMASI....	54
4.2.1. DA/DA Yükseltici Dönüştürücü Kontrolü	61
4.3. BATARYA GURUBU VE ÇİFT YÖNLÜ DA/DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ	61
4.3.1. Batarya Gurubunun Çift Yönlü DA/DA Dönüştürücü Kontrolü.....	61
4.4. ULTRAKAPASİTÖR GURUBU VE ÇİFT YÖNLÜ DÖNÜŞTÜRÜCÜ	63
4.4.1. Ultrakapasitör Gurubunun Çift Yönlü DA/DA Dönüştürücü Kontrolü	64
4.4.2. Çift Yönlü DA/DA Dönüştürücü Modeli	66
4.5. AKILLI ENERJİ YÖNETİM ALGORİTMASI	68
4.6. HİBRİT SİSTEMİN SİMÜLASYON SONUÇLARI	73
4.6.1. Durum 1 için Simülasyon Sonuçları.....	73
4.6.2. Durum 2 için Simülasyon Sonuçları.....	78
4.6.3. Durum 3 için Simülasyon Sonuçları.....	82
4.6.4. Durum 4 için Simülasyon Sonuçları.....	87
4.6.5. Durum 5 için Simülasyon Sonuçları.....	92
4.6.6. Durum 6 için Simülasyon Sonuçları.....	93
4.6.7. Durum 7 için Simülasyon Sonuçları.....	98
4.6.8. Durum 8 için Simülasyon Sonuçları.....	99
4.6.9. Durum 9 için Simülasyon Sonuçları.....	101
BÖLÜM 5	106
HİBRİT SİSTEMİN DENEYSEL ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARI.....	106
5.1. HİBRİT SİSTEMİN DENEYSEL SONUÇLARI.....	112
5.1.1. Durum 1 ve Durum 2 için Deneysel Sonuçları.....	112
5.1.2. Durum 3 için Deneysel Sonuçları.....	115
5.1.3. Durum 4 için Deneysel Sonuçları.....	118
5.1.4. Durum 5 ve Durum 6 için Deneysel Sonuçları.....	120

	<u>Sayfa</u>
5.1.5. Durum 7 ve Durum 8 için Deneysel Sonuçları.....	123
5.1.6. Durum 9 için Deneysel Sonuçları.....	125
BÖLÜM 6	128
SONUÇLAR	128
KAYNAKLAR	132
ÖZGEÇMİŞ	141

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Bir günlük örnek FV/rüzgâr güç üretim grafiği.....	16
Şekil 2.2. HGÜS ve HEDS'nin yük ve şebekeye olumlu etkisi.	18
Şekil 2.3. Enerji depolama sistemleri.....	20
Şekil 2.4. Enerji depolama sistemlerinin kapasiteleri.	21
Şekil 2.5. Batarya ve ultrakapasitörün zamana bağlı gerilim değişimi.....	22
Şekil 3.1. Su ve rüzgâr türbinleri için güç yoğunluklarının karşılaştırılması.....	26
Şekil 3.2. Hidrokinetik türbin çeşitleri.....	28
Şekil 3.3. Yatay ve düşey eksenli türbin çeşitlerinin uygulama topolojileri.....	29
Şekil 3.4. Kanatların uç hız oran güç verim grafiği.	30
Şekil 3.5. NACA 0018 kanat profili.	33
Şekil 3.6. NACA 0018 kanat formuna etki eden rüzgâr hız bileşenleri.....	34
Şekil 3.7. NACA 0018 kanat üzerindeki kuvvet ve basınç alanları.....	35
Şekil 3.8. Sabit Reynold sayısına sahip NACA 0018 kanat katılık güç eğrisi.....	40
Şekil 3.9. NACA 0018 kanadın farklı Reynold sayılarındaki C_p - λ ilişkisi	41
Şekil 3.10. Çift katlı Savonius türbin yapısı.	43
Şekil 3.11. Savonius kanatlarındaki iç ve dış bükey hızları.....	43
Şekil 3.12. Savonius kanat türbin tasarım parametreleri.....	47
Şekil 3.13. Darrieus ve Savonius türbinlerinin üretim parametreleri.....	49
Şekil 3.14. Darrieus ve Savonius türbin sisteminin perspektif görünüşleri.	50
Şekil 3.15. Zortrax M200 3D yazıcı ve program arayüzü.....	50
Şekil 3.16. Darrieus, Savonius türbinleri ve yüzer duba 3D çıktı fotoğrafları.....	51
Şekil 3.17. Darrieus ve Savonius türbin sisteminin nihai halinin fotoğrafı.	52
Şekil 4.1. Hibrit sistemin Matlab/Simulink blok diagramı.	53
Şekil 4.2. Açık deniz rüzgâr generatörü ve kontrol algoritması blok diyagramı.	55
Şekil 4.3. Açık deniz rüzgâr generatörü ve redüktör blok diyagramı.	55
Şekil 4.4. Darrieus türbin redüktör dönüştürme oran blok diyagramı.	56
Şekil 4.5. Yüzeysel akıntı generatörü ve DA/DA yükseltici blok diyagramı.	57
Şekil 4.6. Savonius türbin redüktör dönüştürme oran blok diyagramı.	58
Şekil 4.7. DA/DA yükseltici dönüştürücü yapısı.....	59
Şekil 4.8. Batarya gurubu ve çift yönlü DA/DA dönüştürücü blok diyagramı.....	61

Şekil 4.9. Batarya gurubunun çift yönlü DA/DA dönüştürücü kontrol blok diyagramı.....	62
Şekil 4.10. Batarya gurubu (a) düşürücü, (b) yükseltici kontrol blok diyagramı.....	63
Şekil 4.11. Ultrakapasitör gurubu ve çift yönlü DA/DA dönüştürücü blok diyagramı.....	64
Şekil 4.12. Ultrakapasitör gurubunun çift yönlü DA/DA dönüştürücü kontrol blok diyagramı.	65
Şekil 4.13. Ultrakapasitör gurubu (a) düşürücü, (b) yükseltici kontrol blok diyagramı.....	66
Şekil 4.14. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısı.	66
Şekil 4.15. Akıllı enerji yönetim algoritması simulink blok diyagramı.....	68
Şekil 4.16. Batarya gurubunun akım hesaplama kontrol blok diyagramı.	70
Şekil 4.17. Batarya gurubunun SOC durum anahtar bilgisi.	71
Şekil 4.18. Ultrakapasitör gurubunun akım hesaplama blok diyagramı.	73
Şekil 4.19. Durum 1 için güç akış diyagramı.....	74
Şekil 4.20. Durum 1 için HGÜS simülasyon parametre değerleri.	74
Şekil 4.21. Durum 1 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış akımı.	75
Şekil 4.22. Durum 1 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış gücü.....	76
Şekil 4.23. Durum 1 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış akımı.....	76
Şekil 4.24. Durum 1 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış gücü.	76
Şekil 4.25. Durum 1 için DA bara gerilimi.	77
Şekil 4.26. Durum 1 için batarya gurubu giriş akımı.	77
Şekil 4.27. Durum 1 için batarya gurubu SOC doluluk durumu.....	77
Şekil 4.28. Durum 1 için yük gücü.	78
Şekil 4.29. Durum 2 için güç akış diyagramı.....	78
Şekil 4.30. Durum 2 için HGÜS simülasyon parametre değerleri.	79
Şekil 4.31. Durum 2 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış akımı.	80
Şekil 4.32. Durum 2 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış gücü.....	80
Şekil 4.33. Durum 2 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış akımı.....	81
Şekil 4.34. Durum 2 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış gücü.	81
Şekil 4.35. Durum 2 için batarya gurubu SOC doluluk durumu.....	81
Şekil 4.36. Durum 2 için ultrakapasitör gurup terminal gerilimi.	82
Şekil 4.37. Durum 2 için yük gücü.	82
Şekil 4.38. Durum 3 için güç akış diyagramı.....	83
Şekil 4.39. Durum 3 için HGÜS simülasyon parametre değerleri.	84

Sayfa

Şekil 4.40. Durum 3 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış akımı.	85
Şekil 4.41. Durum 3 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış gücü.....	85
Şekil 4.42. Durum 3 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış akımı.....	85
Şekil 4.43. Durum 3 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış gücü.	86
Şekil 4.44. Durum 3 için ultrakapasitör gurubu giriş akımı.....	86
Şekil 4.45. Durum 3 için ultrakapasitör gurup terminal gerilimi.	86
Şekil 4.46. Durum 3 için batarya gurubu giriş akımı.	87
Şekil 4.47. Durum 3 için batarya gurubu SOC doluluk durumu.....	87
Şekil 4.48. Durum 3 için yük gücü.	87
Şekil 4.49. Durum 4 için güç akış diyagramı.	88
Şekil 4.50. Durum 4 için HGÜS simülasyon parametre değerleri.	89
Şekil 4.51. Durum 4 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış akımı.	90
Şekil 4.52. Durum 4 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış gücü.....	90
Şekil 4.53. Durum 4 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış akımı.....	90
Şekil 4.54. Durum 4 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış gücü.	91
Şekil 4.55. Durum 4 için batarya gurubu SOC doluluk durumu.....	91
Şekil 4.56. Durum 4 için ultrakapasitör gurup terminal gerilimi.	91
Şekil 4.57. Durum 4 için yük gücü.	92
Şekil 4.58. Durum 5 için güç akış diyagramı.....	92
Şekil 4.59. Durum 6 için güç akış diyagramı.....	93
Şekil 4.60. Durum 6 için HGÜS simülasyon parametre değerleri.	94
Şekil 4.61. Durum 6 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış akımı.	95
Şekil 4.62. Durum 6 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış gücü.....	96
Şekil 4.63. Durum 6 için batarya gurubu giriş akımı.	96
Şekil 4.64. Durum 6 için batarya gurubu SOC doluluk durumu.....	96
Şekil 4.65. Durum 6 için ultrakapasitör gurubu giriş akımı.....	97
Şekil 4.66. Durum 6 için ultrakapasitör gurup terminal gerilimi.	97
Şekil 4.67. Durum 6 için DA bara gerilimi.	97
Şekil 4.68. Durum 6 için yük gücü.	98
Şekil 4.69. Durum 7 için güç akış diyagramı.....	98
Şekil 4.70. Durum 8 için güç akış diyagramı.....	99
Şekil 4.71. Durum 8 için batarya gurubu giriş akımı.....	100
Şekil 4.72. Durum 8 için batarya gurubu SOC doluluk durumu.....	100

Sayfa

Şekil 4.73. Durum 8 için yük akımı.	100
Şekil 4.74. Durum 8 için yük gücü.	101
Şekil 4.75. Durum 9 için güç akış diyagramı.	102
Şekil 4.76. Durum 9 için HGÜS simülasyon parametre değerleri.	102
Şekil 4.77. Durum 9 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış akımı.	103
Şekil 4.78. Durum 9 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış gücü.	103
Şekil 4.79. Durum 9 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış akımı.	103
Şekil 4.80. Durum 9 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış gücü.	104
Şekil 4.81. Durum 9 için batarya gurubu giriş akımı.	104
Şekil 4.82. Durum 9 için batarya gurubu SOC doluluk durumu.	105
Şekil 4.83. Durum 9 için ultrakapasitör gurup terminal gerilimi.	105
Şekil 4.84. Durum 9 için ultrakapasitör gurubu giriş akımı.	105
Şekil 5.1. HGÜS ve HEDS'nin deneysel topoloji diyagramı.	40
Şekil 5.2. HGÜS ve HEDS'nin elektriksel tüm alt birimleri.	41
Şekil 5.3. HGÜS ve HEDS'nin deneysel fotoğrafı.	43
Şekil 5.4. Akıllı enerji yönetim algoritmasının akış diyagramı.	43
Şekil 5.5. Çalışma durumlarının bir günlük güç grafiği dağılımı.	47
Şekil 5.6. Durum 1 ve Durum 2 için deneysel sonuçların güç akış şeması.	49
Şekil 5.7. Durum 1 ve Durum 2 için rüzgâr türbin genaratör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları.	50
Şekil 5.8. Durum 1 ve Durum 2 için akıntı türbin genaratör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları.	50
Şekil 5.9. Durum 1 ve Durum 2 için batarya, ultrakapasitör, yük gerilim ve akımları.	51
Şekil 5.10. Durum 3 için deneysel sonuçların güç akış şeması.	52
Şekil 5.11. Durum 3 için rüzgâr türbin genaratör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları.	53
Şekil 5.12. Durum 3 için akıntı türbin genaratör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları.	55
Şekil 5.13. Durum 3 için batarya, çift yönlü DA/DA dönüştürücü çıkış gerilim ve akımları.	55
Şekil 5.14. Durum 3 için ultrakapasitör, çift yönlü DA/DA dönüştürücü çıkış gerilim ve akımları.	56
Şekil 5.15. Durum 4 için deneysel sonuçların güç akış şeması.	57
Şekil 5.16. Durum 4 için rüzgâr türbin genaratör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları.	58

Sayfa

Şekil 5.17. Durum 4 için akıntı türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkışı, yük gerilim ve akımları..	59
Şekil 5.18. Durum 5 ve Durum 6 ani yük değişim için deneysel sonuçların güç akış şeması.	61
Şekil 5.19. Durum 5 ve Durum 6 için rüzgâr türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları.....	62
Şekil 5.20. Durum 5 ve Durum 6 için ani yük değişimi sırasında batarya, ultrakapasitör çıkış gerilim ve akımları.....	63
Şekil 5.21. Durum 5 ve Durum 6 için ani yük değişimi sırasında yük gerilim ve akımı.....	64
Şekil 5.22. Durum 7 ve Durum 8 için deneysel sonuçların güç akış şeması.	65
Şekil 5.23. Durum 7 ve Durum 8 için batarya, yük gerilim ve akımları.....	66
Şekil 5.24. Durum 9 için deneysel sonuçların güç akış şeması.	66
Şekil 5.25. Durum 9 için rüzgâr türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları.....	68
Şekil 5.26. Durum 9 için akıntı türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları.....	70
Şekil 5.27. Durum 9 için batarya, ultrakapasitör gerilim ve akımları.....	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Yatay ve dikey eksenli türbinlerin avantaj ve dezavantajları.	31
Çizelge 3.2. Darrieus türbin kanat tasarım değerleri.....	42
Çizelge 3.3. Savonius türbin kanat tasarım değerleri.....	48
Çizelge 4.1. Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri.	54
Çizelge 4.2. HGÜS’de kullanılan DA/DA yükseltici dönüştürücü parametreleri.	60
Çizelge 4.3. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü parametreleri.	67
Çizelge 4.4. HGÜS ve HEDS olası çalışma durumları.....	69
Çizelge 5.1. HGÜS ve HEDS olası çalışma durumlarındaki güç değerleri.	69

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

$2r$: rüzgâr türbininin rotor çapı
A	: türbin alanı
A_a	: akıntı türbin süpürme alanı
C_1	: çift yönlü DA/DA dönüştürücü giriş kondansatörü
C_2	: çift yönlü DA/DA dönüştürücü çıkış kondansatörü
C_{BAT}	: batarya akım kapasitesi
C_d	: sürükleme katsayısı
C_{DA}	: DA bara kondansatörü
C_l	: kaldırma katsayısı
C_P	: türbin güç katsayısı
C_r	: aerodinamik katsayı
C_{UK}	: ultrakapasitör kapasitesi
c_v	: kanat veter uzunluğu
d	: Savonius kanat çapı
D	: Savonius türbin çapı
D_0	: Savonius kanat uç platform çapı
e	: kayma mesafesi
e	: kayma mesafesi
F	: bileşke kuvveti
F_a	: kanat kuvveti
F_d	: sürükleme kuvveti
F_l	: kaldırma kuvveti
F_n	: normal kuvvet
f_p	: anahtarlama frekansı
F_t	: teğetsel kuvvet
G	: kayma oranı

H_a	: Savonius türbin yüksekliği
H_r	: Darrieus kanat boyu
I_{BAT}^*	: batarya şarj referans akımı
I_{BD1}	: 1. çift yönlü DA/DA dönüştürücü akımı
I_{BD2}	: 2. çift yönlü DA/DA dönüştürücü akımı
$I_ç$: DA/DA yükseltici çıkış akımı
I_{DA}	: DA bara akımı
I_g	: DA/DA yükseltici giriş akımı
I_{G1}	: 1. çift yönlü DA/DA dönüştürücü akımı
I_{G2}	: 2. çift yönlü DA/DA dönüştürücü akımı
I_{GM}	: generatör maksimum akımı
I_{OBAT}^*	: batarya deşarj referans akımı
I_{OUK}^*	: ultrakapasitör deşarj referans akımı
I_{UK}^*	: ultrakapasitör şarj referans akımı
$I_{YÜK}$: yük akımı
L_{B4}	: çift yönlü DA/DA dönüştürücü endüktansı
L_{FV}	: DA/DA yükseltici endüktansı
N	: Darrieus kanat sayısı
P_{a^-}	: kanat dış bükey yüzeyinde üretilen güç
P_{a^+}	: kanat iç bükey yüzeyinde üretilen
P_{anet}	: Savonius türbininden elde edilecek net güç
P_{BAT}	: batarya gücü
P_{BD}	: çift yönlü DA/DA dönüştürücü çıkış gücü
P_f	: faydalı çıkış gücü
P_{FARK}	: hibrit güç üretim birimi ve yük gücü farkı
P_g	: genaratör nominal anma gücü
P_{GIOPWR}	: Darrieus türbin generatör gücü
P_{G2OPWR}	: Savonius türbin generatör gücü
P_r	: rüzgâr enerjisi maksimum gücü
P_{TOP}	: hibrit güç üretim biriminin toplam gücü
$P_{YÜK}$: yük gücü
r	: Darrieus türbin rotor yarıçapı
r	: türbin rotor yarıçapı

R_{in}	: redüktör giriş hızı
R_O	: redüktör çıkış hızı
S	: Darrieus kanat tarama alanı
T	: kanat torku
T_p	: anahtarlama hızı
U	: kanat uç hızı
V	: su akış hızı (m/sn)
V_a	: akıntı hızı
V_{BAT}	: batarya gerilimi
V_{BAT_SARJ}	: batarya şarj gerilimi
V_{BD1}	: 1. çift yönlü DA/DA dönüştürücü gerilimi
V_{BD2}	: 2. çift yönlü DA/DA dönüştürücü gerilimi
V_{DA}	: DA bara gerilimi
V_g	: DA/DA yükseltici giriş gerilimi
V_{G1}	: Darrieus türbin generatör gerilimi
V_{G2}	: Savonius türbin generatör gerilimi
V_n	: normal hız
V_{OC}	: generatör açık devre gerilimi
v_{opt}	: optimum güç
V_r	: akıntı hızı
V_r	: rüzgâr hızı
V_{RH}	: rüzgâr hızı
V_t	: teğetsel hız
V_{UK}	: ultrakapasitör gerilimi
V_{UK}	: ultrakapasitör gerilimi
W	: Bağlı hız
θ	: kanat açısı
λ_D	: kanat uç hız oranı
ρ_a	: su yoğunluğu
ρ_r	: havanın yoğunluğu
σ	: türbin katılığı
ω	: açısal hız

KISALTMALAR

3D	: 3 Dimension (3 Boyutlu)
AA	: Alternatif Akım
AEYA	: Akıllı Enerji Yönetim Algoritması
CFD	: Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkan Dinamiği)
DA	: Doğru Akım
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
FV	: Fotovoltaik
HEDS	: Hibrit Enerji Depolama Sistemi
HGÜS	: Hibrit Güç Üretim Sistemi
NACA	: National Advisory Committee for Aeronautics
PI	: Proportional Integral (Oransal İntegral)
SOC	: State of Charge (Batarya Doluluk Durumu)
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynağı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK) elektrik üretimi konusunda birçok araştırma ve uygulama alanları ortaya çıkmıştır ve çıkmaya devam etmektedir. “Yenilenebilir 2016 Küresel Durum Raporu” verilerine göre; günümüzde dünyada üretilen elektrik enerjisinin % 76.3’ü fosil yakıtlardan % 23.7’si ise YEK’den elde edilmektedir. Fosil yakıtlar sonlu kaynaklar olduğundan YEK’lerin ilgi ve araştırma alanı artmaktadır. Güneşten fotovoltaik paneller, rüzgâr, dalga ve akıntı enerjisinden generatör ve dönüştürücüler aracılığıyla elektrik üretilerek fayda sağlanmaktadır. YEK kaynakları diğer enerji üretim kaynaklarına göre birçok açıdan avantajlara sahipken bazı dezavantajları da vardır. Bu kaynaklardan elektrik üretimi safhasında doğaya herhangi bir zararlı madde salınmaması en büyük avantajlarıdır. Doğada bulunan enerjinin farklı teknik ve bilimsel çalışmaların sonucu uygulanan dönüştürme organlarıyla üretim yapması söz konusudur. Bütün bu avantajların yanında enerjinin dönüşümü sırasında doğası gereği enerjinin zamana bağlı olarak kesintili ve kararsız üretimi söz konusudur. YEK’den üretilen enerji iklim şartlarına bağlı olarak süreklilik arz etmemektedir. Güneş enerjisinden üretilen enerji gündüz ve güneşli bir günde, rüzgâr enerjisi rüzgârın olduğu bir günde, dalga ve akıntı enerjisi deniz veya okyanusun günlük rüzgâr ve doğa hareketliliğine bağlı olarak elektrik üretilmektedir. Enerji depolama birimlerinin YEK üretim sistemlerine entegre edilmesiyle birlikte, YEK’nın bu kesintili ve kararsız elektrik üretim grafiği ortadan kaldırılarak enerjinin sürekliliği ve kalitesi sağlanabilir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli avantajı sonsuz bir enerji potansiyeli sahip olması ve elde edilen enerji doğaya zarar vermeden sağlanmasıdır. Bundan dolayı düşük verimlerde bile alınacak enerji miktarı günümüzde sınırlı olan sonlu enerji potansiyeli karşısında büyük bir değer kazanmaya devam etmektedir. Gelişen teknolojik alt yapılar ile verimi ve performansı yüksek güç üreten sistem birimleri

oluşturulabilmektedir. Güneş panellinin ilk örnekleri % 1 ile enerji dönüşümü gerçekleştirirken günümüzde bu dönüştürme oranı % 41'e çıkmaktadır. Aynı şekilde rüzgâr enerjisi ilk olarak su pompalamak için kullanılırken günümüzde MW değerlerinde bir güç üretme potansiyeline sahip enerji kaynağı haline gelmiştir. Okyanus ve denizlerde var olan enerji potansiyelinin keşfedilmesinden sonra birçok enerji dönüşüm yöntemleri gerçekleştirilmiştir. Okyanus/denizde var olan rüzgâr, dalga ve gelgit olayları çeşitli enerji dönüşüm sistemleriyle kullanıcılara sunulan bir kaynak haline gelmektedir. Literatürde ve uygulamada bu enerji dönüşümü için çeşitli kanat ve sistem tasarımları incelenmektedir. Kullanım amaç ve yerine göre değişik tasarımlar geliştirilmiş ve performansları incelenmiştir.

Dünyada birçok ülke büyük güçlü yenilenebilir enerji ve enerji depolama sistemleri üzerine birçok çalışmalar ve hedefler gerçekleştirmektedir. Güneş, rüzgâr ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulum ve yatırım maliyetinin yanında bir diğer dezavantajı ürettikleri enerjinin kesintili, değişken ve kararsız olmasıdır. Burada kesintili olma aralığı saniyeler dakikalar bazında olmakla birlikte mevsimsel değişimlere bağlı olarak daha uzun süreli olabilmektedir. Bu kararsız davranışlar şebeke bazında gerilim dalgalanması, gerilim çökmesi, frekans değişikliği gibi bazı önemli sorunları ortaya çıkarabilmektedir. Bu etkiyi ortadan kaldırmak adına coğrafi olarak farklı bölgelere yenilenebilir enerji kaynak sistem kurulumları ortadan kaldıramayacağı görülmekte sadece bu etkilerinin azaltılacağı görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının bu kararsız ve kesintili çıkış karakteristiğinin en önemli çözümü ise enerji depolama sistemleridir. Geliştirilecek olan algoritmalar ile güç akışını kontrol ederek sistemler arasında enerjinin aktarılmasını sağlar. Böylelikle depolama birimleri YEK'lerin bu olumsuz etkilerini ortadan kaldırılmasını sağlar. YEK'inde olduğu gibi enerji depolama birimlerinin günümüz teknolojisiyle birlikte verim ve performanslarının artması sonucu literatür ve uygulama alanlarında ilgi çekici bir konu haline gelmektedir. Son yıllarda YEK kaynaklarıyla birlikte enerji depolama birimlerinin kullanılmasına ilişkin çok sayıda araştırmaya rastlanmaktadır.

Yüzen platform uygulamaları için dikey eksenli rüzgâr türbinleri yeni gelişen bir konu olmakla birlikte bu türbin çeşitleri için kanat tasarım çalışmaları

gerçekleştirilmektedir. Cranfield Üniversitesi ve Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'nde geliştirilen Darrieus tipi rüzgâr türbini ile 5 MW nominal kapasiteli bir konsept oluşturulmuştur. Tasarlanan türbininin dinamik davranışları incelenerek performans ve iyileştirme çalışmaları yapılmıştır [1]. Ayrıca deniz/okyanus ortamında bulunan dikey eksenli rüzgâr türbinlerin ağır çalışma şartları (dalgalanma, sallanma, yalpalama) için özel tasarım kriterlerinin geliştirilmesi ihtiyacı duyulmaktadır [2]. Çeşitli çevresel koşullar simüle edilerek aerodinamik ve hidrodinamik yüklerin platformun hareketi üzerindeki etkileşimini gösteren yuvarlak ve yarı dalgıç hareket tepkilerine genel bir bakış sunulmaktadır [3]. Bu yapılan çalışmalar sonucunda, yüzen destek yapıları dikey eksenli rüzgâr türbinlerini yeterince destekleyebiliyor olsa da, bağlama sistemlerinin, özellikle dalgalı hava koşullarında dikey eksenli rüzgâr türbinleri aşırı çekme gerilimi ve sallanmaya maruz kaldığından bunları engellemek için bu yapıların yeniden tasarlanması gerektiğini göstermektedir [4].

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri rüzgâr enerjisi teknolojisi için bir alternatif sunmaktadır. Bununla birlikte, Darrieus dikey eksenli rüzgâr türbinleri üzerine yapılan çalışmalar, yatay eksenli rüzgâr türbinler üzerindeki çalışmaların çok gerisinde kaldı ve dikey eksenli rüzgâr türbinlerin gelişimini büyük ölçüde engelledi [5]. Şu anda, Darrieus dikey eksenli rüzgâr türbinler için temel araştırma yöntemleri ağırlıklı olarak hesaplamalı aerodinamik, hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) ve deneysel yöntemleri içermektedir [6].

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin optimizasyonu için birçok yeni yaklaşım geliştirilmektedir. Bu yaklaşımlardan öne çıkan çalışmada, güç, rüzgâr hızı, en-boy oranı, hava viskozitesi, hava yoğunluğu ve düz kanat yapısı dikkate alınarak altı parametrelili bir çözüm kümesi sunulmaktadır. Geliştirilen bu yaklaşım ile kanat için kaldırma, sürüklenme katsayılarının verileri, kaldırma-sürüklenme oranının azaltılması gibi birçok parametrenin tespiti için özel bir çözüm yöntemi de sunulmaktadır [7].

CFD analizi ile bir rüzgâr güçlendirici olarak adlandırılan bir dikey eksenli rüzgâr türbini için hava akışını kontrol eden ekipmanın analizi ve optimum tasarımı sunulmaktadır [8,9]. Rüzgâr kuvvetlendirici, düşük rüzgâr hızında düşük

kullanılabilirlikle enerjiyi toplamakla kalmayıp aynı zamanda yüksek rüzgâr hızındaki dikey eksenli rüzgâr türbin performansını arttırmak için önerilmektedir [10]. CFD analizi ile 5 MW'lık yüzen yatay tip açık deniz rüzgâr türbininin kanat tasarımı ve bağlantı hattının (mooring line) dinamik davranışları ve analizleri gerçekleştirilmiştir [11]. Benzer şekilde darrieus dikey eksenli rüzgâr türbinin elektriksel eşdeğer devre analogisi kullanılarak formülasyonu ve elektriksel karakteristik modellenmesi için yeni yaklaşım yapılmıştır [12,13].

Darrieus dikey eksen rüzgâr türbin kanat yapılarıyla ilgili birçok performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar ile kanat uzunluğu, helezon açısı, eğim açısı ve rotor çapı gibi çeşitli parametrelerin sistem performansını etkilediği tespit edilmiştir [14]. 500 W gücünde prototip olarak yapılan darrieus tipi rüzgâr türbininin kanatlarının eğim açısı 0°'lik bir helisel açı ile -2°'ye eşit olduğunda türbinden maksimum güç alınmaktadır [15]. Darrieus dikey eksen rüzgâr türbininin kanat dönme hızı arttıkça kanat uç hız oranındaki (tip-speed ratio) sürüklenme kuvveti de artmaktadır. Kanadın kalınlık oranı rüzgâr rotorunun performansında önemli bir fark oluşturmamaktadır [16]. Gerçekleştirilen analiz ve deneysel sonucunda değişken kanat açıları güç performansını büyük oranda etkilediği anlaşılmaktadır [17,18]. Türbin kanatlarının çeşitli helezon açıları üretim aşamasında zorluklara neden olsa da güç performansını arttırıcı yönde etkilemektedir [19]. Darrieus dikey eksen rüzgâr türbinin kanat tasarımına ek olarak aynı eksen ve yönde kanatçık eklenmesi kanat yapısının güç faktörünü etkilediği yapılan deneysel çalışma ile anlaşılmaktadır [20]. Açık deniz dikey eksen rüzgâr türbini ile ilgili simülasyon ve deneysel olarak çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sistemin öncelikle dinamik modellenmesi yapılarak, aerodinamik [21], bağlantı hattı ve yapısal dinamikler [22] ve hidrodinamik ve birleştirilmiş modelleme yaklaşımları [23] gerçekleştirilmiştir.

Açık deniz rüzgâr dikey eksenli iki rotor kanadı bulunan 5 MW'lık bir generatörün ANYS'te tasarım analizleri yapılmıştır. Önerilen bu tasarımda düşük ağırlık ve yüksek mukavemetle optimize edilmiş kanat profili elde edilmiştir. Bu çalışma sonucunda ağırlık ve mukavemetin verimi, güç katsayısını etkilediği sistemin dayanıklılığı içinse bazı tasarımsal değişikliğe gidilmesi gerektiğini öngörmektedir [24]. Yapılan diğer bir çalışmada ise enerji üretiminin maliyetini düşürmek için,

kompozit malzemelerden üretilen elastik türbin bıçağını kullanarak pasif güç kontrolü benimsenmiştir. Kanat tasarımındaki deniz koşullarına karşı mukavemet zorluğu da böylece aşılabilmektedir [25].

Hibrit enerji depolama sistemin amacı, farklı karakteristiklere sahip enerji depolama sistem teknolojilerinin güç ve enerji yoğunluğu, çevrim ömrü, tepki süresi gibi özellikleri bir araya getirerek tamamlayıcı niteliklere sahip bir sistem oluşturmaktır [26,27]. Başka bir deyişle, yüksek güçlü enerji depolama birimleri hızlı tepki oranına sahiptir, aksine yüksek enerjili enerji depolama birimleri yavaş tepki oranına sahiptir. Bu nedenle, farklı enerji depolama sistem teknolojilerinin işlevsel avantajlarını bir araya getirerek sinerjik şekilde hibridize etmek yararlı olabilir. Bu yeni teknoloji, özellikle yenilenebilir enerji ve elektrikli nakliye sektörü alanlarında birçok araştırmacı tarafından araştırılmış ve halen araştırılmaktadır. Elektrikli taşıma sektöründe, bataryalı araçların ultrakapasitörle hibrit enerji depolama birimi oluşturarak hibritleştirildikleri gösterilmiştir [28-30]. Yenilenebilir enerji uygulamalarında şebeke entegrasyonu alanında, batarya ve ultrakapasitör güneş enerjisi sistemleri ile kullanılan en yaygın kullanılan hibrit enerji depolama sistemidir [31,32]. Hibrit enerji depolama sistemi kullanmanın, çeşitli uygulamalarda gelecekte elverişli bir çözüm olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, fizibilitelerini göstermek ve işlevselliklerini geliştirmek için daha fazla araştırma ve geliştirme yapılmalıdır [33].

Toplam elektrik enerji alım maliyetini en aza indirmek için mikro şebeke çerçevesinde rüzgâr, güneş, hidroelektrik, gazla çalışan ve termik güç üretim tesisiyle birlikte altı farklı enerji santralinden bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Simülasyon tabanlı olan bu çalışmada özellikle, dünyanın her yerindeki en hızlı büyüyen önemi nedeniyle iki farklı rüzgâr çiftliğinden elde edilen güç verileri kullanılmaktadır. Önerilen optimizasyon algoritması toplam maliyeti en aza indirmek ve belirli bir yerde güç talebini yerine getirmek için batarya enerji depolama sisteminin kullanılmasının kaçılmaz olduğunu göstermektedir [34-36].

Batarya enerji depolama sistemi, rüzgâr veya güneş enerjisi üretiminde güç dalgalanmaların azaltılması için günümüz teknolojik altyapısında mevcut olarak

kullanılan en uygun çözüm aracıdır [37,38]. Rüzgâr ve fotovoltaik panellerden oluşan hibrit güç üretim birim çıkış gücü iklim şartlarına bağlı olarak dalgalanmalar göstermektedir. Bu güç dalgalanmasını kompanze etmek ve azaltmak için batarya enerji depolama birimleriyle birlikte kullanılmaktadır [39,40]. Bu tür batarya enerji depolama tabanlı hibrit güç üretim sistemlerinde, güç çıkış seviyelerini ve batarya şarj seviyesini etkili bir şekilde düzenleyen uygun bir kontrol stratejisi gerektirmektedir [37]. Bir enerji kontrol yöntemini kullanarak, enerji depolama biriminin doluluk durumunu doğru bir şekilde belirlenmesi sağlanır. Böylelikle, enerji depolama biriminin hizmet ömrünü uzatarak pil performansını artırıcı yönde fayda sağlamaktadır. Ayrıca enerji depolama biriminin kontrol algoritmasının belirlediği zaman aralıklarında devreye girerek fotovoltaik panel veya rüzgâr enerjisinin çıkışındaki güç dalgalanması oranı düşürülmüş olacaktır [41].

Dalga enerjisinden güç üretim sistemi şebekeye bağlı durumda çalışırken, dalga enerjisi farklı zaman aralıklarında kesintili olarak güç üretir ve bu elektrik şebekesi üzerinde ciddi etkilere sebep olur. Bu problemi çözmek için, batarya ve volan enerji depolama biriminden oluşan hibrit enerji depolama sistemi önerilmektedir. Volan enerji depolama sistemi ve batarya enerji depolama sistemi özelliklerine göre sırasıyla farklı şarj/deşarj karakteristiğine sahiptir. Hibrit enerji depolama denetleyicisi bütün sistem parametrelerini değerlendirerek zamanında etkin kararlar vererek kontrol etmek üzere tasarlanmıştır. Böylece, hibrit enerji depolama sisteminin enerji dağılımı, bataryanın aşırı şarj veyadeşarjını önlemek için kontrolünü sağlar. Simülasyon sonuçları, sadece hibrit enerji depolama sisteminin şebekeye bağlı modda dalga üretim sisteminin gücünü etkin bir şekilde düzenleyebildiğini değil aynı zamanda daha karmaşık mikro şebeke çalışma koşulları için sağlam bir temel oluşturduğunu ispatlamaktadır [42]. Bir rüzgâr enerji çiftliği için batarya enerji depolama sistemi üretilen enerjinin kaliteli bir şekilde aktarılmasını sağlamak için önemli bir birimdir. Depolama destekli bir rüzgâr güç üretim sistemi, batarya enerji depolama sisteminin ömrünü uzatırken rüzgâr enerjisi tahmin hatalarının etkilerini azaltabilmektedir [43].

Modern elektrik enerji şebeke sisteminde enerji depolama birimleri giderek önem kazanırken, tek bir enerji depolama elemanı tüm farklı talepler aynı anda

karşılanamamaktadır. Rüzgâr enerjisinin şebeke entegrasyonu için tamamlayıcı nitelikleri nedeniyle, süperiletken manyetik enerji depolama ve bataryadan oluşan bir hibrit enerji depolama sistemi önerilmektedir. Simülasyon ortamında her bir birim modellenerek bulanık mantık denetleyicisi ile sistemin farklı çalışma şartları altında davranışı incelenmektedir. Sistem seviyesinde yapılan kontroller ile şebeke talebini göz önünde bulundurarak süperiletken manyetik enerji depolama ve batarya arasında güç tahsisi gerçekleştirmektedir. Gerçekleştirilen sistem ile birlikte doğru akım bara gerilim dalgalanmalarını, rüzgâr enerjisinin çıkış gücündeki dalgalanmayı önlediği ve enerji depolama biriminin verimli bir şekilde kullanıldığı gözlenmiştir [44].

Gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise volan enerji depolama sistemi kullanarak, elektrik şebekesine bağlı hibrit açık deniz rüzgâr ve gelgit çiftliğinin kararlı ve dinamik analiz sonuçlarının simülasyon sonuçları sunulmaktadır. İncelenen gelgit çiftliğinin güç üretim kapasitesi 40 MW, açık deniz rüzgâr çiftliğinin güç üretim kapasitesi 80 MW olarak simüle edilmektedir. Çalışılan sistemin değişken rüzgâr hızları altında dinamik simülasyonları da yapılmıştır. Sistemde bulunan volan enerji depolama birimi sayesinde şebekeye aktarılan aktif gücün, kararlı çalışma durum analizinde sabit ve kaliteli bir elektrik enerjisi aktarılabilceği sonucuna varılmaktadır. Sistemin değişken rüzgâr hızlarında (5 m/sn-20 m/sn) dinamik incelendiğinde, önerilen volan enerji depolama sisteminin gerilim dalgalanmalarını baskılama ve sistemin aktif güç dalgalanmalarını da azalttığı görülmektedir [45].

Rüzgâr enerjisinin güç çıkışındaki dalgalanma oldukça geniş değerlerdedir ve bu dalgalanma bir batarya enerji depolama sistemiyle önlenebilir. Sistemde bulunan batarya enerji depolama biriminin kapasitesini azaltmak için uzun süreli dalgalanma bileşenleri azaltılmalıdır. Küçük ölçekli gelgit güç üretim sistemi ile büyük ölçekli açık deniz rüzgâr çiftliğinden oluşan bir hibrit güç üretim sistemi önerilmektedir. Hibrit güç üretim sistemi temel amacı, gelgit güç üretim sisteminin çıkış gücünü kontrol ederek rüzgâr enerjisindeki dalgalanmasını telafi etmektir. Gelgit gücü, rüzgâr enerjisinin uzun vadeli güç dalgalanmasını kompanze ettiğinde, batarya enerji depolama kapasitesi azalmaktadır. Gelgit güç üretim biriminin telafi edebileceği güç dalgalanmasının bir üst sınır frekansı vardır. Bu değerler hibrit güç üretim sisteminin gerekliliklerine ve rüzgâr koşullarına göre ayarlanmaktadır [46].

Fotovoltaik, dalga enerjisi ve batarya enerji depolamalı bir sistemle yenilenebilir enerji kaynak türlerinin birini kullanarak bir güç üretim birimi oluşturulmuştur. Fotovoltaik güneş panellerinin ve dalga enerjisinin dalgalı güç karakteristiği batarya enerji depolama birimi ile kompanze edilerek enerjinin sürdürülebilirliği sağlanmaktadır [47].

Literatürde, enerjinin kaliteli bir şekilde üretimi ve sürekliliğini sağlamak için rüzgâr ve güneş enerjili güç üretim sistemine batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji depolama birimi eklenerek [48,49], açık deniz rüzgâr ve dalga çiftliği bulunan güç üretim sistemine volan enerji depolama birimi eklenerek birçok değişik sistemin simülasyon bazında analiz sonuçları gerçekleştirilmiştir [50].

Kesintili ve aralıklı çıkış güç üretim karakteristiği yenilenebilir enerji kaynaklarının başlıca özelliklerden bazılarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakların kesintiliğinin bu dezavantajı bazı özel tasarımlarıyla aşılabılır. Bu dezavantajların üstesinden gelmek için birkaç yenilenebilir enerji kaynağına depolama sistemleri dâhil edilerek önlenebilir. Bu ek tasarım hususları genelde yenilenebilir sistemin genel maliyetini arttırmaktadır. Bu nedenle, bileşenlerin boyutunu optimize etmek ve bir enerji yönetim algoritması tasarlayarak sistemin maliyeti düşürmek ve olumsuz etkilerini sınırlandırmak gerekir. Enerji yönetimi stratejisi genellikle enerji sisteminin türüne ve bileşenlerine bağlıdır. Başarılı bir enerji yönetimi stratejisi geliştirmek için çeşitli yaklaşımlar ve teknikler kullanılmaktadır [51].

Akıllı şebeke altyapılarında batarya enerji depolama sistemlerinin kullanımı kaçınılmaz hale gelmektedir. Bu sistemlerin şebeke ile entegrasyonu birlikte karmaşık kontrol algoritmalarını beraberinde getirmektedir. Fotovoltaik enerji santrali, mini hidro enerji santralleri ve dizel enerji santrallerinin olduğu bir hibrit güç üretimine batarya enerji depolama sistemi ilave edilerek bir simülasyon analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Bütün birimleri kontrol eden bir enerji yönetim algoritması gerçekleştirilmiştir. Bu enerji yönetim algoritmasıyla işletim maliyeti ve toplam CO₂ emisyonunun en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Yağışlı bir günde hidro enerji santrallerini devreye alarak, kurak sezonda optimal ekonomik maliyet ile dizel enerji santrallerini devreye çevresel etkileri en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

Batarya enerji depolama birimini de tepe değer güçlerinde devreye alarak santrallerin optimum kullanımlarını sağlamaktadır. Yağışlı mevsimlerde, sıfır CO₂ emisyonuyla dizel enerji santral kullanımı önemli ölçüde düşürülmekte ve tüm talep yük yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak sağlanmaktadır [52].

Şebekeden bağımsız rüzgâr enerjisi dönüştürme sistemlerinde, yüksek ve düşük enerji üretim durumlarıyla başa çıkmak ve sistemi daha yalın hale getirmek için genellikle bir enerji depolama sistemi gereklidir. Bu sorunun üstesinden gelmek için kurulan sistem bir enerji yönetim algoritmasıyla kontrol edilmektedir. Bu enerji yönetim algoritmasının görevi sistem çıkış gücünü dalgalanmasını önleyerek sürekli olarak yük talebini karşılamaktır [53,54].

Rüzgâr enerjisinin çıkışındaki dalgalı güç üretim etkilerini azaltmak için karma açık deniz rüzgâr ve deniz akıntı türbinleri geliştirerek yeni hibrit güç üretim sistemi önerilmektedir. Rüzgâr enerjisinin rasgele üretim karakteristiğinden farklı olarak, deniz akıntıları yavaş döngüsel bir yapıya sahiptir. Önerilen hibrit güç üretim sisteminde yapay sinir ağ enerji yönetimi kullanarak rüzgâr hızı tahminleri için öngörüler geliştirilmektedir. Bu enerji yönetim algoritması, en düşük enerji depolama kapasitesi kullanarak güç dalgalanmalarını azaltmak ve İngiltere elektrik piyasasına göre üretim planlama stratejisi geliştirmeyi amaçlamaktadır [55].

Batarya ve ultrakapasitör içeren hibrit enerji depolama sistemindeki en büyük zorluklardan biri, iyi bir güç bölme performansı sağlayabilecek gerçek zamanlı denetleyici tasarlamaktır. Yapılan çalışmalarda, bu konuyu en iyi şekilde çözen bazı denetleyici enerji yönetim stratejisinin tasarımını sunulmaktadır [56]. Böylelikle bataryanın ömrü uzatılmakta ve hibrit enerji depolama sistemindeki güç kayıplarını azaltılmaktadır. Yapılan çalışma ile hibrit enerji depolama sisteminde bir enerji yönetim algoritmasının kullanılması batarya ömrünü % 60'ın üzerine çıkardığı ve performansının arttığı gözlenmiştir [57].

Yüksek kapasiteli enerji depolama birimleri, yenilenebilir enerji kaynakları ve dalgalı yük profilleri tarafından üretilen güç bozukluklarını gidermek için arzu edilir. Batarya enerji depolama sistemleri güç akışını düzleştirmek için kullanılabilir ancak

sık sık derin şarj ve deşarj döngüsü batarya ömrünü önemli ölçüde azaltır [58]. Güç akışını düzenlerken batarya deşarj çevrimini azaltmak için süper iletken manyetik enerji depolaması ile batarya enerji depolamasında oluşan bir hibrit enerji depolama sistemi kullanılmaktadır. Dinamik bir deniz dalga enerji dönüşüm sistemi simüle edilerek hibrit enerji depolama birimiyle entegre edilmektedir. Araştırma sonucunda batarya ömründe % 26'lık bir artış elde edilmiştir [59].

Fotovoltaik enerji kaynakları kesintili ve sürekli olmayan bir yenilenebilir enerji türüdür. Bu nedenle batarya ve ultrakapasitör hibrit enerji depolama sistemi ile enerjinin sürekliliğinden yararlanılarak, YEK'nın daha etkin bir şekilde kullanılması sağlanabilir. Batarya ve ultrakapasitörden oluşan Hibrit Enerji Depolama Sistemi (HEDS) ile bataryaların ömrünü ve depolama kapasitesini maksimum şekilde kullanmayı ve şarj/deşarj çevrimini de minimum seviyeye getirmeyi amaçlamaktadır. Bu sistemlerde enerjinin sürekliliği olmadığı için HEDS ile özellikle şebekeden bağımsız güç sistemlerinde daha kapsamlı kullanılabilir. Batarya ve ultrakapasitör depolama teknolojisi şebeke bağlantılı olarak da HEDS'de kullanılabilir [60].

Batarya temelli enerji depolama uygulamaları son yıllarda oldukça ilgi görmektedir. Lityum iyon, sodyum sülfür ve vanadyum redox gibi yeni teknolojiler ile batarya verimleri oldukça gelişmiştir. Özellikle maliyetleri çok yüksek olan lityum iyon tipi bataryaların şarj deşarj verimi neredeyse % 99'e ulaşmıştır. Bataryalar, herhangi bir noktada uygulanabilen, saatlerce yüksek miktarda güç sağlayabilen, modüler çözümler sunmaktadır. Ayrıca bataryalar, içinde oluşan elektro-kimyasal reaksiyon, cevap hızı ve güç miktarını sınırlasa da oldukça hızlı cevap verebilirler. Ancak bataryalar enerjiyi Doğru Akım (DA) olarak depoladığı için Alternatif Akım (AA) elektrik şebekesine bağlanabilmesi için güç elektroniği ekipmanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, enerji dönüşümü nedeniyle oluşan kayıplar sonucu verimlerinin düşmesine neden olmaktadır. Ultrakapasitör ise içinde herhangi bir hareketli parçasının ve kimyasal bir reaksiyonun olmaması nedeniyle uzun ömürlü ve bakım maliyetleri düşük oldukça verimli ve dayanıklı enerji depolama çözümüdür. Ayrıca kurşun asit bataryalar ile karşılaştırıldığında enerji yoğunluğu düşük, maliyetleri yüksek fakat özellikle kısa süreli yüksek güçlü uygulamalarda dayanıklı

olmaları ve cevap sürelerinin kısa olması ultrakapasitörleri, düşük enerji ve yüksek güçlü uygulamalarda oldukça rekabetçi kılmaktadır [61-66].

Gerçekleştirilen literatür taramasında yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama çalışmalarında birçok ulusal ve uluslar arası çalışmalar yapılmıştır. Hibrit güç üretim alanında farklı özelliklere sahip güç üretim kaynakları bir araya getirilerek karasız ve kesintili güç üretimlerini tamamlayıcı bir yapı oluşturulmaktadır. Aynı şekilde farklı elektriksel karakteristiklere sahip enerji depolama birimleri kullanılarak uzun süreli, hızlı tepki süresi gibi özellikleri bir arada bulunduran bir hibrit enerji depolama sistemleri meydana getirilmektedir. Birden fazla üretim ve depolama sistemi içeren yapıların etkili ve verimli bir şekilde kullanılması için özgün enerji yönetim algoritmaları geliştirilmiştir. Bu çalışmalar simülasyon ve deneysel olarak gerçekleştirilerek sistem ve birimlerin ayrıntılı dinamik davranışları incelenmiştir. Tez çalışması kapsamında hibrit enerji depolama sisteminin hibrit güç üretim sistemine entegrasyonu çalışması ile ulusal ve uluslar arası literatüre katkıda bulunmaktadır. Bu yönüyle tezin literatürdeki önemi oldukça fazla olduğu her yönüyle görülmektedir. Hibrit enerji depolama sistemin entegrasyonu ve bu hibrit birimlerin özel olarak tasarlanan devrelerle özgün akıllı enerji yönetim algoritması oluşturulmuştur.

Doğada hali hazırda yüksek enerji potansiyeline sahip YEK'den biride deniz/okyanus enerjisidir. Deniz/okyanus enerjisini kullanarak elektrik enerjisi üretmek tezin en önemli konularından birincisidir. Deniz/okyanusta birden fazla enerji çeşidi mevcuttur ve bunlar rüzgâr, dalga, gelgit, akıntı enerjisidir. Aynı anda birden fazla enerji kaynağını kullanarak elektrik enerjisi dönüştürecek bir sistem tasarlamak tezin elektrik üretme konusundaki amaçlarındandır. Deniz ve okyanusun üzerine kurulan açık deniz rüzgâr (offshore wind) enerjisi olarak bilinen güç üretim sistemleri YEK çeşitlerinden biridir. Bu yüzer platformun açık denizlere kurulmasıyla birlikte deniz ve okyanuslarda var olan rüzgâr enerji potansiyelinden faydalanılmaktadır. Karaya kurulan sistemlere göre özel bir alan (bina yapılarından yakın, orman içerisine v.b. olmaması gerekir) gereksinimi bulunmayan açık deniz rüzgâr enerji sistemleri rüzgâr potansiyelinin yeterli olduğu açık deniz bölgelerine kurulabilmektedir. Bu sistemlerin yüzer bir platform üzerinde olduğundan denizin

altında da potansiyel enerji bulunduğundan alt kısımdaki yüzeysel akıntı enerjisinden elektrik elde edilebilir. Bu tezde, hem açık deniz rüzgâr hem de yüzeysel akıntı enerjisinden faydalanılarak bir platform ile iki doğa enerjisinden yararlanılıp yüksek potansiyelli bir Hibrit Güç Üretim Sistemi (HGÜS) kurulmuştur. Tezin araştırma sorusuna cevap veren diğer önemli ikinci konuda; YEK'in doğası gereği kesintili ve kararsız olan bu enerji çeşitlerinin sürekliliğini sağlamak için önerilen HGÜS'e enerji depolama birimi eklenerek talep tarafındaki ihtiyacı karşılamak ve kaliteli elektrik üretimi için en uygun çözümü oluşturmaktır. Tezde enerji depolama birimi olarak batarya ve ultrakapasitör kullanılmıştır. Ultrakapasitör bataryaya göre çok daha büyük güç yoğunluğuna sahip olduğundan daha kısa zaman periyodunda çok daha büyük güç desteği sağlayabilir. Buna karşın batarya daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir, ultrakapasitörle karşılaştırıldığında daha yüksek enerji depolayabilir ve daha uzun süre enerji sağlayabilir. Birbirini tamamlayıcı özelliklerinden dolayı ultrakapasitör depolama ünitesiyle anlık, batarya depolama ünitesiyle sürekli güç ihtiyacı karşılanmaktadır. Böylelikle batarya ve ultrakapasitör ile hibrit enerji depolama sistemi oluşturulmuştur. Hibrit güç üretim sistemine, hibrit enerji depolama sistemi entegre edilerek sürekli ve kaliteli enerji ihtiyacı sağlayan bir güç üretim sistemiyle YEK'in bu problemine çözüm olmaktadır. Batarya ve ultrakapasitör hibrit enerji depolama sistemi ile enerjinin sürekliliğinden yararlanılarak, YEK'in daha etkin bir şekilde kullanılması sağlanabilir. Batarya ve ultrakapasitörden oluşan HEDS ile bataryaların ömrünü ve depolama kapasitesini maksimum şekilde kullanmayı ve şarj/deşarj çevrimini de minimum seviyeye getirmeyi amaçlamaktadır. Tez kapsamında, HGÜS ile HEDS birbirine entegrasyonu ve bu birimlerin enerji yönetim algoritması ile kontrol edilmesi tezin özgünlüğünü oluşturan en önemli noktadır.

HGÜS ile HEDS birbirine entegrasyonu ile enerji depolama yöntemlerinin faydaları, sistem tarafından üretilen elektrik enerjisinin frekans ayarı sağlanması, dönen rezerv görevi yapması, güç kalitesini yükseltmeye yardım etmesi, kapasite artışı sağlanması, yük seviyelendirmeye yardım etmesi, gerilim desteği sağlanması, tepe yük azaltmaya yardım etmesi olarak sayılabilir. Bu faydalarından dolayı enerji depolama, gelecek dönemde YEK'in alt yapısının anahtar elemanı olarak görülmektedir. Elektrik enerjisinin üretim ve tüketim arasında dengenin kurulması ve son kullanıcıların

taleplerinin karşılanması konusunda kararlılığı için enerji depolama gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Bu tezde tasarlanan HGÜS ve HEDS'in birlikte elektrik enerjisinin her zaman kullanıma hazır durumda olması amaçlanmıştır. Tez kapsamında üretilen prototip sistemde üretilen, depolanan ve tüketilen gücü sürekli olarak takip ederek birimlerin durumlara göre çalışmasına karar veren bir özgün akıllı enerji yönetim algoritması içermektedir.

BÖLÜM 2

HİBRİT GÜÇ ÜRETİM SİSTEMLERİ VE HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

2.1. HİBRİT GÜÇ ÜRETİM SİSTEMLERİ

Yenilenebilir enerji kaynaklarına son zamanlarda ilginin artarak devam ettiği gözlenmektedir. Alternatif enerji kaynakları kirletici değildir ve ulaşılabilirliği kolaydır. Bu gibi avantajlar onları birçok uygulama için çekici hale getirmektedir. Günümüzde birden fazla YEK bir araya getirilerek HGÜS'ler oluşturulmaktadır. En yaygın olarak kullanılan rüzgâr ve Fotovoltaik (FV) sistemler su pompalama, aydınlatma, uzak alanların elektrik ihtiyacını karşılama ve telekomünikasyon gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Telsiz telekomünikasyon, uydu, yer istasyonları gibi uzak bölgelerde bulunması gereken sistemler için HGÜS tercih edilmektedir. Yenilenebilir enerji üreten sistemlere olan talep arttıkça, bu kaynaklar ile yapılan araştırma geliştirme çalışmaları hızla devam etmektedir.

YEK çeşitleri dağıtılmış enerji üretimi için kullanıldığında, kaynakların her birinin kendi yapısına ait bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak adına popüler bir çözüm olarak, genellikle hibrit sistemler oluşturulmaktadır. Örneğin, rüzgâr ve FV panel enerjisini ele aldığımızda rüzgârın estiği zaman dilimlerinde güç üretilirken FV paneller ise sadece gündüz ve güneşli bir zaman diliminde güç üretebilmektedir. FV sistemler, modüler bir yapıya sahiptir ayrıca daha fazla güç üretimi talep edildiğinde, kurucu tarafından ihtiyaç duyulduğunda kademeli olarak sisteme yeni bir kaynak eklenmesine izin verir. Işıma ve güneşlenme seviyesi bölgeye, mevsime ve günün saatine göre değişmekle birlikte, güneş ışığı tüm bunlara rağmen gezegenin neredeyse her yerinde bulunabilen enerji kaynaklarından biridir.

Bununla birlikte, birçok yerde kışın başlaması veya bulutlu dönemler güneş ışığının kullanılabilirliğini sınırlamaktadır. Yükün ihtiyaç duyduğu zaman aralığı ile güneşten üretilen enerji zaman aralığı uyuşmadığında, yoğun kullanım sırasında oluşan aşırı enerji genellikle bir enerji depolama sistemi ile karşılanır. Büyük bir depolama kapasitesine olan ihtiyaç, sistemin maliyetini önemli ölçüde arttırabilir. Genellikle, sürekli kullanılabilirliği sağlamak için yedek bir elektrik jeneratörü veya harici bir şebeke gereklidir, bu da daha yüksek maliyet anlamına gelmektedir.

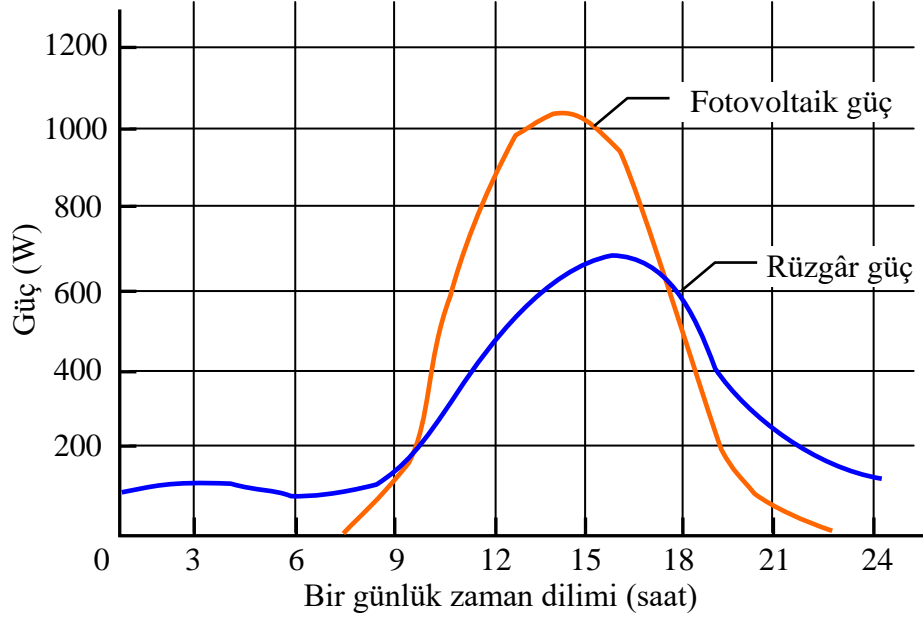
Güneş ışığı gibi rüzgâr da serbest ve kirletici olmayan bir enerji kaynağıdır, ancak daha büyük türbin modellerinde gürültü kirliliği dikkate alınmalıdır. Rüzgâr, arazi ve diğer çevresel özelliklere göre çarpıcı bir şekilde değişmesine rağmen, her yerde belli bir kapasitede bulunabilir.

Bununla birlikte, şebekeden bağımsız rüzgâr sistemleri, FV sistemlere benzer zorluklar yaşamaktadır. Rüzgâr hızları bir saatten diğerine ve bir mevsimden diğerine önemli ölçüde dalgalanma eğilimindedir. Üretilen enerjide öngörülemeyen gecikmeler meydana gelebilir. YEK yıl boyunca önemli bir süre boyunca kullanılabilir bir enerji üretilemez ve sabit yük taleplerini karşılayamaz. FV gücünde olduğu gibi, kesintisiz güç sağlamak için sistemin maliyetine ilave olarak bir enerji depolama veya ek bir yedek güç kaynağı gereklidir.

Hem güneş hem de rüzgâr enerjisini bir hibrit üretim sistemine entegre edilen bir sistemde, tek başına benzerlerine göre önemli avantajları bulunmaktadır. En önemlisi, bir rüzgâr ve güneş enerjisinin hibrit kullanımı, sistemin ürettiği enerjide daha az dalgalanmalar meydana getirerek kararlılık elde edilebilir. Bu, toplam enerji çıktısı ve güvenilirliği artırır ve enerji tasarrufu gereksinimlerini ve bunlarla ilişkili maliyetleri azaltır. Şekil 2.1’de tipik bir gün için rüzgâr ve FV güneş enerjisi üretimini göstermektedir.

Şekildeki grafikten görülebileceği gibi, gece saatlerinde FV ve rüzgâr enerji üretimi oldukça düşüktür. Bu zaman aralıklarında, yük talebi olduğunda enerji depolama gücüne ihtiyaç olduğu gözükmektedir. Sabah ve öğlen saatlerinde hem FV hem de rüzgârdan çok fazla enerji üretilmektedir. Bu fazla enerji miktarı yükün talep ettiği

miktardan fazla ise kalan aşırı enerji bir batarya biriminde depolanabilir. Akşam saatlerinde ise FV ve rüzgâr enerjisinden üretilen enerji miktarı giderek azalmaktadır. Bu zaman dilimleri özellikle yük talebinin tepe yaptığı noktadır. Bu durumda ise kaynaklardan üretilen güç azaldığı için öğlen saatlerinde enerji depolama birimi tarafından depolanan enerji kullanılabilir.



Şekil 2.1. Bir günlük örnek FV/rüzgâr güç üretim grafiği [60].

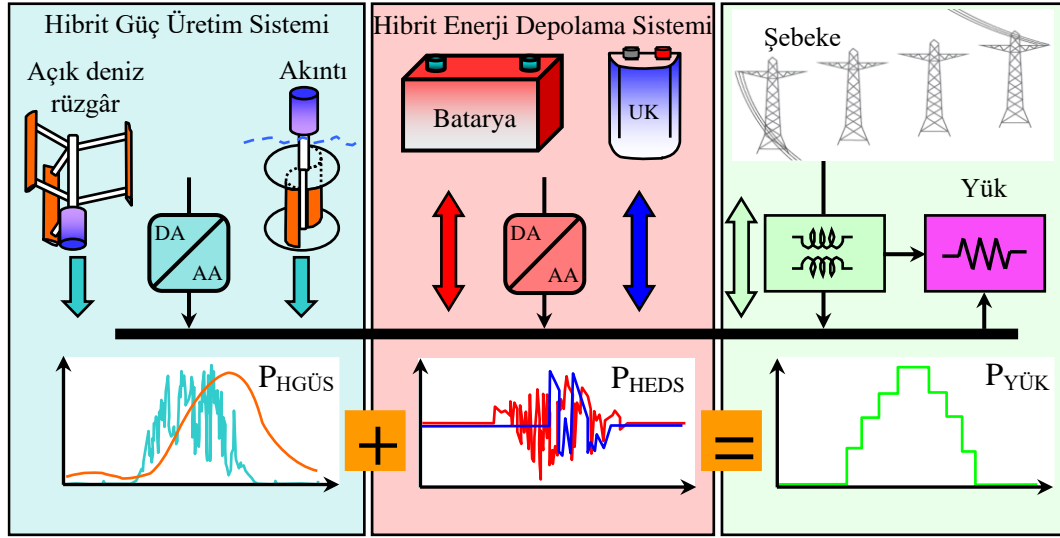
Yıllık bazda bakıldığında, rüzgâr enerjisinden elde edilen enerji miktarı sonbahar ve kış aylarında maksimum seviyeye ulaşmaktadır. FV güneş enerjisi ise ilkbahar ve yaz aylarında maksimum düzeyde olduğu görülmektedir. Bu mevsimsel değişim, rüzgâr enerjisinin kışın zirve yapan ısıtma ve aydınlatma uygulamaları için uygun olduğunu, FV enerjisinin ise yazın klima ve sulama ihtiyaçlarını karşıladığını göstermektedir. Bu şekilde, rüzgâr ve FV birlikte günlük ve yıllık toplam pik üretim periyotlarını uzatan tamamlayıcı bir sistem oluşturur.

Herhangi bir dağıtılmış üretim sisteminde olduğu gibi, bataryanın bir HGÜS'deki rolü temel olarak, az miktarda üretim yapıldığında veya hiç üretilmediğinde kullanılmak üzere yoğun zamanlarda üretilen fazla enerjinin depolanmasını sağlamaktır. Bununla birlikte, eğer sistem şebekeye bağlıysa ve sistemde fazla enerji üretiliyorsa, ek ekonomik teşvik sağlamak amacıyla fazla enerji şebekeye satılabilir.

Enerji depolama birimi, düşük enerjinin talep edildiği anda enerjiyi depolayarak, konut ihtiyaçlarının en üst seviyede olduğu zaman dilimlerinde tesisin enerji ihtiyaçlarına yardımcı olabilir. Böylece, bu yoğun talep anında, enerji alım maliyetinin yüksek olduğu saatlerde enerji depolama birimi kullanılarak kullanıcı tasarruf sağlamış olur.

Bu tez çalışmasında hibrit güç üretim sistemi açık deniz rüzgâr ve akıntı enerjisi kullanılmaktadır. Yukarıda bahsedilen örnekte ki gibi karasal rüzgâr enerji karakteristiği, deniz üzerindeki rüzgâr enerjisi ile benzer özellikler taşımaktadır. Açık deniz rüzgâr enerjisi de yine günlük ve mevsimsel olarak değişkenlik göstermektedir. Deniz içerisindeki sıcak ve soğuk suyun taşınması sırasında akıntı enerjisi meydana gelir. Rüzgâr enerjisi ise bu oluşumdan bağımsız olarak gece ve gündüz meydana gelebilir. Bu yüzden, rüzgâr enerjisi akıntı enerjisinden daha dinamiktir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen akıntı enerjisi açık deniz rüzgâr enerjisini destekleyici bir yapıdadır. Deniz veya okyanus altında bulunan akıntı enerjisi doğal olaylara ve bölgesel yapıya bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Akıntı enerji kapasitesi bulunduğu bölgeye göre farklılıklar göstermesinin yanı sıra sürekli olarak var olduğu bölgelerde mevcuttur. Tez çalışmasının İstanbul Boğazı'na göre tasarlandığı düşünülürse, akıntı hızı sürekli vardır sadece zamana bağlı olarak kapasitesi değişim göstermektedir. Açık deniz rüzgâr ve akıntı enerjisi ile kaynaklar arasındaki farklı zaman aralıklarındaki güç üretim frekansları kullanılarak bir hibrit yapı kurulmuştur. Böylece FV ve rüzgâr enerji örneğinde olduğu gibi tez çalışmasında kullanılan hibrit enerji üretim sistemi birbirlerini tamamlayıcı veya destekleyici bir karakteristik elde edilmiş olur. Kaynakların bu tamamlayıcı kombinasyonu, enerji depolama gereksinim kapasitesini azaltılmasını sağlar. Çünkü herhangi bir kaynaktan güç üretilmediğinde, kullanıcının depolama biriminden yararlanmak zorunda kaldığı durumlar daha az olacaktır. Ayrıca, enerji depolama biriminde bulunan bataryaların derin deşarjları azalacağından kullanım ömürleri artar. Şekil 2.2'de açık deniz rüzgâr, akıntı enerji içeren HGÜS ve hibrit enerji depolama sisteminin birlikte kullanılmasıyla sistemin yüke ve şebekeye yapmış olduğu olumlu etki verilmektedir.

Hibrit sistem, izole edilmiş küçük bölgelerdeki köyler için idealdir, çünkü bölgenin yenilenebilir doğal kaynaklarından faydalanırken, uzaktaki bir elektrik şebekesine gerek kalmadan ihtiyaç duyulan elektrik enerjisi sağlanmaktadır [67].



Şekil 2.2. HGÜS ve HEDS'nin yük ve şebekeye olumlu etkisi.

HGÜS'ün etkili bir şekilde kullanılabileceği tek yer uzaktaki kırsal alanlar değildir. Kentsel ortamlar için hibrit sistemlerin geliştirilmesi şebekeye ek bir güç kaynağı oluşturacaktır. Arazilerin maliyetli olduğu ve insanların çoğu zaman yeni enerji santrallerinin inşasına karşı çıktığı kentsel alanlarda, küçük ölçekli konutlarda yenilenebilir enerji hibrit sistemleri oluşturulabilir. Böylece dağıtılmış bir elektrik üretim sistemi, artan bir yük talebini karşılamak için mevcut şebeke altyapısına entegre edilebilir. Böyle bir dağıtılmış elektrik üretim sistemi, sistem kayıplarını azaltabilir ve yükü arzı ile daha yakından bağlantı oluşturulduğundan talep tarafı yönetimi yapılabilir.

Küçük ölçekli HGÜS karmaşık şehirleşme ortamda "geleceğin trendi" olarak sınıflandırılmıştır. HGÜS'ler giderek büyüyor ve yaygınlaşıyorlar ve çeşitli ortamlarda dağıtılmış enerji üretimine en pragmatik yaklaşım olarak görülmeye başlamıştır. Bu fikir, sadece çevre kirliliğini en aza indirmemekte, aynı zamanda mevcut elektrik sistemlerinin iletim ve dağıtım ekipmanlarındaki kayıpların azaltılmasına fayda sağlamaktadır. Talep tarafındaki işletmedeki kayıpların

azaltılmasına yardımcı olan HGÜS'ler, dağıtılmış enerji üretimine doğru pozitif bir eğilimdir. HGÜS'ler elektrik dağıtım hattına daha az bağımlı hale gelmektedir.

Sonuç olarak, HGÜS'lerin kullanılması, dağıtılmış enerji üretimini ilerletmek için mükemmel bir yoldur. Rüzgâr, güneş ve akıntı enerji kaynakları, toplam pik enerji üretim sürelerini uzatmaktadır. Enerji depolama sisteminde bulunan batarya ömrünü koruyarak ve sistemin toplam maliyetini azaltarak birbirlerini tamamlamaktadır. HGÜS'ler, kırsal köyler, deniz kenarındaki yerleşkeler ve kentsel ormanlara kadar çok çeşitli ortamlara uyarlanabilir. Dağıtılmış yenilenebilir enerji üretimi için hızla tercih edilen bir sistem haline gelmektedirler.

2.2. HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

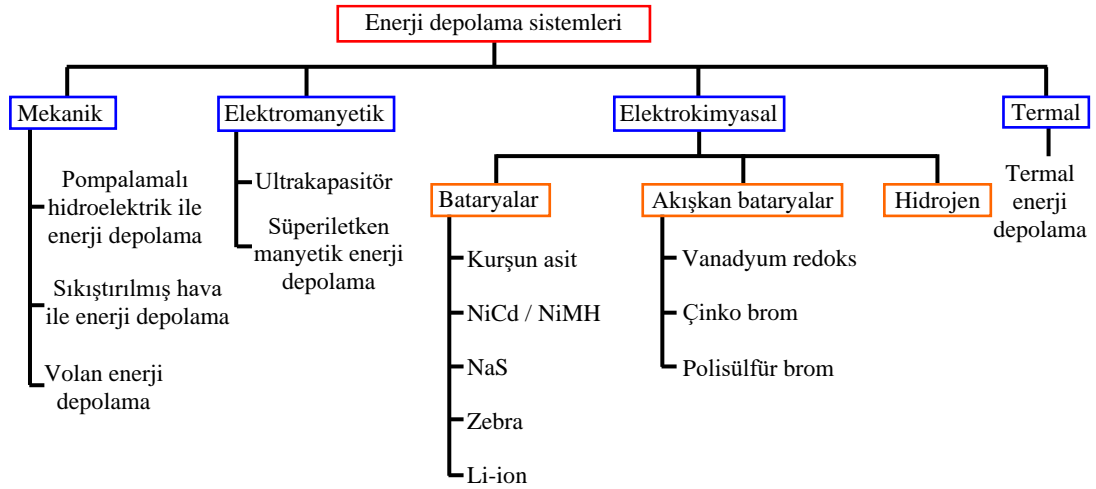
2.2.1. Enerji Depolama Sistemleri

Yenilenebilir enerji kaynaklarının doğası gereği çıkış güçleri doğal şartlara bağlı olarak değişmektedir. Bundan dolayı yük gücünün talebi fosil yakıtlı kaynaklar kullanılarak kompanze edilmektedir. YEK'lerin kesintili çıkış güç karakteristik yapısına en uygun çözüm enerji depolama sistemleri olmaktadır. Enerji depolama sistemlerinin yüksek güç ve enerji yoğunluğuna sahip olması YEK'lerin kullanımını desteklemektedir. Güvenilir bir YEK'li güç sistemi kurmak isteniyorsa geleneksel kaynaklar ve enerji depolama ile YEK birlikte kullanılmalıdır. Günümüzdeki teknolojik gelişmeler sayesinde enerji depolama birimleri 1-100 MW gücü uzun süre boyunca sağlayabilmektedirler.

Enerji depolama sistemleri elektromanyetik, elektrokimyasal, mekanik ve termal olarak kullanılmaktadırlar. Bu guruplandırma enerji depolama ünitelerinde kullanılan malzeme teknolojisi ve yöntemlere göre yapılmaktadır. Şekil 2.3'de enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması ayrıntılı olarak verilmektedir.

Bir enerji üretim tesisinde kullanılmak istenilen enerji depolama teknolojisi performans-maliyet parametresi göz önünde bulundurularak belirlenmelidir. Enerji ihtiyacını karşılamak üzere kurulmuş sistemler, uzun süreli enerji ihtiyacını

karşılamanın yanı sıra ani yük taleplerini de karşılaması gerekmektedir. Güç ihtiyacına cevap veren sistemler ise özellikle güç kalitesini iyileştirmeye yönelik kullanılan enerji depolama uygulamalarıdır. Enerji depolama uygulamaları şebeke frekansının sürekli olarak kararlılığının sağlanması, ani yük değişimleri ve gerilim dalgalanmalarının önlenmesinde kullanılmaktadırlar. Bu dinamik uygulamalarda tepki süresi milisaniye düzeyinde olması gerekirken, uzun süreli dakika veya saat güç ihtiyacına da gerek duyulabilir.

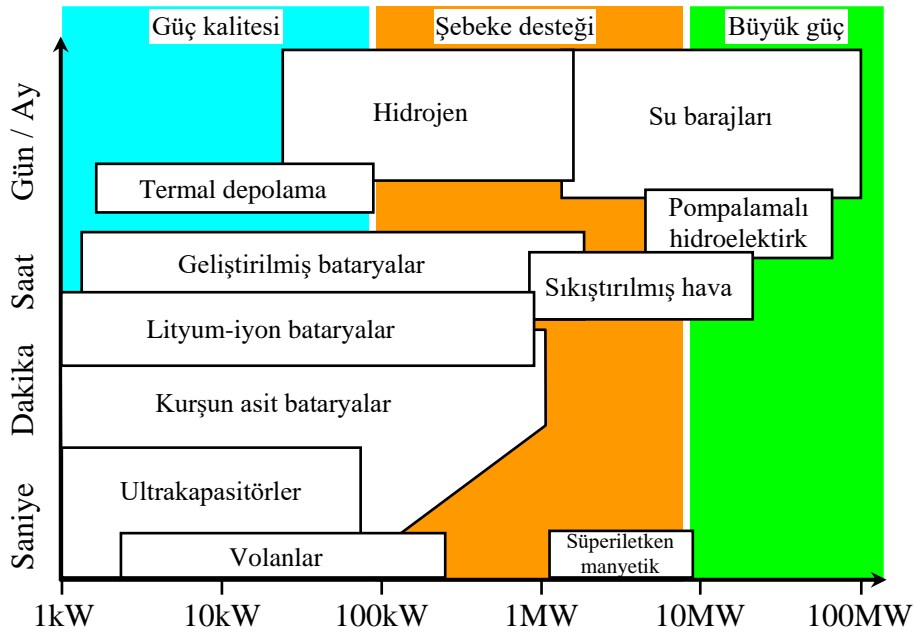


Şekil 2.3. Enerji depolama sistemleri [68].

Enerji depolama sistemlerinin kapasiteleri saniye, dakika, saat ve gün/ay gibi çeşitli zaman aralıklarında ihtiyacı karşılayabilmektedirler. Enerji depolama sistemlerinin kendine özgü yapıları ve karakteristikleri bu zaman dilimlerini meydana getirmektedir. Şekil 2.4’de farklı enerji depolama sistemlerinin kullanım alanları, depolayabildikleri güç miktarları ve süreleri karşılaştırılmıştır.

Sıkıştırılmış hava ve pompalamalı hidroelektrik enerji depolama sistemleri gün/ay bazında yük ihtiyacını karşılayabilen bir depolama teknolojisidir. Bu yüksek enerji yoğunluğuna sahip depolama sistemleri şebekeye destek olmak için kullanılmaktadır. Ayrıca süperiletken manyetik ve hidrojen enerji depolama sistemleri de şebekeye destek olmak amacıyla kullanılır. Ancak enerji aktarabilme süreleri bakımından süperiletken manyetik enerji depolama sistemi, kısa süreli olarak (sn) destek olurken, hidrojen enerji depolama sistemi gün/ay bazında enerji sağlayabilmektedir. Akışkan bataryalar uzun süreli ve yüksek enerji ihtiyacı bulunan sistemlerde kullanılmaktadır.

Nikel kadmiyum, kurşun asit ve sodyum sülfür batarya teknolojileri yüksek güç yoğunluğu ihtiyacı gereken alanlarda kullanılmaktadırlar. Lityum iyon bataryalar yüksek enerji yoğunluğu gerektiren taşınabilir cihaz uygulamalarında, enerji depolama verimin önemli olduğu uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ultrakapasitör depolama sistemi ise diğer depolama çeşitlerine göre çok daha kısa sürede devreye girip çıktığı için genellikle güç kalitesi iyileştirme çalışmalarında tercih edilmektedir. Volanlar ve ultrakapasitörler bataryalara göre yüksek güç yoğunluğuna sahiptirler ve bu özelliği ile çok hızlı bir şekilde yüksek akımlarda şarj/deşarj edilebilmektedirler. Fakat volanlar ve ultrakapasitörler bataryalara göre düşük enerji yoğunluğuna sahip olduğundan uzun süreli olarak enerji aktarmazlar.

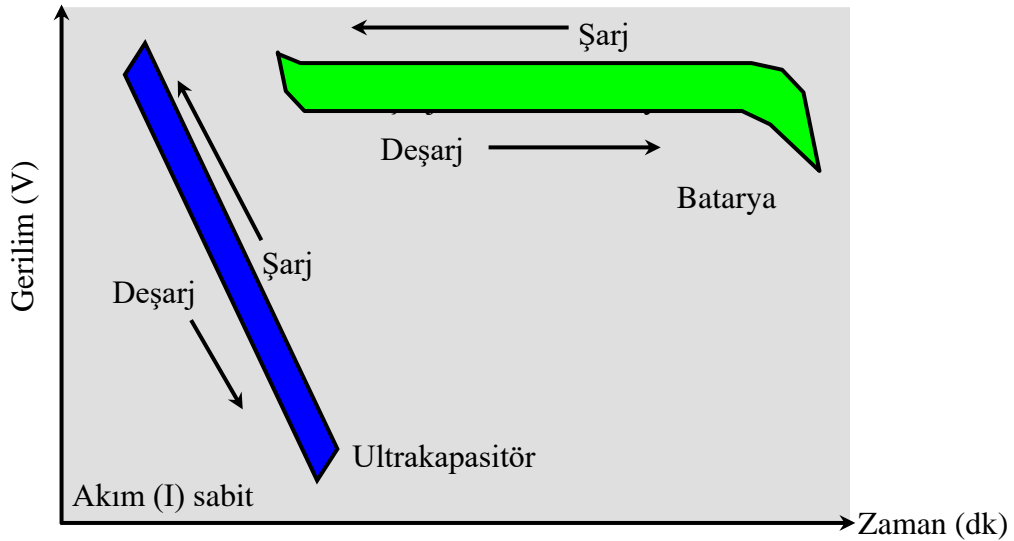


Şekil 2.4. Enerji depolama sistemlerinin kapasiteleri [69].

2.2.2. Hibrit Enerji Depolama Sistemleri

İki ya da daha fazla enerji depolama sisteminin birlikte kullanılmasıyla elde edilen enerji depolama birimi ile HEDS oluşturulur. Bu enerji depolama birimleri performans karakteristikleriyle birbirini tamamlayıcı bir yapı ortaya çıkartmaktadır. Batarya; diğer depolama çeşitlerine göre maliyet bakımından daha uygun bir enerji depolama teknolojisidir. Bataryalar uzun süreli olarak enerji sağlayabilmelerinin yanı sıra ani güç ihtiyaçlarına da karşılayabilmektedirler. Fakat ani güç taleplerinde

bataryalar derin deşarj olduklarından çevrim ömürleri hızlı bir şekilde azaltmaktadır. Bir bataryada enerji depolama süreci elektrokimyasal olarak gerçekleşirken, ultrakapasitörde enerji depolama bir statik yüklenme olayı ile meydana gelmektedir. Bu özelliklerinde dolayı ultrakapasitörler bataryalara kıyasla daha yüksek güç yoğunluğuna sahip bir enerji depolama birimidir. Batarya ve ultrakapasitörün bu özelliklerinden dolayı yüksek güç ve enerji ihtiyacı için bu iki depolama teknolojisini birleştirmek akılcı olacaktır. Batarya ve ultrakapasitör, bu tez çalışmasında yapıldığı gibi güç elektroniği dönüştürücüleri sayesinde eş zamanlı olarak şarj/deşarj edilebilmektedirler. Şekil 2.5’de batarya ve ultrakapasitör depolama birimlerinin zamana bağlı gerilim değişim oranları verilmektedir. Batarya uzun süreli olarak enerji sağlarken ultrakapasitör kısa sürede olarak enerji sağlayabilmektedir.



Şekil 2.5. Batarya ve ultrakapasitörün zamana bağlı gerilim değişimi.

Talep tarafında anlık ve uzun süreli güç ihtiyacı olduğu zaman yükün ihtiyacı olan akımı karşılamak için batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji depolama sisteminin en uygun çözüm olacaktır. Bataryalar günümüz teknolojiyle 10-1000 W/kg güç yoğunluğuna sahiptir, ultrakapasitörler ise 10-10⁶ W/kg’lık güç yoğunluğuna sahiptirler. HEDS kullanıldığı zaman ultrakapasitör, batarya karakteristiğinin yetersiz kaldığı talep gücünü karşılayarak destek olacaktır. Böylece yüksek deşarj akımlarında çalıştırılmayan bataryaların çevrim ömrü uzatılmış olacaktır [70,71].

Diğer olası durumlarda; uzun süreli yük talepleri söz konusu olacaktır. Böyle bir durumda ise sadece düşük enerji yoğunluğuna sahip ultrakapasitör birimini kullanmak yeterli olmayacaktır. Bataryalar yapısı itibarıyla ultrakapasitörlere kıyasla 100 kat daha fazla enerji yoğunluğuna sahiptirler. Bundan dolayı ultrakapasitör biriminin yanında yüksek enerji yoğunluğuna sahip batarya biriminin birlikte kullanılması uygun bir çözüm olacaktır.

Batarya birçok farklı uygulamada kullanılmaktadırlar. Bu enerji depolama teknolojilerinin bazı dezavantajları vardır. Bataryalar sınırlı deşarj derinliğine sahiptirler ve çevrim ömürleri kullanım miktarlarına bağlı olarak azalır. Ultrakapasitör enerji depolama birimleri ise bu negatif yapıyı barındırmamaktadırlar. Aynı zamanda ultrakapasitörler hızlı tepki sürelerine sahiptir. Ayrıca ultrakapasitörler yüksek sıcaklık ve vibrasyona karşı bataryalara kıyasla daha dayanıklıdırlar. Ultrakapasitörler elektrikli yeraltı treni gibi ulaşım alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Yeraltı trenine ultrakapasitörün entegre edilmesiyle enerji ağları ortadan kaldırılmıştır. Yolcu indirme-bindirme esnasında duraklarda hızlı bir şekilde şarj olarak bir sonraki durağa ulaşmaktadır. Ultrakapasitörler elektrikli taşıtlarda faydalı frenleme alanlarında kullanılmaktadır. Büyük kütlelere sahip araçların kısa zamanda durdurulduğunda anlık olarak yüksek güçler ortaya çıkmaktadır. Bu yüksek güç değeri kısa zamanda bataryalarda depolanabilmesi mümkün değildir. Fakat ultrakapasitörler karakteristik yapıları ile bu enerjiyi depolayabilirler. Böylece taşıma alanında enerji verimliliğine katkıda bulunurlar.

FV paneller ve rüzgâr enerjisi kesintili ve zamana bağlı değişken çıkış karakteristiğine sahip bir yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Batarya ve ultrakapasitörlü bir HEDS enerjinin sürekliliğini sağlayabilir. HEDS yapısı, bataryaların çevrim ömrünün artmasına ve maksimum performansta kullanılmasına yardımcı olur. Özellikle şebekeden bağımsız güç üretim sistemlerinde enerjinin sürekliliği sağlanır [72,73].

Bu tez çalışmasında batarya ve ultrakapasitörden oluşan bir hibrit enerji depolama sistemi meydana getirerek iyi bir performans sağlanması amaçlanmıştır. Batarya ve

ultrakapasitörden oluşan HEDS'den kullanılarak hem batarya hacimsel boyutları azaltılır hem de daha uzun süreli şarj durumu elde edilebilir. Ultrakapasitörler bataryalara kıyasla yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Bundan dolayı ultrakapasitörler daha kısa zamanda yüksek güç talebini karşılayabilirler. Bataryalar ise ultrakapasitörlere göre daha fazla enerji yoğunluğuna sahiptir. Bu özellikleri bataryaların uzun süreli enerji ihtiyacını karşılayabilirler. HEDS ultrakapasitörler ile anlık güç talebi karşılanır, bataryalar ile uzun süreli veya sürekli güç talebi karşılanır.

BÖLÜM 3

DARRIEUS VE SAVONIUS TÜRBİN TASARIMI VE ÜRETİMİ

Artan enerji talebi, konvansiyonel enerji üretim teknolojilerinin zararlı çevresel etkileri, maliyetin artırılması ve fosil yakıt rezervleri, iklim değişikliği, sağlık sorunlarının yayılması ve sosyal baskının azaltılması, bilim insanlarını ve mühendisleri, alternatif olmayan, zararsız, daha ucuz ve sürdürülebilir enerji üretim yöntemleri bulmaya yöneltmektedir. Yenilenebilir enerji teknolojileri, konvansiyonel enerji kaynakları üzerine birçok çevre kazanımları sunmaktadır.

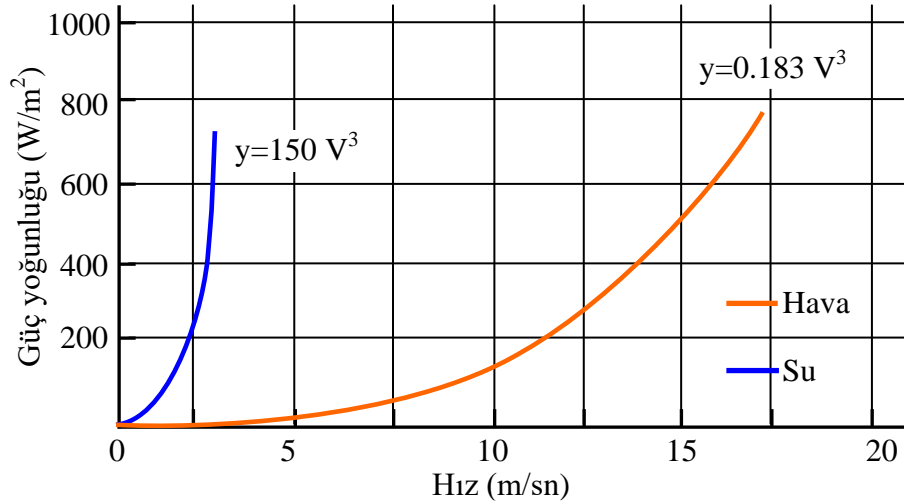
Hidroelektrik enerji, dünyanın en büyük ve en ucuz yenilenebilir enerji kaynağıdır. Aynı zamanda elektrik üretiminin en etkili yoludur. Dünya elektriğinin yaklaşık % 18'i hidroelektrik enerjisinden sağlanmaktadır. Tahmin edilebilirlik, düzenlilik ve dünya çapında yaygınlaşan kaynaklara sahip olan hidroenerji, enerji üretiminin en cazip seçeneklerinden biridir.

Sudan enerji almak için, hidrostatik ve hidrokinetik yöntem olmak üzere iki yaklaşım vardır. Hidrostatik yaklaşım, basınç noktası oluşturmak ve suyun potansiyel enerjisini uygun turbo makineler vasıtasıyla rezervuarlara su depolayarak elektrik üretiminin geleneksel yoludur [74]. Hidrokinetik yaklaşımda suyun içindeki kinetik enerji, suyu depolamadan ve bir basınç noktası olmaksızın nispeten küçük ölçekli türbinlerle doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülür. Hidrokinetik enerji dönüşüm sistemleri, nehirler, gelgit nehirleri, okyanus akıntıları, dalgalar, insan yapımı suyolları gibi doğal akışlara ve diğer akış su tesislerine kurulmaktadır.

Hidrokinetik enerji teknolojileri, geleneksel hidroelektrik üretim yöntemlerine göre bazı avantajlara sahiptir. Hidrokinetik sistemler minimum düzeyde inşaat işi gerektirir. Suyu toplamak için bir baraj ya da bir rezervuar inşa etmek için ek bir maliyet yoktur.

Kinetik enerji akım ve dalgalar şeklinde su hareketi temel alınarak kullanılır. Hidrokinetik türbinlerin nispeten küçük ölçekli güç üretimi olmasına rağmen, enerji üretimini artırmak için rüzgâr çiftlikleri gibi çok birimli diziler halinde kurulabilirler [75]. Hidrokinetik sistemler, rüzgâr ve güneş cihazlarından daha değerli ve öngörülebilir enerji sağlar. Özellikle nehir dereleri ve gel-git akıntıları oldukça öngörülebilirdir.

Aynı derecede büyüklükte rüzgâr türbini ile karşılaştırıldığında, akışkan bir hidrokinetik türbinden önemli miktarda güç elde edilebilir. 2-3 m/sn'lik bir nominal devirde çalışan bir hidrokinetik türbin benzer şekilde derecelendirilmiş rüzgâr türbininin dört katı enerjiye sahip olabilir. Su ve rüzgâr için yaklaşık akış yoğunluğu sırasıyla 1000 kg/m^3 ve 1.223 kg/m^3 'tür. Rüzgâr türbinleri genellikle 11-13 m/sn nominal rüzgâr hızında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Aksine, hidrokinetik türbinler için nominal hız 1.5 ile 3 m/sn arasındadır. Su ve rüzgâr türbinleri için güç yoğunluklarının karşılaştırılması Şekil 3.1'de verilmiştir. 2 m/sn serbest akış hızı ile çalışan bir hidrokinetik türbinin güç yoğunluğu, yaklaşık 16 m/sn akış hızı ile çalışan rüzgâr türbinininki ile aynıdır [76].



Şekil 3.1. Su ve rüzgâr türbinleri için güç yoğunluklarının karşılaştırılması [76].

Hidrokinetik enerji kaynağından üretilebilecek elektrik miktarı su kaynağının hacmine ve hızına bağlıdır. Bu güç üretim sistemleri, 0.5 m/sn ve üzeri su hızlarına sahip bir akışa kurulmaktadır. Bu enerjiyi kullanmak için birçok yöntem vardır,

ancak türbin yapısına sahip dönüştürücü sistemleri en yaygın ve kanıtlanmış yöntemlerdir. Rüzgâr enerjisi dönüştürücülerine benzer şekilde hidrokinetik türbin tarafından yakalanan toplam kullanılabilir güç P_a , Eşitlik 3.1’de gösterildiği gibi yoğunluk, kesit alanı, hız ve türbin katsayısına bağlıdır. Bu türbin sistemlerinde en büyük avantaj, suyun yoğunluğunun yaklaşık olarak havadan 800 kat daha yoğun olmasıdır. Bu basitçe bir hidrokinetik türbin tarafından üretilen enerjinin, eşit rüzgâr ve suyun eşit hızda eşit çaplı bir rüzgâr türbini tarafından üretilen enerjiden çok daha fazla olduğunu göstermektedir.

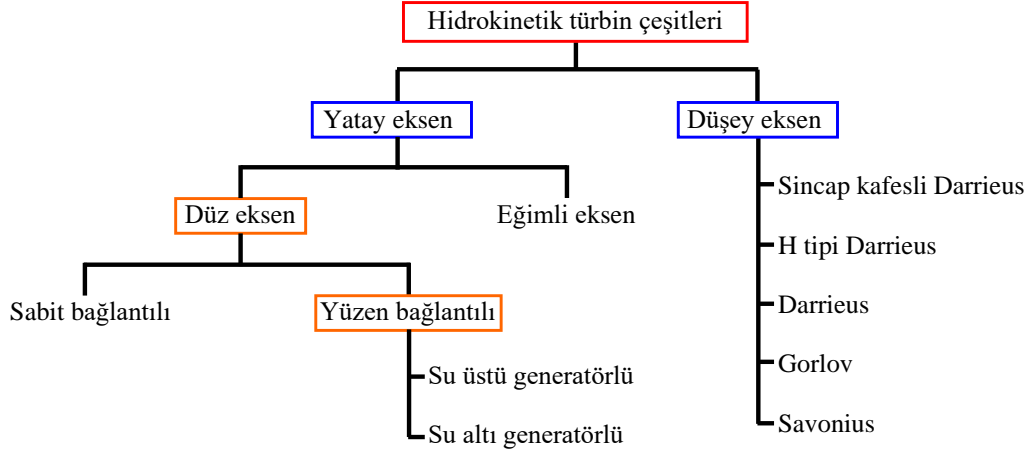
$$P_a = \frac{1}{2} \times A \times \rho \times V^3 \times C_P \quad (3.1)$$

Buradaki; A türbin alanı (m^2), ρ su yoğunluğu (1000 kg/m^3), V su akış hızı (m/sn) ve C_P türbin güç katsayısı veya verimi olan $16/27=0.592$ (teorik olarak elde edilebilecek maksimum güç). Rüzgâr türbine benzer şekilde, güç katsayısı (C_P), hidrokinetik türbinlerin, verilen kayıplardan dolayı toplam kinetik gücün sadece bir kısmını kullanabileceğini gösterir. Bu katsayı, Betz kanunuyla $16/27=0.59$ ile sınırlıdır. Fakat küçük ölçekli bir nehir türbininin kendi kayıpları vardır ve bu da güç katsayısını yaklaşık olarak 0.25’e düşürmektedir. Üst limit, düşük mekanik kayıpları olan yüksek verimli makineler içindir [77].

Okyanus enerjisinde kullanılan türbinler, su akış yönüne göre dönme eksen yönelimleri ile karakterize edilebilir. Hidrokinetik türbinlerin sınıflandırılması temel olarak yatay eksen ve dikey eksen olarak yapılabilir. Yatay eksenli türbinler iki guruba ayrılabilir. Yatay tip türbin eksenini su akışı yönüne paraleldir. Dikey tip türbin çeşidinde ise dönme eksenini su akışı yönüne diktir. Türbin rotor konfigürasyonunun seçimi, teknik ve ekonomik faktörler gibi birçok açıdan ele alınmasını gerekmektedir. Enerji dönüşümünün yeni ortaya çıktığı bir alan olarak, bu konular hidrokinetik türbinler için daha baskın hale gelmektedir. Bu türbinlerin fiziki düzenlemelerine dayanan genel sınıflandırması Şekil 3.2’de verilmektedir [78].

Rotor ekseninin su akışına göre hizalanmasına dayanarak, yatay eksenli ve dikey eksenli türbinler olmak üzere iki genel sınıf oluşturulabilir. Yatay eksenli türbin

çeşidine alternatif olarak aksenel akış olarak da adlandırılır. Türbin eksenleri akışkana paraleldirler ve pervaneli tip rotorlar kullanır. Okyanus ve su akışının olduğu ortamda kullanılmak üzere yatay aksenli türbinlerin çeşitli uygulama topoloji resimleri Şekil 3.3’de verilmektedir.



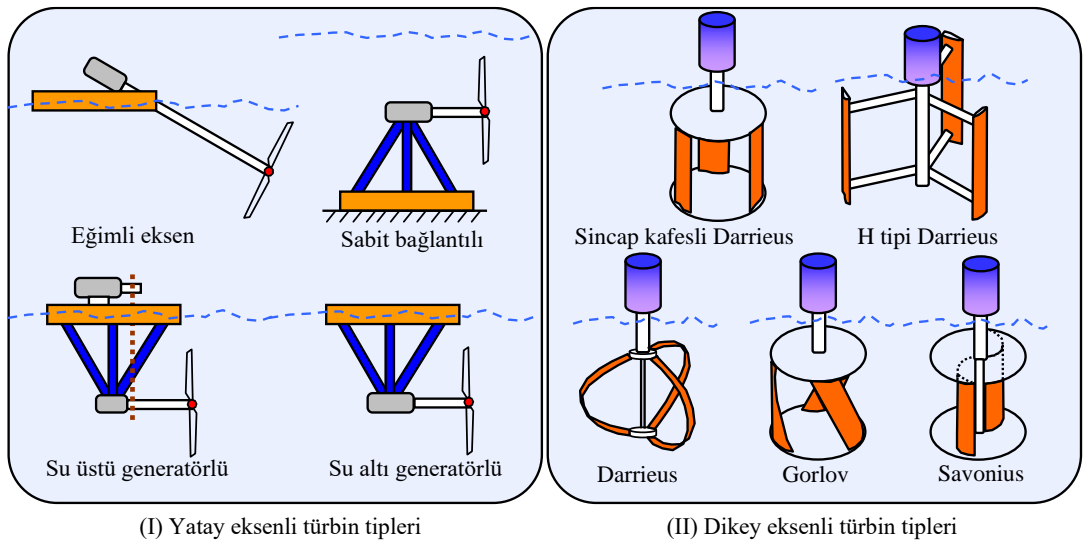
Şekil 3.2. Hidrokinetik türbin çeşitleri.

Eğimli eksen türbinleri, çoğunlukla küçük nehir enerjisi dönüştürücülerinde kullanılmaktadır. Tasarım ve performans analizi hakkında literatürde birçok uygulama alanı bulunmaktadır. Bu tür topolojileri kullanan birkaç ticari üründe mevcuttur. Bu cihazların çoğu nehir derelerinde test edilmiş ve sınırlı ölçekte ticarileştirilmiştir. Eğimli aksenli türbin sistemleri genellikle su pompalama için kullanılırken, diğerleri ise uzakta bulunan evsel elektrik ihtiyacını karşılamak için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu enerji dönüştürme sistemleri üzerinde hem bilimsel hem de ticari çalışmalar devam etmektedir [79].

Yatay aksenli türbinler, gelgit enerji dönüştürücülerinde yaygın olarak kullanılır ve konsept, tasarım açısından günümüz rüzgâr türbinlerine çok benzerdir. Sabit bağlantılı tip yapılarına sahip türbinler generatör ünitesinin nehir yatağına veya deniz tabanına yakın olmasını gerektirir. Sabit bağlantılı tip gelgit/nehir türbinleri ile ilgili birçok uygulama ve çalışmalar mevcuttur. Yatay aksenli türbin çeşitlerinden bir diğeri, yüzen bir demirleme mekanizmasına sahip olup dalgıç olmayan bir generatörün su yüzeyine daha yakın yerleştirilmesi ile yapılır. Su altı generatör

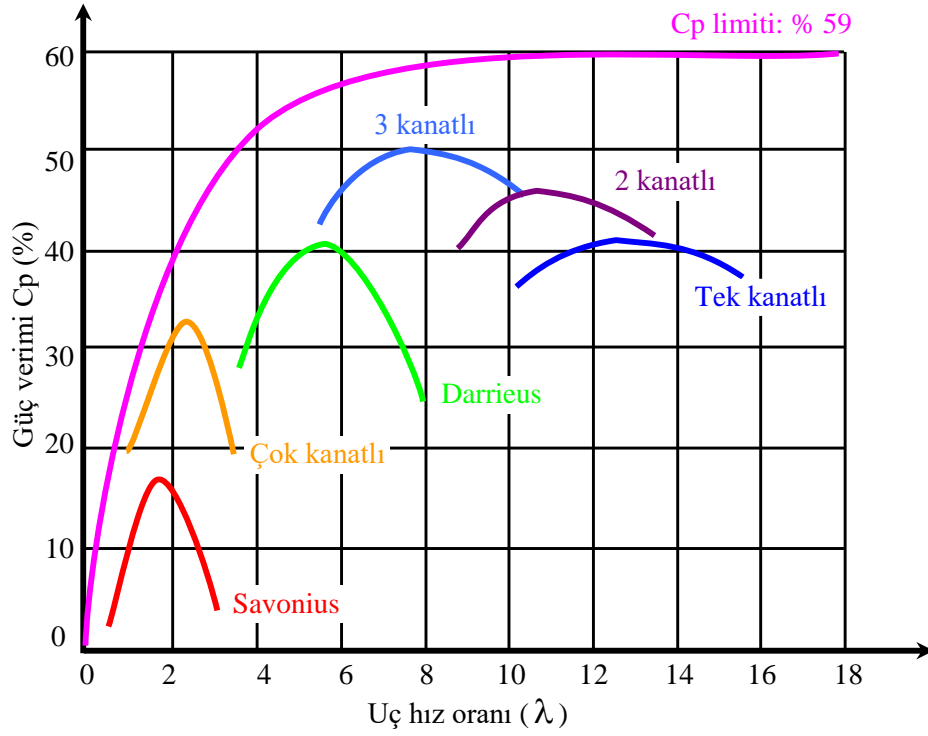
sistemleri ile ilgili bilgiler bulunmakta olup, su üstü generatörlü türbin çeşidine benzer yapısal özellikler göstermektedir.

Dikey eksenli türbinlerin çeşitli uygulama topoloji resimleri Şekil 3.3'de verilmektedir. Dikey eksen alanında Darrieus türbinleri en belirgin çeşitlerindedir. H tipi Darrieus veya Sincap kafesli Darrieus (düz kanatlı) türbin kullanımı çok yaygın olmakla birlikte, hidroelektrik uygulamalarda kullanılan Darrieus türbin örnekleri (kavisli veya parabolik kanatlı) mevcut değildir. Düz kanatlı Darrieus türbinleri ile ilgili geniş bir dizi tasarım, uygulama ve performans alanı gibi birçok çalışma mevcuttur. Gorlov türbin kanatları sarmal yapıdadır, Savonius türbini ise düz veya eğik kanatlardan oluşabilen sürükleyici tip özelliğine sahip dikey eksenli türbin çeşitlerindedir [80].



Şekil 3.3. Yatay ve dikey eksenli türbin çeşitlerinin uygulama topolojileri [80].

Darrieus tipi türbinler, dikey eksen alanlarında nehir enerjisi uygulamalarında kullanımı yaygındır. Düz kanatlı Darrieus türbinleri (H tipi veya sincap kafesi tipi) hidro uygulamalar için uygulanabilir bir seçenek olarak düşünülebilir. Şekil 3.4'de litertürde yer alan kanatların dönme hızlarına bağlı olarak üretebilecekleri maksimum güç grafiği verilmektedir [81-82].



Şekil 3.4. Kanatların uç hız oran güç verim grafiği.

Literatürde, elektrik şebekesine uzak olan bölgelerde elektrik enerjisi üretmek için küçük aksenal akış hidrokinetik türbinleri içeren çalışmalar yapılmaktadır. Ayrıca, uygulamadaki sorunların üstesinden gelmek için iyileştirme çalışmaları yapılmıştır ve yapılmaya devam etmektedir. Okyanus veya deniz üzerinde duba, şamandıra, nehir kıyılarına veya iskelelere bir eksen üzerinde dönebilen kollar kullanılarak monte edilen veya askıya alınan türbin tasarımları yapılabilmektedir. Elektrik şebekesine uzak evler için uygun olan bu türbin çeşitleri yaklaşık 1-2 kW'lık elektrik enerjisi üreterek elektrik enerji ihtiyacını karşılamaktadır.

Literatürde yapılan bir diğer çalışma da, akıntı türbin tasarımındaki son gelişmeleri gözden geçirilerek akıntı türbinlerinin bazı potansiyel avantajlarını incelenmiştir. Bu çalışmalar, güvenlik, dış etkilerin türbine vereceği zararın azaltılması, üretilen gücün artırılması, dişli kutusu boyutunun azaltılması sayılabilir [83].

Çeşitli sarmal ve düz kanatlı Darrieus tipi hidrokinetik türbinlerde, dinamik davranışlarını ve verimlerini incelemek için bazı testler gerçekleştirilmiştir. Değişken adım kanadın, başlangıç torkunu ve verimliliğini arttırdığı gözlenmiştir. Ayrıca,

sabit tork üretmek ve güç çıkışını artırmak için sarmal şeklinde kanatların kullanılması önerilmiştir. Bu testler, Avustralya'nın Nerang Nehri ve Kanada'daki Campbell Nehri'nde 1 m/sn'den daha az ve 5 m/sn'ye kadar olan hızlarda gerçekleştirilmiştir. Sarmal şeklindeki kanatların verimlilik ve başlatma torku bakımından çok az fark meydana getirdiği ancak, sabit adımlı düz kanatların aksine türbinin sorunsuz bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir. Yatay ve dikey türbinlerle ilgili teknik avantajları ve dezavantajları Çizelge 3.1'de verilmektedir [84].

Çizelge 3.1. Yatay ve dikey eksenli türbinlerin avantaj ve dezavantajları.

Türbinler	Avantajları	Dezavantajları
Yatay eksenli türbinler	<p>Kendinden başlama kabiliyeti vardır.</p> <p>Bir mil kullanılarak dişli kutusu çıkartılabilir.</p> <p>Daha yüksek rotor hızı ile optimum performans sağlanır, (deniz/gelgit dönüşümü); böylece dişli kutusu azaltılmış olur.</p> <p>Aşırı hızda ve etkin korumada kanat adımının hareketi sayesinde daha esnek olmasını sağlar.</p>	<p>Sualtı yerleşimi nedeniyle generatör bağlantı maliyeti yüksektir.</p> <p>Dökülerek akan su kanallarında uygulaması kolay değildir.</p>
Düşey eksenli türbinler	<p>Suyun üzerine yerleştirildiğinden dolayı generatör bağlantı maliyetleri düşüktür.</p> <p>Kanat ucundaki kayıplarının azalması nedeniyle daha az ses çıkartır.</p> <p>Çift yönlü akışta bile tek yönlü dönüş yapabilir.</p> <p>Darrieus türbininin silindir yapısından dolayı, çeşitli kanallara kolaylıkla monte edilmesine olanak tanır.</p> <p>Değişken su hızı ve düşük su debili sığ kanallarda ve sığ kanalların altında çalışmak için daha uygundur.</p>	<p>Düşük başlatma torku nedeniyle, başlangıçta ayrıca çalıştırma mekanizması gerektirebilir.</p> <p>Çıkıştaki generatör torku dalgalıdır.</p> <p>Düşük verimlidir.</p>

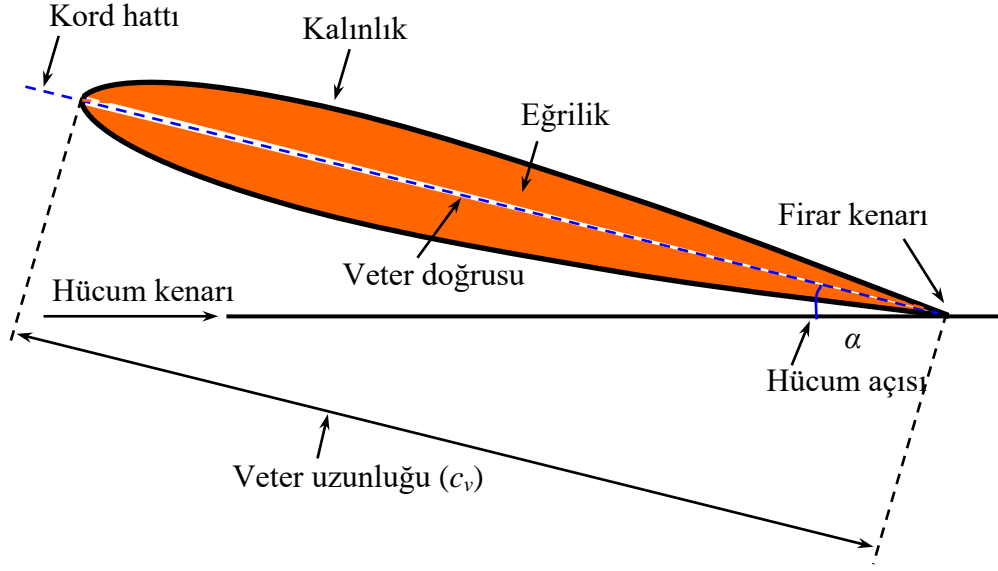
Nispeten küçük sığ nehir ve kanallar için ideal yeni bir kinetik hidro-generatör jeneratörünü yapılmıştır. Tasarımda, cihaz etrafında hareket eden dikdörtgen hidropilane (yelken) kullanılmaktadır. Cihaz, yatay düzlemde dönen cihazın üstünde ve altındaki iki kemer arasında bir dizi yelkenin monte edildiği, uzunlamasına bir dikey eksenli türbin kullanarak bir su akış enerjisi meydana getiriyor. Bu kavram, nispeten sığ nehirler ve kanallar için idealdir, çünkü standart bir deniz tipi türbin veya türbin dizisinin dairesel rotorundan daha fazla kanadın kesit alanını dolduracak şekilde tasarlanmalıdır. Dikey hidrokinetik nehir türbini ile makro-türbülanslı akış yapılarının etkileşimi arasında araştırmalar yapılmıştır. Bunun sonucunda, türbülanslı akış yapılarının hidrokinetik enerji üretimi üzerindeki etkisini anlamak için nehirlerdeki akışların karakteristiğinin belirlenmesi gerektiği anlaşılmıştır. Ayrıca, türbülanslı bir akışın ölçeği ve yoğunluğu önemli bir rol oynayabileceğinden, güç spektrumu ölçümleri dikey türbinlerin yorulma ömrü tahmini için önemli bir veri sağlayacaktır [83].

3.1. DARRIEUS KANAT AERODİNAMİĞİ VE TÜRBİN TASARIMI

Rüzgâr türbinlerinden gerekli mekanik gücü almak için kanatların tasarımı aşaması önem kazanmaktadır. Bir rüzgâr türbinin ilk hareket anından maksimum hıza ulaşana kadar bütün çalışma koşullarında optimum kanat ölçüleriyle üretmek bu yenilenebilir enerji kaynaklardan alınacak güç miktarını belirlemektedir. H tipi Darrieus kanat yapısı dikey yapısıyla her yönden (360°) rüzgârı alabilmekte dönme momenti sağlamaktadır.

H tipi Darrieus kanat yapısında birçok standart formdan (NACA, RAF, USA) yapılabilmektedir. Simülasyon ve deneysel çalışmalarında en yaygın olarak National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) kanat profil sınıfı kullanılmaktadır. Yüksek kaldırma kuvvetinden dolayı H tipi Darrieus türbinlerinde en çok NACA 0018 simetrik kanat profilleri kullanılmaktadır. Bu tip kanatlarda 18 olarak tanımlanan kısım kanadın maksimum kalınlığının veter uzunluğuna olan oranı ile ilişkilidir. İnce kanat profilleri daha yüksek hızlarda dönüş sağlar. Bu nedenle NACA 0012, NACA 0015 ve NACA 0018 profilleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında NACA 0018 kanat profili kullanılarak prototip bir türbin üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5’de NACA 0018 kanat profili ve tanımları gösterilmektedir.



Şekil 3.5. NACA 0018 kanat profili [85].

Sabit bir rüzgârda NACA 0018 kanadına etkiyen rüzgâr hızının bileşenleri Şekil 3.6’da gösterilmektedir [85]. Kanada etki eden akış doğrultusundaki rüzgâr hızı V_r , iki bileşene ayrılır. Bunlar; bağıl hız V_r ve kanat uç hızı U ’dur. Bağıl hız W , kanat uç hızı U ve etkiyen rüzgâr hızı V_r ’ye bağlıdır. Buna göre bağıl hız Eşitlik 3.2’de verilmektedir [86].

$$\vec{W} = \vec{V}_r - \vec{U} \quad (3.2)$$

$$V_n = V_r \sin \alpha \quad (3.3)$$

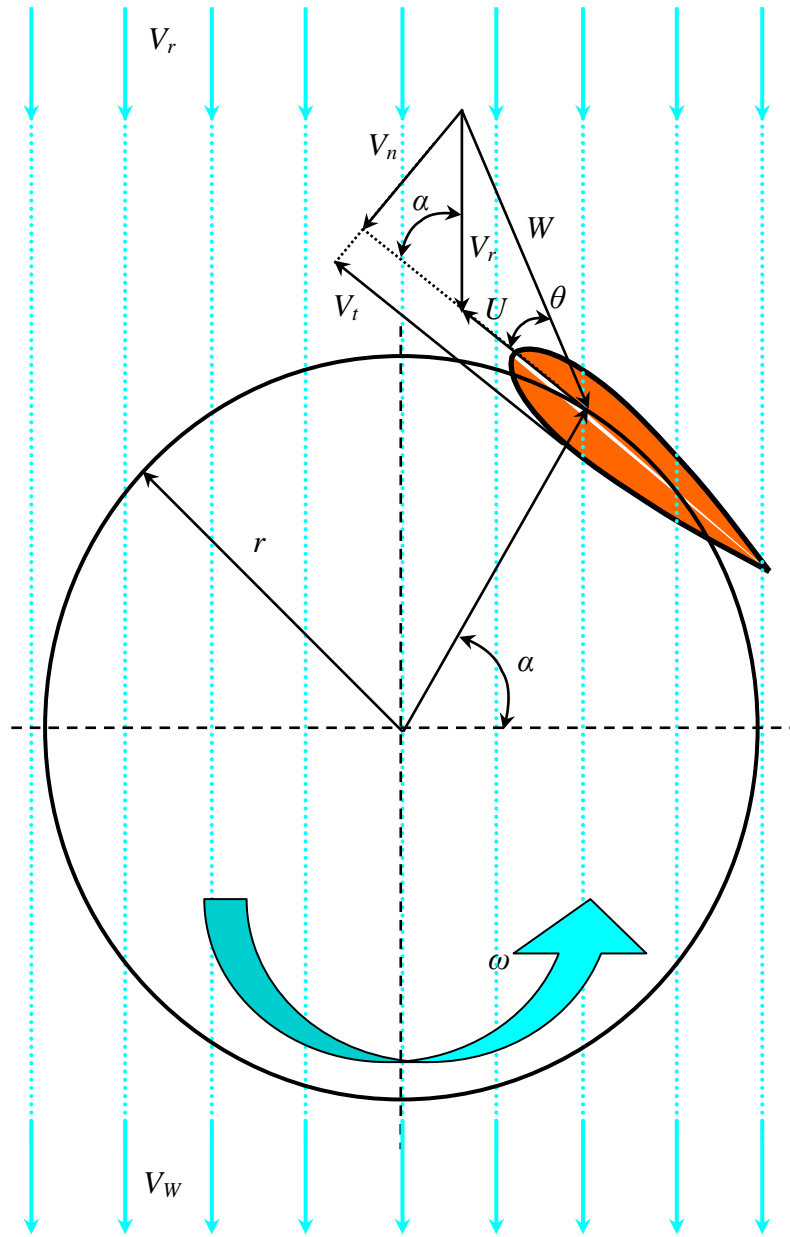
$$V_t = U + V_r \cos \alpha = R\omega + V_r \cos \alpha \quad (3.4)$$

Burada, kanada etkiyen rüzgâr hızı V_r , teğetsel hız V_t , normal hız V_n , kanadın konumundan dolayı oluşan açı değeri θ , türbin rotor yarıçapı r ve açısal hız ω olarak ifade edilmektedir. Şekil 3.6’da rüzgâr hızları kanada giriş yapan rüzgâr hızlarıyla

forma bağılı olarak belli açılar meydana getirmektedir. Eşitlik 3.5’de hücum açıları ifade edilmiştir.

$$\tan \theta = \frac{V_n}{V_t}, \Rightarrow \theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_n}{V_t} \right) \quad (3.5)$$

Burada θ kanat hücum açısıdır. V_n ve V_t değerleri Eşitlik 3.5’in içerisine yazıldığında Eşitlik 3.6 elde edilmektedir.



Şekil 3.6. NACA 0018 kanat formuna etki eden rüzgâr hız bileşenleri.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_r \sin \alpha}{r\omega + V_r \cos \alpha} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \alpha}{\frac{r\omega}{V_r} + \cos \alpha} \right) \quad (3.6)$$

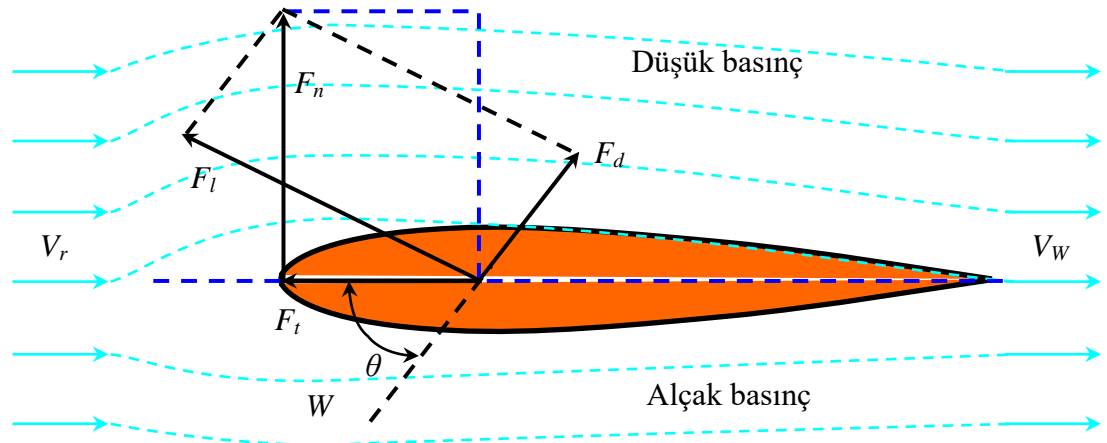
Bağıl hız W , teğetsel hız V_t 'ye ve normal hız V_n 'ye bağlı olarak hesaplanabilmektedir.

$$W = \sqrt{V_t^2 + V_n^2} \quad (3.7)$$

V_t ve V_n hız eşitlikleri Eşitlik 3.7'de yerine yazıldığında ve düzenlendiğinde Eşitlik 3.8 elde edilmektedir.

$$\frac{W}{V_r} = \sqrt{\lambda^2 + 2\lambda \cos \alpha + 1} \quad (3.8)$$

Bir kanada rüzgâr etki ettiğinde basınç farkından dolayı kanat üzerinde etki kuvvetleri oluşmaktadır. Bunlar F_l (lift) kaldırma kuvveti F_d (drag) sürüklenme kuvvetidir. Bu kuvvetlerin bileşkesi F kuvvetidir ve Eşitlik 3.9'da verilmektedir. F kuvveti de F_t teğetsel kuvvet, F_n normal kuvvet olarak iki kuvvete ayrılabilir. Kanadın dönme hareketini veren F_t kuvvetidir. Şekil 3.7'de bir kanat üzerinde oluşan kuvvetler gösterilmiştir.



Şekil 3.7. NACA 0018 kanat üzerindeki kuvvet ve basınç alanları.

$$F = \frac{1}{2} \rho_r C_r S V_r^2, \Rightarrow S = c_v H_r \quad (3.9)$$

Burada, havanın yoğunluğu ρ_r , rüzgâr hızı V_r , kanat veter uzunluğu c_v ile kanat boyu H_r çarpımıyla bulunan tarama alanı S , toplam aerodinamik katsayısı da C_r olarak tanımlanmaktadır.

F kuvveti iki kuvvetin birleşiminden oluşur. Birincisi, bağıl hız vektörüne W paralel olan sürüklenme kuvveti F_d , ikincisi ise bağıl hız vektörüne W dik olan kaldırma kuvveti F_l 'dir ve Eşitlik 3.11'de verilmektedir. Sürüklenme kuvveti cismin üzerinde akış yönünde meydana gelen kuvvettir ve Eşitlik 3.12'de verilmektedir.

$$F^2 = F_d^2 + F_l^2 \quad (3.10)$$

$$F_l = \frac{1}{2} \rho_r C_l S V_r^2 \quad (3.11)$$

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_r C_d S V_r^2 \quad (3.12)$$

Burada, havanın yoğunluğu ρ_r , rüzgâr hızı V_r , kanat veter uzunluğu c_v ile kanat boyu H_r çarpımıyla bulunan tarama alanı S , sürüklenme katsayısı C_d , kaldırma katsayısı C_l olarak tanımlanmaktadır.

Kaldırma kuvveti akışa dik olarak etki etmektedir. Uçakların yerden havalanması da bu kuvvet sayesinde olmaktadır. Havanın akış yönüne göre meydana gelen küçük açılarda akış hızının artmasından dolayı düşük basınçlı bölgeler meydana gelir. Dolayısıyla hava akış hızı ile basınç arasında bir ilişki meydana gelmiş olur. Bernoulli etkisine göre hava akışı hızlandıkça basınç düşer, hava akışı yavaşladıkça da basınç artar.

Burada kanadın performans karakteristiğini belirten C_l ve C_d değerleri sırasıyla kaldırma, sürüklenme katsayıları, deneysel veya sayısal olarak elde edilmektedirler [85]. Buradan, toplam aerodinamik katsayı C_r Eşitlik 3.13’de verilmektedir.

$$C_r = C_d^2 + C_l^2 \quad (3.13)$$

Şekil 3.7’de gösterilen kanat kirişine paralel F_t kuvveti Eşitlik 3.14’de ve kanat kirişine dik F_n kuvveti Eşitlik 3.15’de verilmektedir.

$$F_t = \frac{1}{2} \rho_r C_t S V_r^2 \quad (3.14)$$

$$F_n = \frac{1}{2} \rho_r C_n S V_r^2 \quad (3.15)$$

Yukarıdaki denklemlerde C_t ve C_n olarak verilen katsayılarının C_d ve C_l sırasıyla sürüklenme ve kaldırma katsayıları türünden Eşitlik 3.16 ve Eşitlik 3.17’de verilmektedir.

$$C_t = C_l \sin \theta - C_d \cos \theta \quad (3.16)$$

$$C_n = C_l \cos \theta + C_d \sin \theta \quad (3.17)$$

Burada θ olarak tanımlanan açı kanat hücum açısıdır. Rüzgâr akışı ile kanat üzerinde oluşan kuvvetlerden F_t kuvveti kanadın dönmesini sağlayan kuvvet olup toplam tork T ’nin oluşmasını sağlar ve Eşitlik 3.18’de verilmektedir.

$$T = \frac{1}{2} \frac{\rho_r S r N}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_t V_r^2 d\alpha \quad (3.18)$$

Burada, r türbin rotor yarıçapını, N ise kanat sayısını belirtmektedir. Bu durumda rüzgâr türbininden elde edilebilecek güç Eşitlik 3.19’daki gibi elde edilmektedir.

$$P = T\omega = \frac{I}{2} \frac{\rho_r S r N \omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_t V_r^2 d\alpha \quad (3.19)$$

$$P_r = \frac{I}{2} \rho_r A_r V_r^3 \quad (3.20)$$

Burada, P_r rüzgâr enerjisinden elde edilebilecek maksimum gücü, ρ_r havanın yoğunluğunu, A_r rüzgâr türbininin rotor çapı $2r$ ve kanat yükseklik H_r değerlerinin çarpılmasıyla bulunan süpürme alanını, V_r rüzgâr hızını ifade etmektedir.

3.1.1. Güç Katsayısı

Rüzgâr kanatlarının performansı, moment ve güç katsayılarıyla belirlenir. Buna göre rüzgâr kanatlara ait güç katsayısı Eşitlik 3.21’de verilmektedir. Teorik hesaplarda her bir kanat uç hız oranı için kanat üzerine etki eden kuvvetler bulunur ve buradan tork değerlerinin hesaplanması sağlanır. Tork değerleri belirlenen açısal hızlar ile çarpıldığında o anki üretilebilecek güç değerleri hesaplanmış olacaktır. Elde edilen bu değerler aynı koşullardaki maksimum güç değerlerine bölüldüğünde C_p olarak adlandırılan güç katsayısı elde edilmiş olur. Buradaki, C_p güç katsayısı, P_f faydalı çıkış gücü ve P_r rüzgâr gücüdür.

$$C_p = \frac{P_f}{P_r} = \frac{P_f}{\frac{I}{2} \rho_r A_r V_r^3} \quad (3.21)$$

3.1.2. Kanat Uç Hız Oranı

Rüzgâr kanatlarının performans katsayıları, kanadın hızının bir fonksiyonu olarak değişmektedir ve uç hız oranı olarak adlandırılır ve Eşitlik 3.22’deki gibi ifade edilmektedir. Buradaki, λ_D kanat uç hız oranı, U kanat uç hızı ve V_r rüzgâr hızıdır.

$$\lambda_D = \frac{U}{V_r} = \frac{2\pi r N}{60 V_r} = \frac{\pi r N}{30 V_r} \quad (3.22)$$

Betz Limiti'ne göre rüzgâr türbininin, rüzgârın kinetik enerjisinin ancak % 59'unu mekanik enerjiye çevirebildiği bilinmektedir. Ancak bu durum ideal koşullar ve ideal türbinler için geçerlidir. Bunların dışında da aerodinamik kayıplar meydana gelir. Bu kayıplar da hesaba katıldığında rüzgâr türbinin mekanik enerjiye dönüştürebileceği rüzgâr gücü belirlenir. Rüzgâr türbinin gücünü hesaplamada yine Betz Kanunundaki formül kullanılır. Ancak Betz Kanunu'ndaki 16/27 çarpanı ideal bir rüzgâr türbinini için geçerli olduğundan, gerçek rüzgâr türbininde bu çarpan yerine türbinin toplam verimi gelecektir ve türbinin toplam verimi Betz Limiti'nden daha küçüktür.

C_p güç eğrileri Reynold sayısına göre değişiklik göstermektedir. Reynold sayısı değeri büyüdükçe türbin performansı artar. Reynolds sayısı arttıkça, kanadın kaldırma katsayısı yükselir ve sürüklenme katsayıları azalır böylece daha fazla tork sağlanır [86].

$$R_e = \frac{c_v V_r \lambda_D}{\nu_r} \quad (3.23)$$

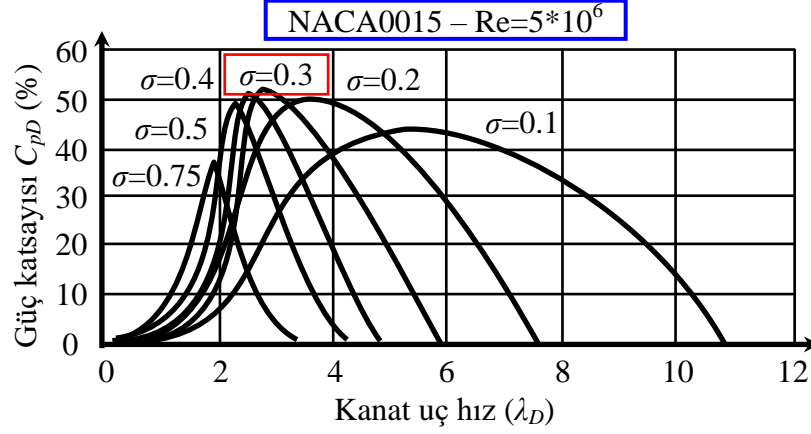
Buradaki, kanat veter uzunluğu c_v , rüzgâr hızı V_r , kinematik hava viskozitesi ν_r olarak ifade edilmektedir.

3.1.3. Türbin Katılığı

Türbin katılığı kanat veter uzunluğuna, kanat sayısına ve rotor yarıçapına bağlıdır. Türbin performanslarının analizinde oldukça önemli bir değerdir. Boyutsuz bir sayı olan katılık değerine türbin tasarımlarında çok dikkat edilmesi gerekir. Katılık değerine bağlı olarak maksimum C_p değeri ve kanat uç hız oranları da λ_D değişmektedir. Türbin katılığı Eşitlik 3.24'deki gibi ifade edildiği şekilde kanat sayısına, veter uzunluğuna ve rotor yarıçapına bağlıdır. Türbin katılık değerinin artması Şekil 3.8'de diyagramda görüldüğü gibi eğrilerin sola doğru sıkışmasına neden olur [86]. Katılık değeri arttıkça maksimum C_p değerleri daha düşük kanat uç hız oranlarında elde edilir.

$$\sigma = \frac{Nc_v}{r} \quad (3.24)$$

Burada kanat sayısı N , veter uzunluğu c_v , türbin yarıçapı r ile ifade edilmektedir.



Şekil 3.8. Sabit Reynold sayısına sahip NACA 0018 kanat katılık güç eğrisi [86].

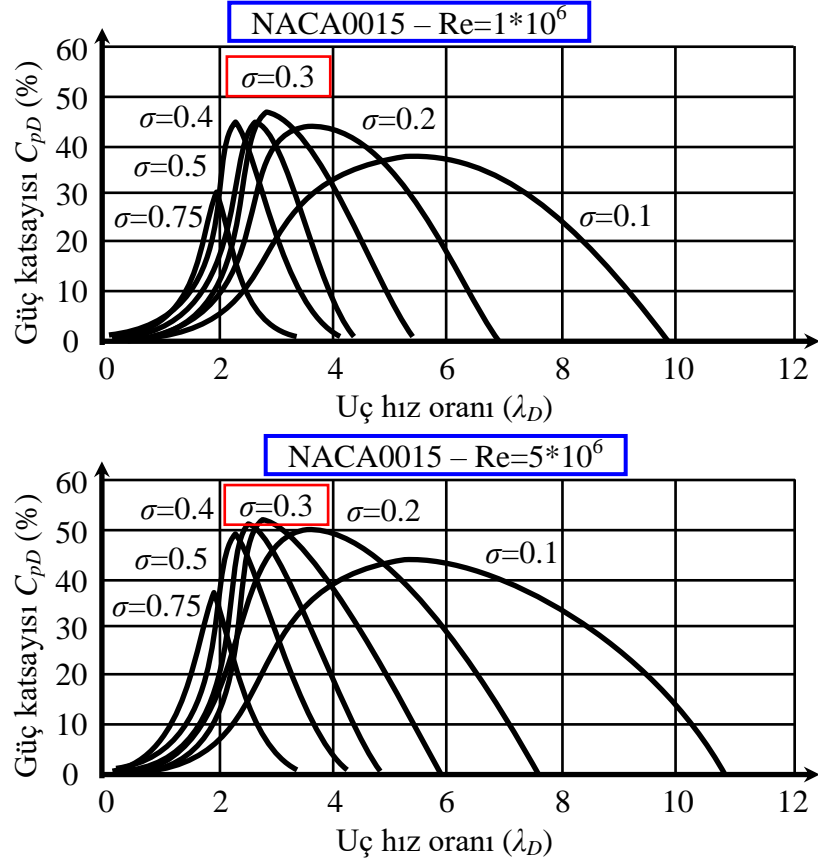
3.1.4. Darrieus Kanat Türbin Tasarımı

Darrieus kanat yapısına sahip rüzgâr türbininden elde edilecek güç formülü Eşitlik 3.25'deki şekilde elde edilmektedir.

$$P_r = \frac{1}{2} \rho_r V_r^3 2rH_r C_p \quad (3.25)$$

Burada P_r rüzgâr gücünü, ρ_r havanın yoğunluğunu, V_r rüzgâr hızını, r rotor yarıçapını, H_r kanat yüksekliğini, C_p güç katsayısını belirtmektedir. Türbin verimi her rüzgâr hızına, kanat uç hız oranına ve Reynolds sayısına göre sürekli değişmektedir. Hesaplanan güç anlık rüzgâr gücünü ifade etmektedir.

C_p değeri Reynold sayısına ve kanat uç hız oranına göre değişmektedir. Bu nedenle teorik hesaplamalarda literatürde yapılmış çalışma referans alınarak [86] NACA0018 kanat profiline ait C_p diyagramlarından faydalanılmıştır. C_p ve λ_D arasındaki grafikler Şekil 3.9'da verilmektedir.



Şekil 3.9. NACA 0018 kanadın farklı Reynold sayılarındaki C_p - λ_D ilişkisi [86].

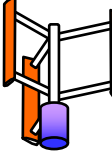
Tez çalışması kapsamında açık deniz Darrieus rüzgâr türbininden elde edilmesi hedeflenen ortalama güç değeri 20 W'tır. Darrieus türbin deneysel çalışmalarda maksimum rüzgâr hızı 15 m/sn'ye kadar test edilmiştir.

H tipi dikey Darrieus rüzgâr türbinde toplam kanat sayısı üç olarak belirlenmiştir. Havanın yoğunluğunu $\rho_r=1.2 \text{ kg/m}^3$, kinematik vizkositeyi $\nu_r=1.46 \times 10^{-5}$ ve kanat uzunluğu 28 cm olarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.9'daki grafikler incelendiğinde verim eğrilerinin Reynold sayısının $Re=5 \times 10^6$ olduğu durumda en yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle hesaplamalar bu grafikteki değerler referans alınarak yapılmaktadır. Şekil 3.9'daki katılık değeri $\sigma=0.3$ olan eğri incelendiğinde, kanat uç hız oranının $\lambda_D=3$ olduğu konumda en yüksek verim değerine, ($C_p=0.51$) ulaşıldığı görülmektedir.

Tez çalışması kapsamında açık deniz Darrieus rüzgâr türbin parametre değerleri ve Eşitlik 3.25'e göre hesaplanan farklı rüzgâr hızlarındaki teorik olarak elde edilebilecek güç değerleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

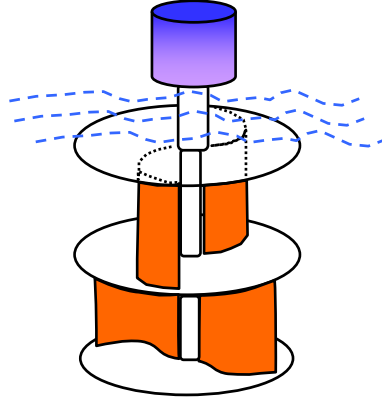
Çizelge 3.2. Darrieus türbin kanat tasarım değerleri.

Eşitlik	Parametreler	Üretilen teorik güç
P_r	$V_r=5$ m/sn	2.14 W
	$V_r=10$ m/sn	17.13 W
	$V_r=12$ m/sn	29.61 W
	$V_r=15$ m/sn	57.83 W
ρ_r	1.2 kg/m ³	 3 kanatlı Darrieus türbin
r	10 cm	
H_r	28 cm	
C_p	0.51	

3.2. SAVONİUS KANAT AERODİNAMİĞİ VE TÜRBİN TASARIMI

Tez çalışma kapsamında yüzeysel akıntı enerji üretilmesinde kullanılacak Savonius akıntı türbini, iki yatay disk arasında yerleştirilmiş ve merkezleri birbirlerine göre simetrik olarak kaydırılmış kanat adı verilen iki yarım silindirden oluşur. Türbin çalışma prensibi, basit olarak şu şekilde açıklanabilir; belirli bir hızla gelen akıntı hızı, türbini oluşturan silindirin içbükey kanadı üzerinde pozitif ve dışbükey kanadı üzerinde negatif bir moment oluşturmaktadır. Silindirin içbükey kanadında oluşan momentin dışbükey kanat üzerinde oluşan momentten daha büyük olmasından dolayı, bir dönme hareketi sağlanmaktadır.

Savonius akıntı türbinleri, iki kanatlı ya da çok kanatlı ve tek katlı veya çok katlı olarak tasarlanabilirler. Çok katlı olarak tasarlanan çarklarda; her kattaki kanatlar, bir diğer kattakilere göre belirli bir açıda kaydırılır. Buna göre; iki katlı akıntı çarklarında bir kattaki kanatlar diğer kattakine göre 90°; üç katlı akıntı çarklarında 60° derece kaydırılır [87]. Şekil 3.10'da tez çalışma kapsamında kullanılan çift katlı Savonius türbin yapısı verilmektedir.

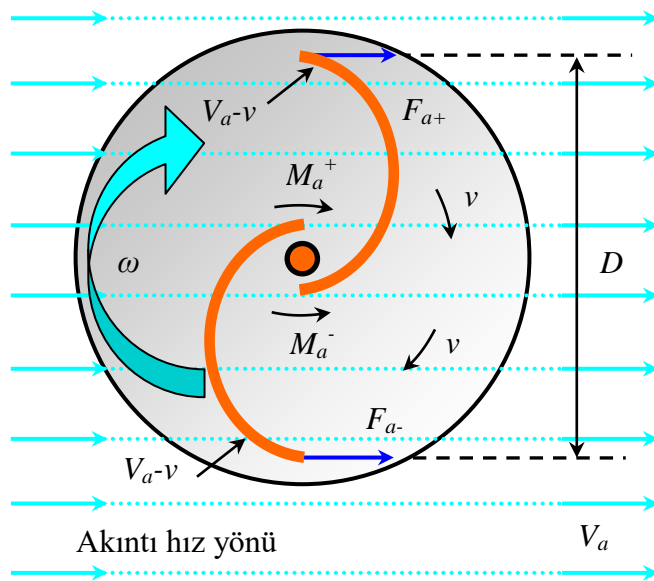


Şekil 3.10. Çift katlı Savonius türbin yapısı.

Şekil 3.11’de Savonius kanatlı akıntı türbininin üzerindeki hız vektörleri gösterilmektedir. V_a akıntı hızı altında, türbin kanat merkezlerinin sabit lineer v hızı ile döndüğü düşünülerek, kanatların üzerine gelen kuvvet Eşitlik 3.26’da verilmektedir.

$$F_a = \frac{1}{2} c_a \rho_a A_a V_a^2 \quad (3.26)$$

Burada, F_a kanat kuvveti, ρ_a su yoğunluğunu, A_a akıntı türbin süpürme alanı, V_a akıntı hızını ifade etmektedir.



Şekil 3.11. Savonius kanatlarındaki iç ve dış bükey hızları.

Burada, yarım küre için $c_1=1.4$ (iç bükey yüzey için), $c_2=0.4$ (dış bükey yüzey için), yarım silindir için $c_1=2.3$ (iç bükey yüzey için), $c_2=1.2$ (dış bükey yüzey için) olarak belirlenmiştir [87]. Savonius türbininden elde edilecek güç Eşitlik 3.27'de verilmektedir.

$$P_a = F_a v \quad (3.27)$$

Burada, v m/sn cinsinden türbin kanat hızıdır. Eşitlik 3.26 ve Eşitlik 3.27 birlikte yazıldığında Eşitlik 3.28 elde edilmektedir.

$$P_a = \frac{1}{2} c_a \rho_a A_a V_a^2 v \quad (3.28)$$

Kanat iç bükey yüzeyinde üretilen güç Eşitlik 3.29'da verilmektedir.

$$P_a^+ = \frac{1}{2} \rho_a A_a [c_1 (V_a - v)^2] \cdot v \quad (3.29)$$

Kanat dış bükey yüzeyinde üretilen güç Eşitlik 3.30'da verilmektedir.

$$P_a^- = \frac{1}{2} \rho_a A_a [c_2 (V_a + v)^2] \cdot v \quad (3.30)$$

Savonius türbininden elde edilecek net güç Eşitlik 3.31'de verilmektedir.

$$P_{anet} = P_a^+ - P_a^- \quad (3.31)$$

Türbininden elde edilecek net güç denklemi Eşitlik 3.29 ve Eşitlik 3.30 ile birlikte yazıldığında Eşitlik 3.32 ve Eşitlik 3.33 elde edilmektedir.

$$P_{anet} = \frac{1}{2} \rho_a A_a [c_1 (V_a - v)^2] v - \frac{1}{2} \rho_a A_a [c_2 (V_a + v)^2] \cdot v \quad (3.32)$$

$$P_{anet} = \frac{1}{2} \rho_a A_a v \left[c_1 (V_a^2 - 2V_a v + v^2) - c_2 (V_a^2 + 2V_a v + v^2) \right] \quad (3.33)$$

Eşitlik 3.33 düzenlendiğinde ise Eşitlik 3.34 elde edilmektedir.

$$P_{anet} = \frac{1}{2} \rho_a A_a v \left[V_a^2 (c_1 - c_2) - 2V_a v (c_1 + c_2) + v^2 (c_1 - c_2) \right] \quad (3.34)$$

Burada, $(c_1 - c_2) = E$ ve $(c_1 + c_2) = F$ ile ifade edildiğinde türbininden elde edilecek net güç Eşitlik 3.35’de verilmektedir.

$$P_{anet} = \frac{1}{2} \rho_a A_a v \left[E V_a^2 - F 2V_a v + E v^2 \right] \quad (3.35)$$

Sabit bir akıntı hızı düşünüldüğünde, optimum güç elde etmek için değişken olan v kanat hızına göre alınan türevin sıfıra eşit olması gerekir. Bundan dolayı güç ifadesinin hıza göre türevi alınır, $\frac{dP_a}{dv} = 0$ olur. Buna göre;

$$\frac{1}{2} \rho_a A_a v E V_a^2 - \frac{1}{2} \rho_a A_a F 2V_a v^2 + \frac{1}{2} \rho_a A_a E v^3 = 0 \quad (3.36)$$

$$\frac{1}{2} \rho_a A_a E V_a^2 - \frac{1}{2} \rho_a A_a F 4V_a v + \frac{1}{2} \rho_a A_a 3E v^2 = 0 \quad (3.37)$$

$$3E v^3 - 4F V_a v + E V_a^2 = 0 \quad (3.38)$$

Kanat hızına göre ikinci dereceden kökleri Eşitlik 3.39’daki gibi elde edilmektedir.

$$v_{1,2} = \frac{-(-4F V_a) \pm \sqrt{(4F V_a)^2 - 12E^2 V_a^2}}{6E} \quad (3.39)$$

Burada v_1 ve v_2 hızları ayrı ayrı Eşitlik 3.40 ve Eşitlik 3.41’deki gibi verilmektedir.

$$v_1 = \frac{2FV_a - V_a\sqrt{4F^2 - 3E^2}}{3E} \quad (3.40)$$

$$v_2 = \frac{2FV_a + V_a\sqrt{4F^2 - 3E^2}}{3E} \quad (3.41)$$

Dış bükey yüzeyin en az etkisi olduğu noktada, güç optimumdur. Dolayısıyla, $c_2=0$ alınmalıdır. Bu durumdaki F ve E 'nin yeni değerleri Eşitlik 3.42 ve Eşitlik 3.43'deki gibi elde edilmektedir.

$$F = c_1 + c_2 \Rightarrow F = c_1 \quad (3.42)$$

$$E = c_1 - c_2 \Rightarrow E = c_1 \quad (3.43)$$

Savonius türbin kanatlarının optimum hız değerleri Eşitlik 3.44 ve Eşitlik 3.45'de ayrıntılı olarak verilmektedir.

$$v_{opt1} = \frac{2c_1V_a - V_a\sqrt{4c_1^2 - 3c_1^2}}{3c_1} = \frac{2c_1V_a - V_ac_1}{3c_1} = \frac{1}{3}V_a \quad (3.44)$$

$$v_{opt2} = \frac{2c_1V_a + V_a\sqrt{4c_1^2 - 3c_1^2}}{3c_1} = \frac{2c_1V_a + V_ac_1}{3c_1} = V_a \quad (3.45)$$

Eşitlik 3.45'de elde edilen hız değeri, türbinin rüzgâr hızı ile aynı hızda dönmesi anlamını taşır ve dolayısıyla güç üretilmez, fiziksel bir anlamı yoktur. Bu nedenle, optimum güç için $v_{opt} = \frac{1}{3}V_a$ olmalıdır. Eşitlik 3.35'de E ve F yerine değerleri koyulur ve $c_2=0$ olarak alınır, net güç Eşitlik 3.46'daki şekilde elde edilir.

$$P_{anet} = \frac{1}{2} \rho_a A_a v c_1 (V_a^2 - 2V_a v + v^2) \quad (3.46)$$

Optimum güç elde etmek için, Eşitlik 3.44'den elde edilen türbin hızının $v_{opt} = \frac{1}{3}V_a$ optimum olduğu değeri, Eşitlik 3.46'da yerine yazıldığında Savonius türbininin optimum gücü Eşitlik 3.47'deki şekilde elde edilir [87].

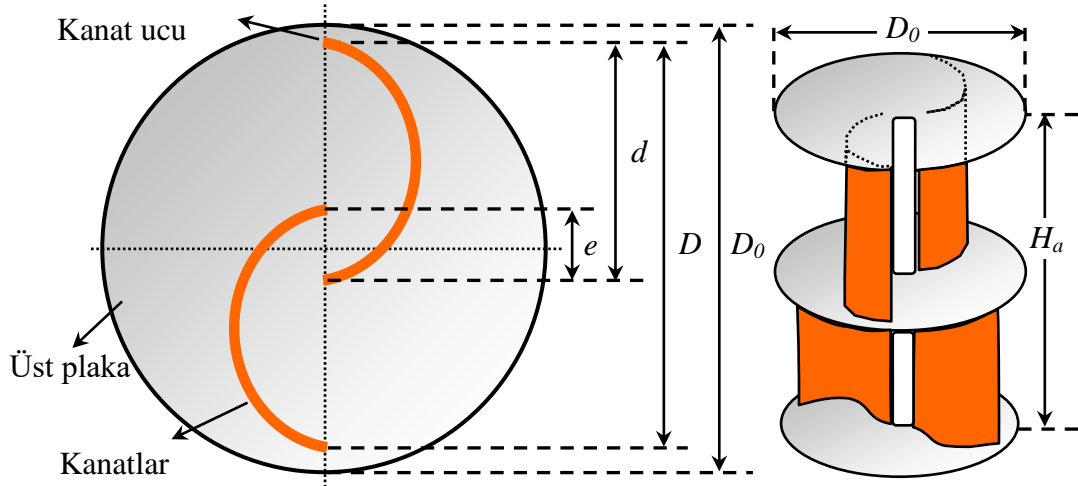
$$P_{aopt} = \frac{2}{27} \rho_a A_a c_1 V_a^3 \quad (3.47)$$

3.2.1. Savonius Kanat Türbin Tasarımı

Savonius kanat türbininde elde edilen optimum güç değerinde A_a süpürme alanının değeri Şekil 3.12'den elde edilmektedir. Süpürme alanı; $A_a = (2d - e) \cdot H_a$ 'dır ve bu değer Eşitlik 3.47'de yazıldığında Eşitlik 3.48 elde edilmektedir.

$$P_{aopt} = \frac{2}{27} \rho_a c_1 (2d - e) H_a V_a^3 \quad (3.48)$$

Burada, e kayma mesafesi, d kanat çapı, H_a türbin yüksekliğidir.



Şekil 3.12. Savonius kanat türbin tasarım parametreleri.

Literatürde Savonius kanat tasarımı konusunda referans üretim çalışmaları bulunmaktadır [87]. Bu çalışmalara göre tasarım için kullanılacak bazı optimum değerler tespit edilmiştir. Bunlar;

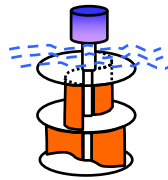
Türbin çap yükseklik oranı; $A_R = \left(\frac{H_a}{D}\right) = 1$,

Kanat uç platform çapı; $D_0 = 1.1 \cdot D$,

Kayma oranı; $G = \left(\frac{e}{d}\right) = 0.15$ olarak belirlenmiştir.

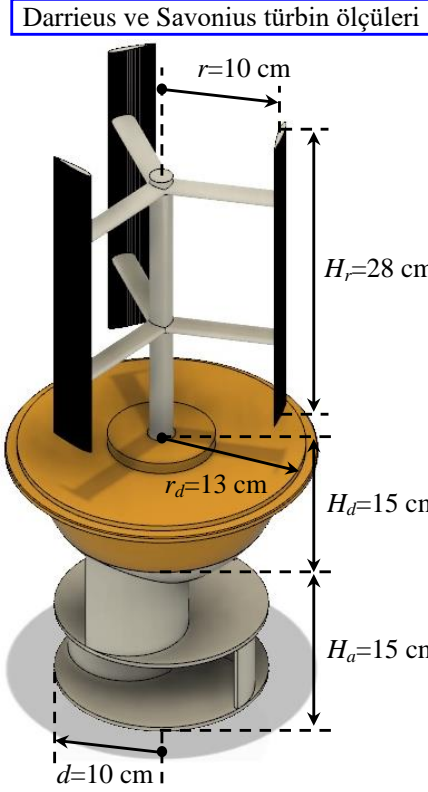
Burada, H_a türbin yüksekliği, D_0 kanat uç platform çapı, D türbin çapı, e kayma mesafesi, d kanat çapı, G kayma oranı (%)'dir. Bu tasarım kriterleri referans alınarak tez çalışma kapsamında üretimi gerçekleştirilen Savonius türbin parametreleri ve teorik olarak üretilebilecek güç değerleri Çizelge 3.3'de ayrıntılı olarak verilmektedir.

Çizelge 3.3. Savonius türbin kanat tasarım değerleri.

Eşitlik	Parametreler	Üretilebilecek teorik güç
P_a	$V_a=0.5$ m/sn	0.60 W
	$V_a=1$ m/sn	4.87 W
	$V_a=1.2$ m/sn	8.41 W
	$V_a=1.5$ m/sn	16.44 W
ρ_a	997 kg/m ³	
c_l	2,3	
d	10 cm	
e	1.5 cm	
H_a	15 cm	

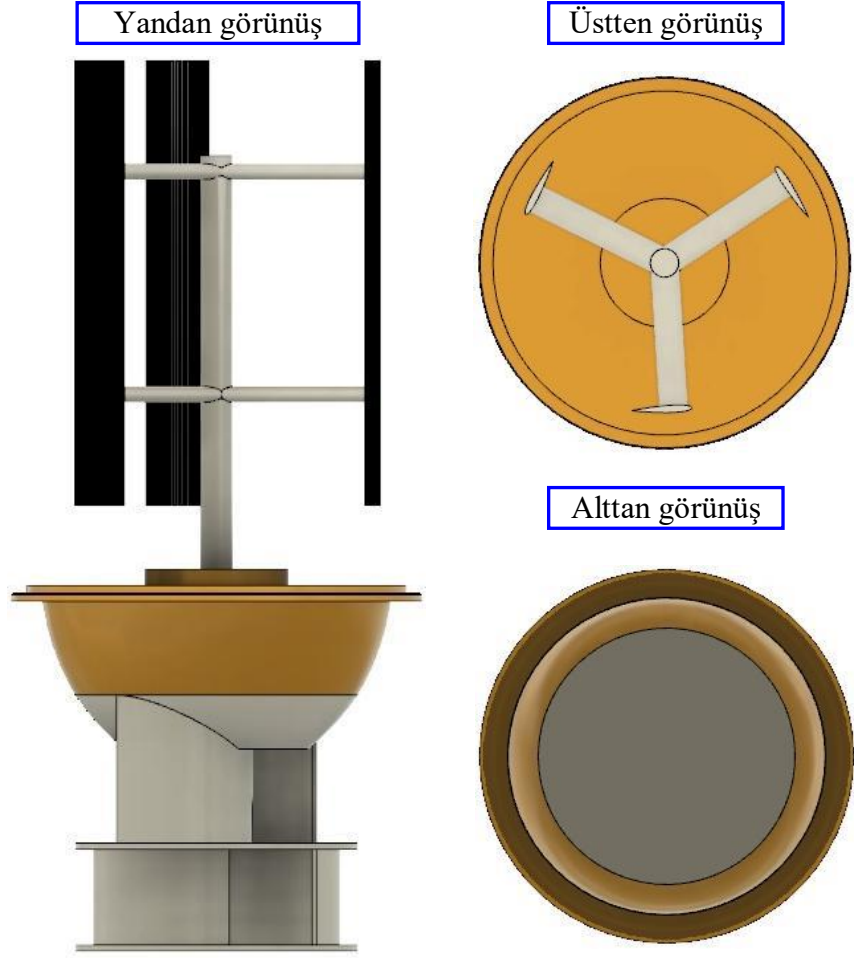
3.3. DARRIEUS VE SAVONIUS TÜRBİN ÜRETİMİ

Tez çalışma kapsamında tasarımı konusunda parametreleri belirlenen Darrieus ve Savonius türbinlerinin prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Darrieus ve Savonius türbin ölçüleri Şekil 3.13'de ayrıntılı olarak verilmektedir. Açık deniz rüzgâr türbin kanat yüksekliği 28 cm, yarıçapı ise 10 cm'dir. Akıntı türbin yüksekliği 15 cm, yarıçapı 10 cm ve yüzer duba platformu ise yükseklik 15 cm, yarıçapı 13 cm olarak konik bir yapıda üretimi gerçekleştirilmiştir.

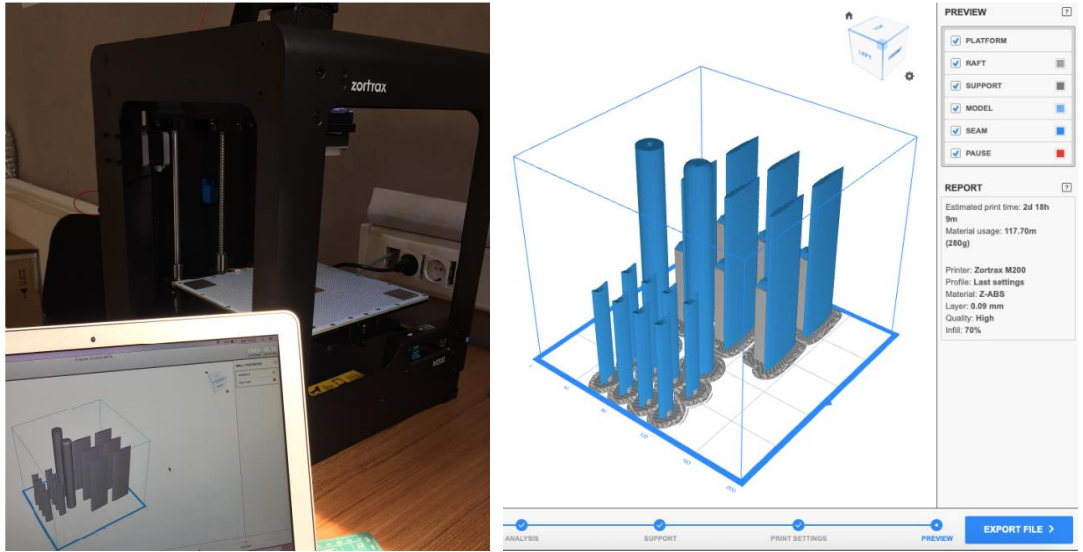


Şekil 3.13. Darrieus ve Savonius türbinlerinin üretim parametreleri.

Tez çalışması kapsamında bütün sistemin 3 boyutlu (3D) çizimleri Autodesk Fusion 360 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Darrieus ve Savonius türbin sisteminin program arayüzünde oluşturulan perspektif görünüşleri Şekil 3.14’de verilmektedir. Autodesk Fusion 360 programında oluşturulan tasarım Zortrax M200 3D yazıcı kullanılarak türbinlerin çıktıları elde edilmiştir. Autodesk Fusion 360 programında oluşturulan çizimin STL dosyası alınarak Zortrax M200 3D yazıcı arayüzü olan Z-Suite programında aktarılmıştır. 3D yazıcının doluluk oranı, hassaiyet ve hız baskı ayarları yapıldıktan sonra üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu yazıcı ayarları ürünün kalitesi için önemlidir. Doluluk oranı parçaya dış kabuk oluşturduktan sonra kalan kısımların ne kadar yoğunlukta olmasını belirlemektedir. Darrieus kanatların üretimi için doluluk oranı % 70 olarak belirlenmiştir. 3D yazıcıda diğer bir ayar ise alt katmandır. Bu alt katman ürün yazdırılmadan önce bir zemin hazırlanmaktadır ve üretilecek parça bu zemine yazdırılmaktadır. 3D yazıcının yazdırma hassasiyeti oranı bütün parçalar için yüksek ve katman kalınlığı 0.09 mm olarak seçilmiştir. Zortrax M200 3D yazıcı ve program arayüzü Şekil 3.15’de verilmektedir.

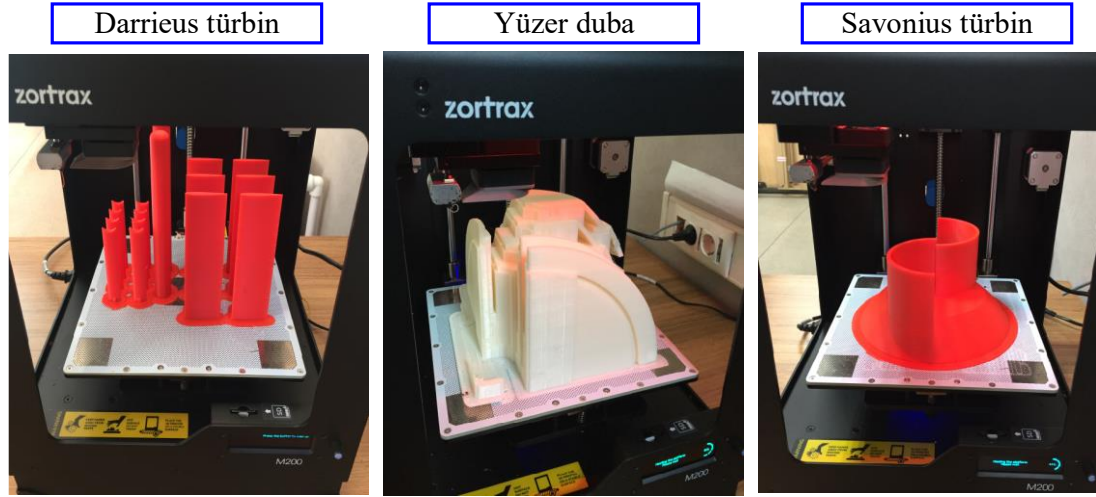


Şekil 3.14. Darrieus ve Savonius türbin sisteminin perspektif görüntüleri.



Şekil 3.15. Zortrax M200 3D yazıcı ve program arayüzü.

Zortrax M200 3D yazıcıda Darrieus, Savonius türbinleri ve yüzer duba çıktı fotoğrafları Şekil 3.16'da verilmektedir. Türbinlerin yazıcı da üretilmeleri uzun sürmektedir. Darrieus türbin tasarımının üretilmesi 2 gün 18 saat, Savonius türbin tasarımının üretilmesi 2 gün 7 saat, yüzer dubanın üretilmesi 2 gün 22 saat sürmüştür.



Şekil 3.16. Darrieus, Savonius türbinleri ve yüzer duba 3D çıktı fotoğrafları.

3D yazıcı ile üretimi gerçekleştirilen Darrieus, Savonius türbinleri ve yüzer duba yapıştırma ve montaj işlemleri tamamlandıktan sonra sistemin rahat bir şekilde dönebilmesi için rulmanlar monte edilmiştir. 3D yazıcıdan çıkan parçalar yüksek yazdırma kalitesinde ve ince katmanlar halinde yazdırılmış olsa da yüzeylerde bir pürüzlük vardır. Bu yüzey pürüzlüğü türbin kanatlarının dönme sırasında özellikle Darrieus ve Savonius kanatlarının yüzeylerinde küçük girdaplara neden olacaktır. Bu da türbin kanatlarının dönme verimini olumsuz olarak etkileyecektir. Bu yüzey pürüzlüğünü ortadan kaldırmak için bütün parçalara zımpara işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra sistemde bulunan parçaların dayanıklılık ve görüntü açısından astarlama, toz boyama, vernik ve cila işlemleri gerçekleştirilerek son haline getirilmiştir. Şekil 3.17'de Darrieus ve Savonius türbin sisteminin boyasız ve boyalı hali olmak üzere son hali verilmektedir.

Sistemin montaj fotoğrafı



Sistemin boya sonrası fotoğrafı

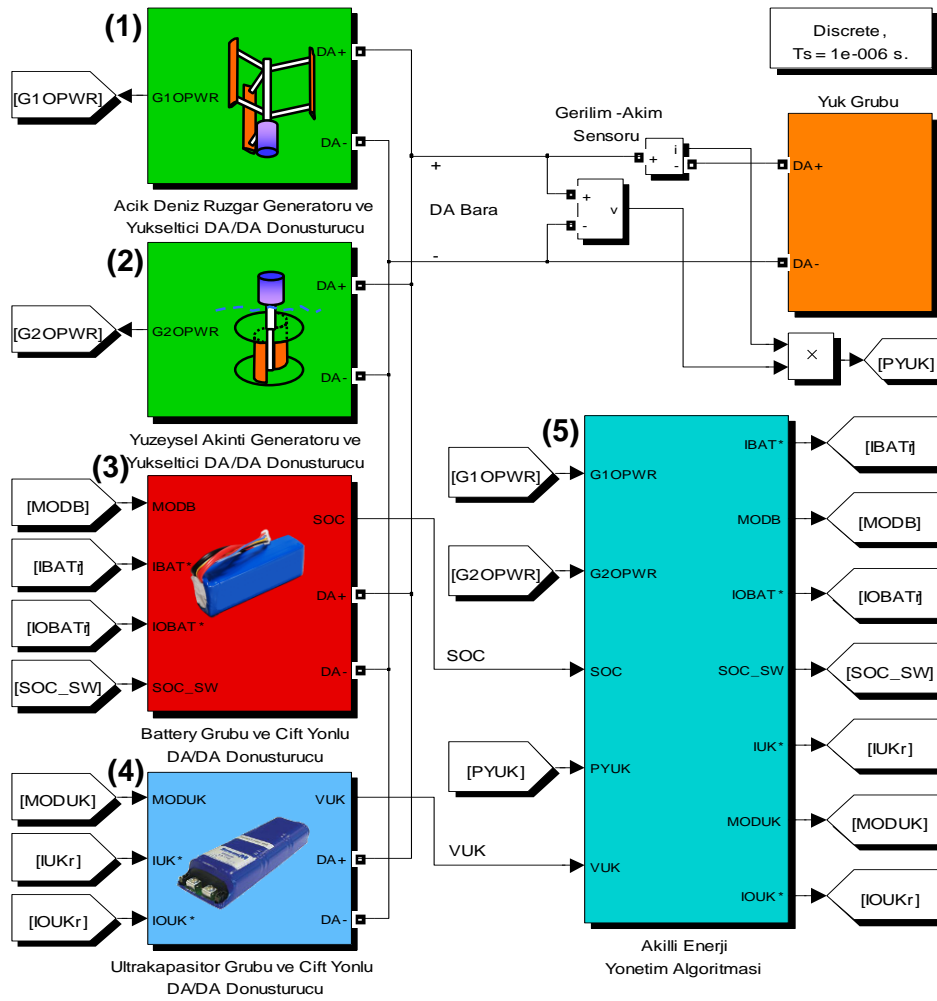


Şekil 3.17. Darrieus ve Savonius türbin sisteminin nihai halinin fotoğrafı.

BÖLÜM 4

HİBRİT SİSTEMİN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARI

HGÜS'ne HEDS entegre edilerek Akıllı Enerji Yönetim Algoritmasıyla (AEYA) kontrol edilen yapının Matlab/Simulink blok diyagramı Şekil 4.1'de verilmektedir. Bu simülasyon çalışmasında, açık deniz rüzgâr generatörü, yüzeysel akıntı generatörü ve bu güç üretim sistemlerine bağlı bulunan redüktör ve DA/DA yükseltici dönüştürücüleri, batarya ve ultrakapasitör gurubu, çift yönlü DA/DA dönüştürücüleri simüle edilerek AEYA ile sistemin benzetimi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.1. Hibrit sistemin Matlab/Simulink blok diagramı.

Deneysel sistemde açık deniz rüzgâr ve yüzeysel akıntı enerjisinden elde edilen mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi işleminde 12 V 20 W sabit mıknatıslı DA generatör kullanılmıştır ve simülasyon çalışmalarında aynı güç değerlerinde generatör benzetimi yapılmıştır. Aynı şekilde sistemde kullanılan batarya ve ultrakapasitör gurubu simüle edilerek sistem analizleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri Çizelge 4.1’de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri.

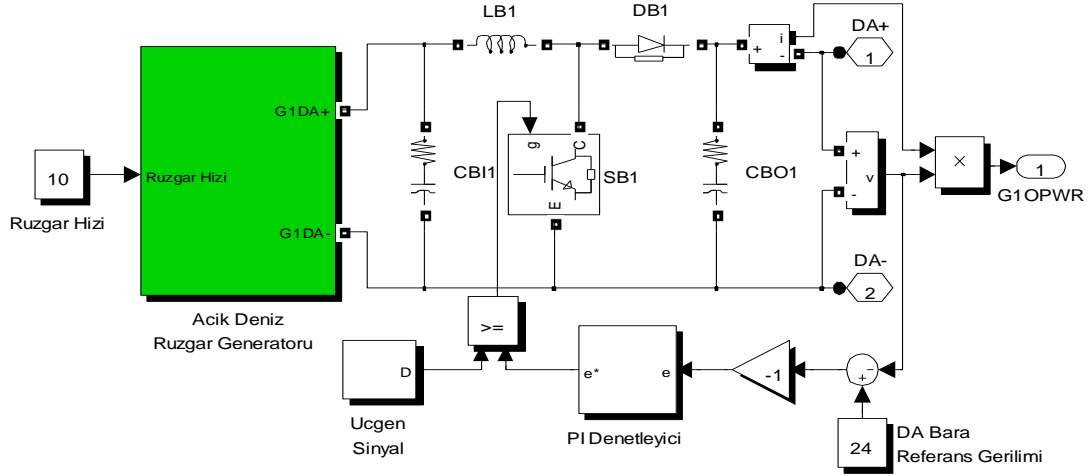
Parametreler	Değeri	
Açık deniz rüzgâr ve yüzeysel akıntı generatörü	Nominal anma gücü (P_G)	20 W
	Nominal devir sayısı	800 rpm
	Açık devre gerilimi (V_{OC})	14 V
	Maksimum akım (I_{GM})	2 A
	Verim	% 92
Batarya Gurubu (Lityum-İyon)	Batarya gerilimi (V_{BAT})	11.1 V
	Batarya akım kapasitesi (C_{BAT})	3 Ah
	Batarya güç kapasitesi	33 Wh
Ultrakapasitör Gurubu	Ultrakapasitör gerilimi (V_{UK})	13.5 V
	Ultrakapasitör kapasitesi (C_{UK})	2 F
	Ultrakapasitör güç kapasitesi	50.5 mWh
Yük Gurubu	Omik yük	0.5-1 Ω

4.1. AÇIK DENİZ RÜZGÂR GENARATÖR VE KONTROL ALGORİTMASI

Şekil 4.1’de, (1) numaralı blokta açık deniz rüzgâr generatörü, DA/DA yükseltici dönüştürücü ve oransal integral (PI) DA bara gerilim kontrol algoritması bulunmaktadır. Açık deniz rüzgâr generatörü, DA/DA yükseltici dönüştürücü ve PI DA bara gerilim kontrol algoritmasının Matlab/Simulink blok diyagramı Şekil 4.2’de verilmektedir. PI DA bara gerilim kontrol algoritması DA/DA yükseltici sayesinde 12 V olan çıkış gerilimini 24 V olacak şekilde denetler. Açık deniz rüzgâr generatörünün ürettiği gerilim değeri rüzgâr hızına bağlı olarak değişim göstermektedir. DA/DA yükseltici devre sayesinde giriş gerilimindeki değişimlere karşı çıkış gerilimi sürekli olarak 24 V’ta sabit tutulmaktadır.

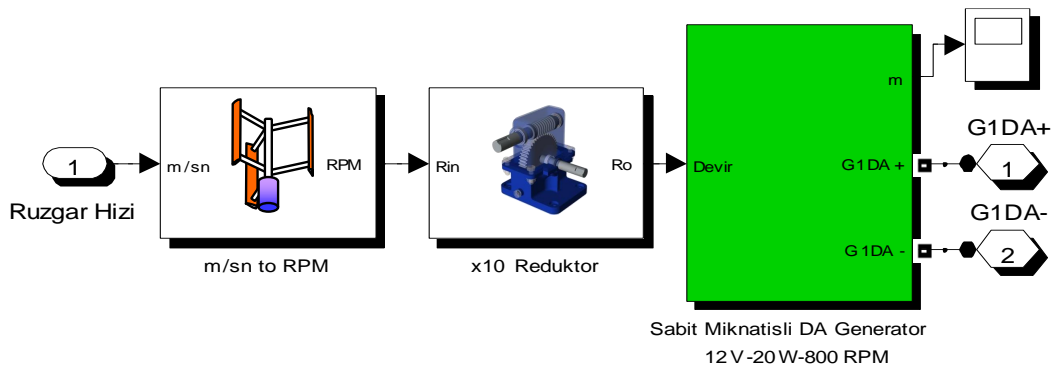
Açık deniz rüzgâr generatörü ve DA/DA yükseltici dönüştürücüsünden sağlanan akım DA baraya aktarılarak akıllı enerji yönetim algoritmasının kontrolüne bağlı

olarak evirici aracılığıyla sistemin birincil önceliği olan yük talebini karşılayarak, batarya ve ultrakapasitör gurubunun şarj olmasını sağlamaktadır.



Şekil 4.2. Açık deniz rüzgâr generatörü ve kontrol algoritması blok diyagramı.

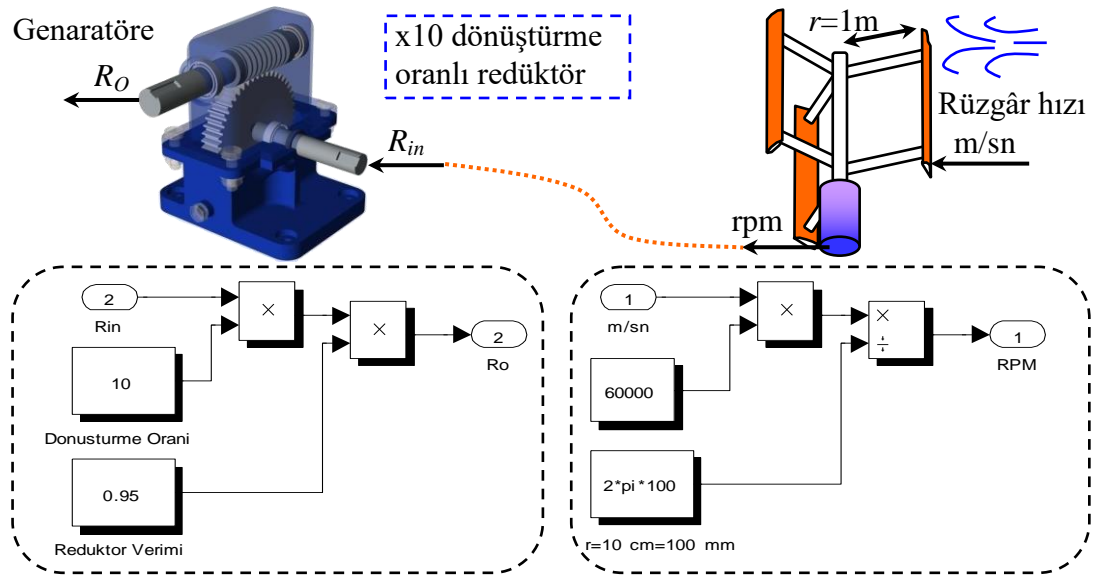
Açık deniz rüzgâr generatörü olarak sabit mıknatıslı generatör kullanılmıştır. Matlab/Simulink'te bulunan model deneysel çalışmalarda kullanılması planlanan 800 rpm devir sayısı, 12 V gerilimde ve 20 W gücünde olacak şekilde gerekli parametreleri girilmiştir. Sabit mıknatıslı generatör modeli, redüktör, rpm-m/sn dönüştürme birimleri Şekil 4.3'de verilmektedir. Sistemde kullanılacak olan sabit mıknatıslı generatör 12 V gerilim üretmektedir.



Şekil 4.3. Açık deniz rüzgâr generatörü ve redüktör blok diyagramı.

Sabit mıknatıslı generatörün güç üretmesi için açısal hız (ω) parametresinin girilmesi gerekmektedir. Açısal hız parametresine bağlı olarak generatörden elde edilen gerilim değeri değişmektedir. Açık deniz darrieus rüzgâr türbin kanatlarına

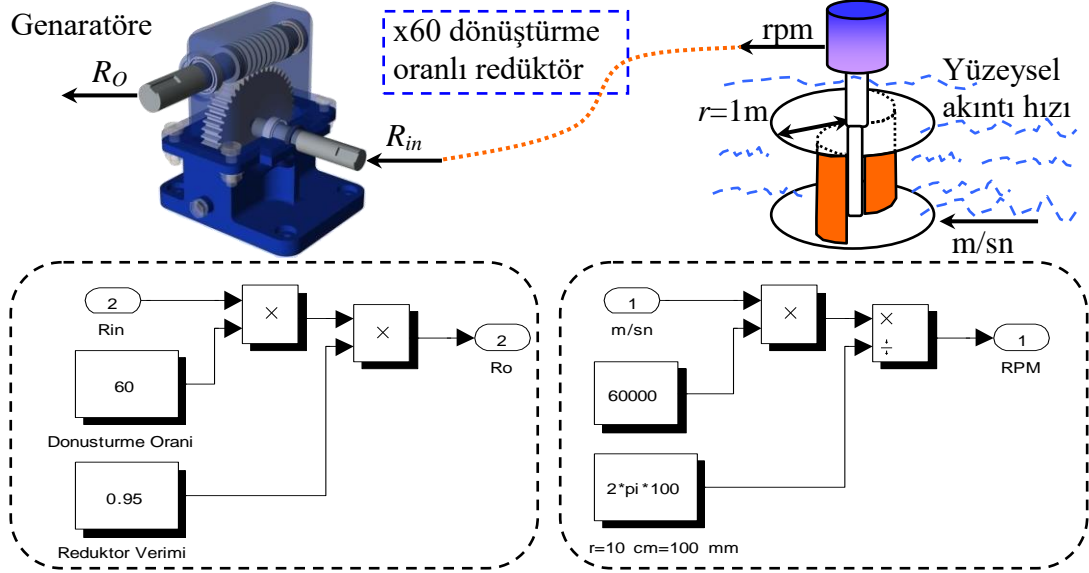
uygulanan m/sn cinsinden girilen rüzgâr hızı rpm cinsinden dönüşümü yapılarak türbin milindeki devir sayısı hesaplanmaktadır. Hesaplanan rpm parametresi redüktörün girişine uygulanarak çarpan dönüşümü yapıldıktan sonra genaratör miline aktarılmaktadır. Tez çalışması kapsamında kullanılacak redüktörlerin verimleri % 95 olarak verilmektedir. Simülasyon çalışmasında redüktör verimi çarpan olarak girilmiştir. Şekil 4.4’de m/sn’yi rpm dönüştürme ve x10 redüktör dönüştürme oran blok diyagramı verilmektedir.



Şekil 4.4. Darrieus türbin redüktör dönüştürme oran blok diyagramı.

Tez çalışması kapsamında HGÜS İstanbul Boğazı’nda modelleneceğinden bu lokasyondaki rüzgâr hız verileri redüktör dönüştürme oranında önemli rol oynamaktadır. İstanbul Boğazı’nda daha önce bölgeden İstanbul Üniversitesi Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü ile Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi tarafından ölçülen rüzgâr hızının ortalama 15 m/sn olduğu kayıt edilmiştir. Tez çalışmasında kullanılması planlanan genaratör 12 V, 20 W tam gücü 800 rpm’de üretmektedir. Bu rüzgâr hızı ve genaratör devir sayısı hesaba katılarak redüktör dönüştürme oranı giriş katın 10 kat daha hızlı olması sonucuna varılmaktadır. Darrieus rüzgâr türbin kanatlarına uygulanan m/sn cinsinden girilen rüzgâr hızını rpm cinsinden dönüştürülmesi Eşitlik 4.1’de verilmektedir. Redüktör dönüştürme oranı ve verim hesaplaması da Eşitlik 4.2’de verilmektedir. Buradaki; r darrieus

açık deniz türbinindeki generatör kullanılacağından redüktör çıkış hızı 800 rpm olması gerekmektedir. Bundan dolayı redüktör dönüşüm oranı 60 olarak seçilmektedir. Şekil 6’da savonius türbin hızını m/sn’yi rpm dönüştürme ve x60 redüktör dönüştürme oran blok diyagramı verilmektedir.



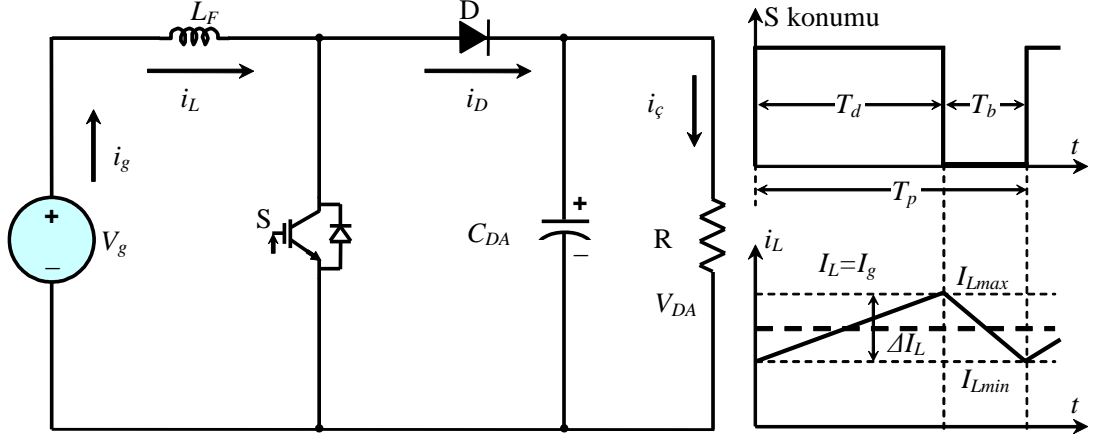
Şekil 4.6. Savonius türbin redüktör dönüştürme oran blok diyagramı.

4.2.1. DA/DA Yükseltici Dönüştürücü Modeli

Açık deniz rüzgâr ve yüzeysel akıntı türbinlerinden üretilen enerji sistemde bulunan DA bara gerilimine yükseltilmesi için DA/DA yükseltici kullanılmaktadır. DA/DA yükseltici dönüştürücüler, türbinlerde bulunan generatörlerden üretilen değişken DA giriş gerilimini çıkışta 24 V gerilim seviyesine yükseltmek için kullanılmaktadır. Tipik bir DA/DA yükseltici dönüştürücü yapısı Şekil 4.7’de verilmektedir.

DA/DA yükseltici içerisindeki yarı iletken anahtar birinci aralıkta iletimdedir (T_d). V_g kaynağı tarafından endüktans beslenir, endüktanstan geçen akım doğrusal olarak artar ve endüktansın enerji seviyesi de yükselir. Bu aralıkta yükün beslemesini kondansatör üstlenir. Yarı iletken anahtarın sinyalinin kesilmesiyle, enerjili olan endüktansın ürettiği gerilim ile D diyodu iletime geçer. İkinci aralıkta, diyot iletimdedir, V_g kaynağı ve endüktansta biriken enerji tarafından yük beslenir, endüktanstan geçen akım doğrusal olarak azalır ve endüktansın enerji seviyesi de

düşer. Ayrıca, bu devrede güç elemanları V_{ζ} çıkış gerilimine maruz kalır. Burada; λ doluluk oranı, f_p anahtarlama frekansı, T_d S anahtar iletim süresi, T_b S anahtar kesim süresi, T_p çalışma periyodu, V_g DA bara giriş gerilimi, V_{DA} DA bara çıkış gerilimi, I_g DA bara giriş akımı, I_{ζ} DA bara çıkış akımı, ΔI_L endüktans akım dalgalanmasıdır.



Şekil 4.7. DA/DA yükseltici dönüştürücü yapısı [88].

Kararlı rejimde endüktans geriliminin pozitif ve negatif alanlarının eşitliğinden, ortalama DA çıkış gerilimi Eşitlik 4.3 ile elde edilir. Eşitlik 4.4'de doluluk oranı eşitliği verilmektedir.

$$V_{DA} = \frac{I}{I - \lambda} V_g \quad (4.3)$$

$$\lambda = \frac{T_d}{T_p} \quad (4.4)$$

Giriş ve çıkıştaki güçlerin eşitliğinden, giriş akımı Eşitlik 4.5 ile elde edilir. Endüktans akımındaki dalgalanma miktarı ise Eşitlik 4.6'da verilmektedir.

$$I_g = \frac{I}{I - \lambda} I_{\zeta} \quad (4.5)$$

$$\Delta I_L = \lambda(I - \lambda) \frac{V_{DA}}{f_p L_{FV}} \quad (4.6)$$

DA/DA yükseltici dönüştürücüde, sürekli, sınırda ve kesintili çalışmalar Eşitlik 4.7 ile özetlenebilir.

$$I_g \begin{cases} > \Delta I_L/2 / & \text{Sürekli iletim modunda çalışma} \\ = \Delta I_L/2 / & \text{Sınırda çalışma} \\ < \Delta I_L/2 / & \text{Kesintili iletim modunda çalışma} \end{cases} \quad (4.7)$$

DA/DA yükseltici dönüştürücüde birinci aralıkta çıkış akımını tamamen kondansatör üstlenir, birinci aralıkta boşalan kondansatör ikinci aralıkta dolar. Kararlı durumda kondansatör geriliminin artma ve azalma miktarları eşit olduğundan, dalgalanma miktarı sadece birinci aralık göz önünde tutularak Eşitlik 4.8'deki gibi hesaplanmaktadır [88].

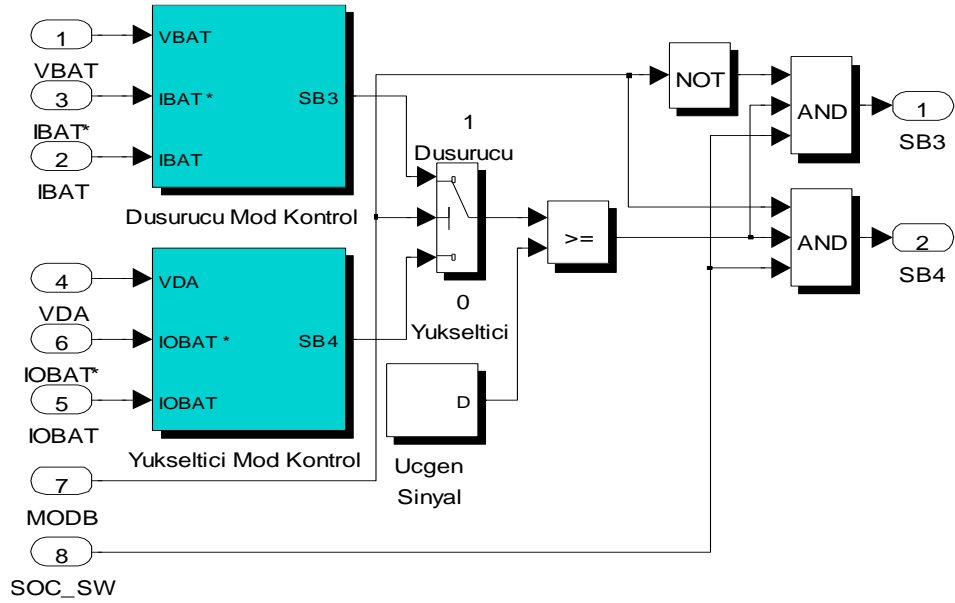
$$\Delta V_{DA} = \frac{\lambda I_\zeta}{f_p C_{DA}} \quad (4.8)$$

Tez çalışmasında tasarlanan DA/DA yükseltici dönüştürücü verilen Eşitlik 4.3-Eşitlik 4.8 kullanılarak gerekli olan bobin ve kondansatör değerleri hesaplanmıştır. HGÜS için her iki sistemde de üretilen güç değerleri aynı olduğundan iki sistemdeki DA/DA yükseltici parametreleri aynıdır. Çizelge 4.2'de HGÜS'de kullanılan DA/DA yükseltici dönüştürücü parametreleri verilmektedir.

Çizelge 4.2. HGÜS'de kullanılan DA/DA yükseltici dönüştürücü parametreleri.

Parametreler	Değeri
T_p	100 μ s
f_p	10 kHz
I_ζ	3 A
I_g	10 A
V_g	10-20 V
V_{DA}	24 V
L_{FV}	>90 μ H
C_{DA}	750 μ F

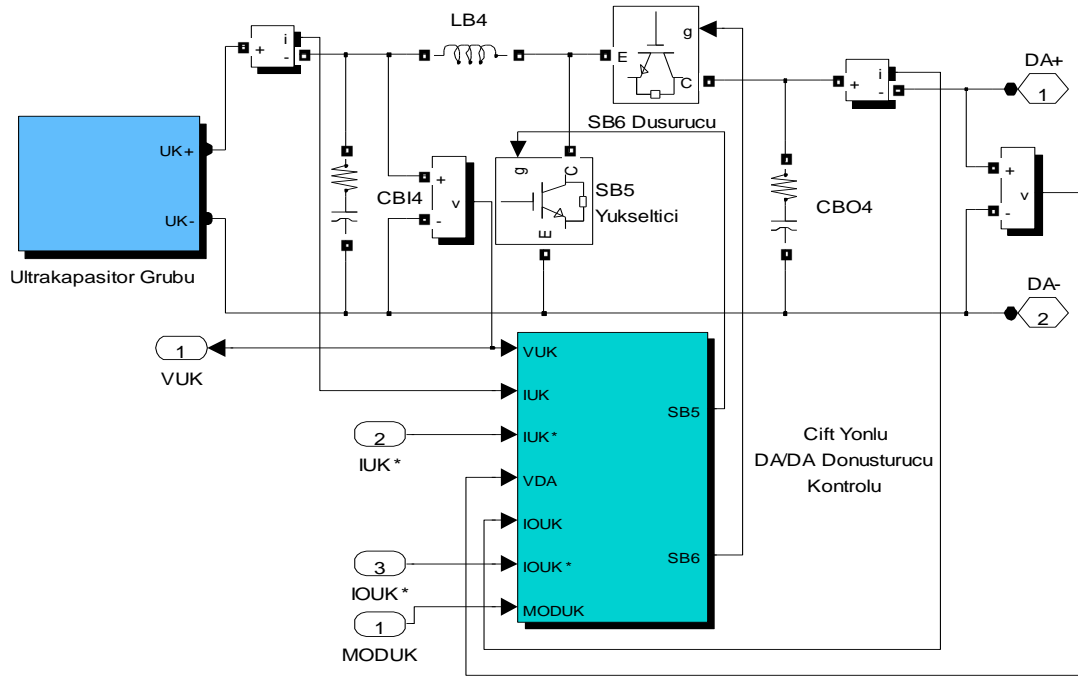
modda çalıştırılmasını sağlayan kontrol algoritması bulunmaktadır. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısının düşürücü modda çalışmasını sağlamak için SB₃ anahtarına Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) uygulanması ve SB₄ anahtarının açık devre konumda olması gerekir. Bu kontrol algoritması enerji yönetim algoritmasına bağlı olarak çalışmaktadır. 7 nolu MODB seçimine gelen bilgi 1 olduğu zaman kontrol algoritması sistemin düşürücü moda geçmesini sağlamaktadır. Blok diyagramındaki 8 nolu giriş olan SOC_SW bilgisi ise batarya gurubunun çalışmasına gerek kalmadığı (şarj/deşarj) durumu kontrol eder 0 bilgisi geldiğinde SB₃ ve SB₄ anahtarını kapatarak batarya gurubunun DA baradan enerji akışını durmasını sağlamaktadır. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısının yükseltici modda çalışmasını sağlamak için de blok diyagramındaki SB₄ anahtarına DGM uygulanması ve SB₃ anahtarının kapalı konumda olması gerekir.



Şekil 4.9. Batarya gurubunun çift yönlü DA/DA dönüştürücü kontrol blok diyagramı.

Şekil 4.10'da verilen batarya gurubu düşürücü ve yükseltici mod kontrolü ile şarj vedeşarj sırasında akım ve gerilim kontrolü yapılmaktadır. Düşürücü ve yükseltici mod kontrolünde kaskad PI denetleyici kullanılmıştır. Düşürücü modda ilk PI denetleyici batarya gurubunun şarj olması gereken 12 V batarya terminal gerilim kontrolünü yapmaktadır. Düşürücü modda ikinci kaskad PI denetleyici ise batarya gurubunun şarj akımını kontrol etmektedir. Batarya gurubunun şarj akımını ise akıllı enerji yönetim algoritmasında hesaplanan akım değeri ile belirlemektedir. Düşürücü mod

sağlayabilir. Buna karşın batarya gurubu daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir, ultrakapasitör gurubu ile karşılaştırıldığında daha yüksek enerji depolayabilir ve daha uzun süre enerji sağlayabilir. Birbirini tamamlayıcı özelliklerinden dolayı ultrakapasitör enerji depolama ünitesiyle anlık, batarya enerji depolama ünitesiyle sürekli güç ihtiyacı karşılanmaktadır. Böylelikle batarya gurubu ve ultrakapasitör gurubu ile hibrit enerji depolama sistemi oluşturulmaktadır.



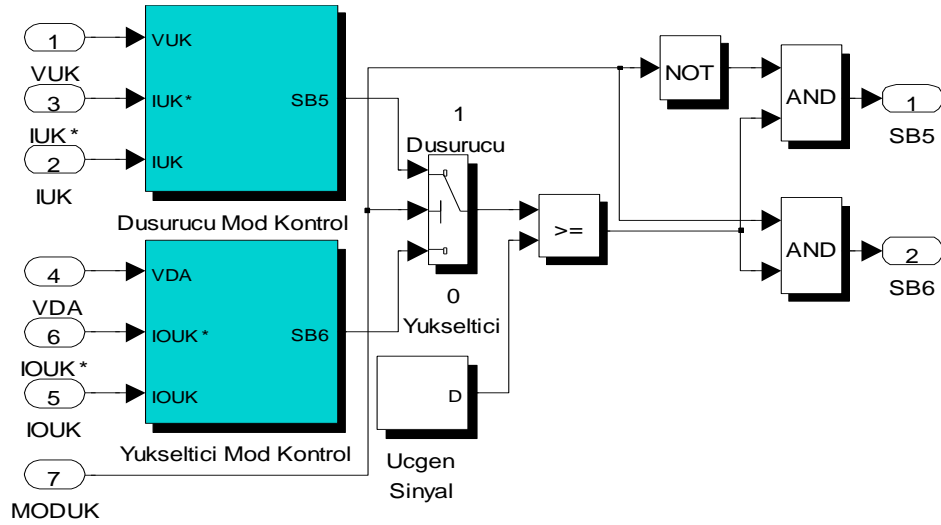
Şekil 4.11. Ultrakapasitör gurubu ve çift yönlü DA/DA dönüştürücü blok diyagramı.

4.4.1. Ultrakapasitör Gurubunun Çift Yönlü DA/DA Dönüştürücü Kontrolü

Şekil 4.12’de ultrakapasitör gurubunun çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısının kontrol ünitesinin simulink blok diyagramı verilmektedir. Burada, batarya gurubunun kontrolü ünitesine benzerlik göstermekle birlikte ultrakapasitörün sistemdeki çalışma amacına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir.

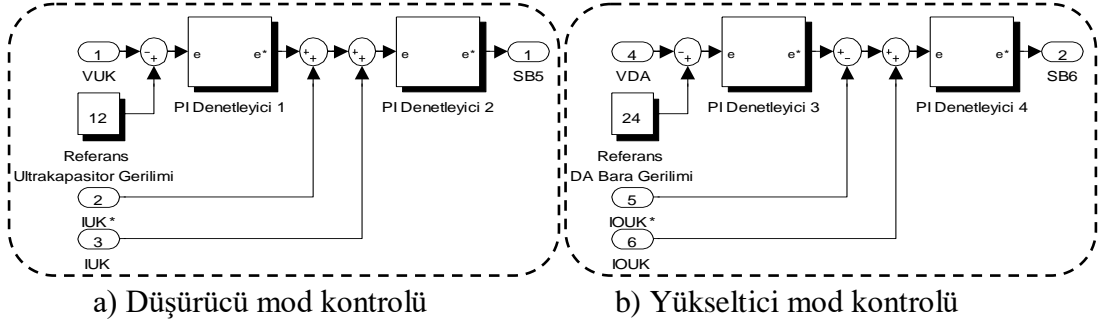
Akıllı enerji yönetim algoritmasının sistemdeki enerji miktarlarını hesaplayarak ultrakapasitör gurubunun da şarj seviyesini sürekli olarak tarama çevrimi boyunca kontrol etmektedir. Ultrakapasitör gurubunun kontrol ünitesine MODUK bilgisi göndererek dönüştürücünün düşürücü (MODUK 1 bilgisi) veya yükseltici (MODUK

0 bilgisi) modda çalışmasını sağlamaktadır. Burada kontrol birimi düşürücü modunda çalıştırırken ultrakapasitör gurubunun şarj olması için gerekli I_{UK}^* referans akım değeri akıllı enerji yönetim algoritmasıyla belirlenmektedir. Ultrakapasitör gurubu yapısal özelliğinden dolayı şarj sırasında çok yüksek akımlar çekebilmektedir. Bu yüksek şarj akımı DA barada gerilim düşümlerine neden olarak sistemin kararlı çalışmasına neden olabilir. Bu yüzden ultrakapasitör şarj akımı maksimum 5 A olarak belirlenmiştir. Ultrakapasitör gurubunun yükseltici modda çalışması sırasında referans deşarj akım değeri I_{OUK}^* akıllı enerji yönetim algoritması tarafından anlık talep edilen yük miktarına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Talep tarafındaki yük gurubunun anlık güç ihtiyacında ultrakapasitör gurubu deşarj modunda çalışmaktadır. Ultrakapasitör gurubu yüksek akımlardaki ihtiyacı karşılayarak DA baradaki gerilim, çökme ve dalgalanmaların önüne geçerek hem yük talep tarafında kaliteli, kesintisiz ve sürekli enerji sağlamakta hem de sistemin kararlı çalışması arızaların önüne geçmektedir.



Şekil 4.12. Ultrakapasitör gurubunun çift yönlü DA/DA dönüştürücü kontrol blok diyagramı.

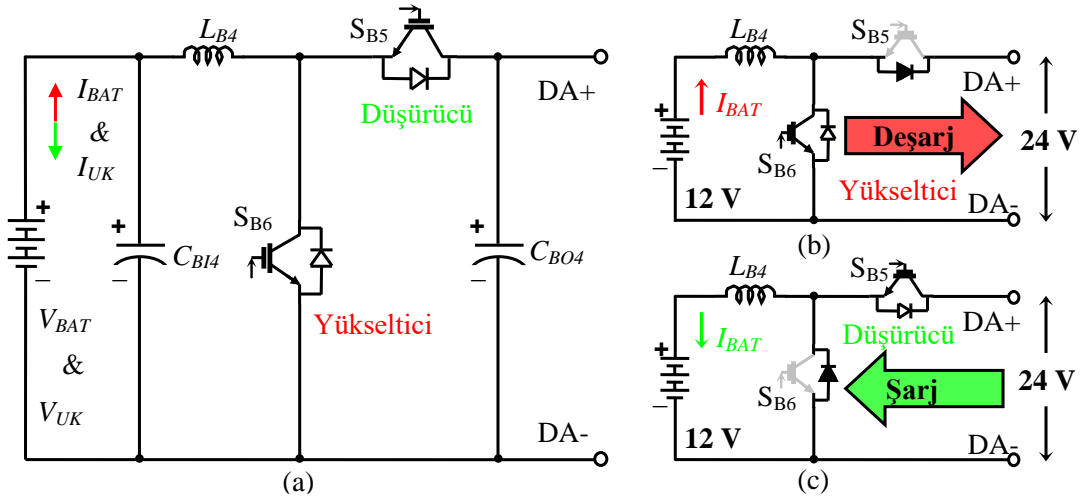
Şekil 4.13’de ultrakapasitör gurubu düşürücü ve yükseltici mod kontrolü ile şarj ve deşarj sırasında akım ve gerilim kontrol blok diyagramı verilmektedir. Batarya gurubunun kontrolünde olduğu gibi düşürücü ve yükseltici mod kontrolünde kaskad PI denetleyici kullanılmıştır. Ultrakapasitör gurubunun şarj seviyesi 12 V’ta deşarj sırasında DA bara gerilimi olan 24 V seviyesinde kontrolü yapılmaktadır.



Şekil 4.13. Ultrakapasitör gurubu (a) düşürücü, (b) yükseltici kontrol blok diyagramı.

4.4.2. Çift Yönlü DA/DA Dönüştürücü Modeli

Batarya ve ultrakapasitör gurubunda çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısı kullanılmaktadır. HEDS’de kullanılan çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısı Şekil 4.14 (a)’da verilmektedir. HGÜS ve HEDS’de, DA bara gerilim 24 V olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.14. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısı.

Batarya ve ultrakapasitör guruplarının gerilim seviyesi DA baradan daha düşük olan 12 V’dir. Sistemde sadece düşürücü veya yükseltici DA/DA dönüştürücü kullanılması bu işlemler için uygun değildir. Bu amaçla batarya ve ultrakapasitör gurup kontrolünü, şarj ve deşarj edilmesini, her iki yönde de enerji aktarımı sağlayabilen çift yönlü DA/DA dönüştürücü kullanılmaktadır. Batarya ve

ultrakapasitör gurubunun gerilim seviyesini 24 V'ye yükseltmeyi yani DA baraya enerji aktarım işlemini, çift yönlü DA/DA dönüştürücü birimi üstlenmektedir. Bu durumda Şekil 14 (b)'deki gibi S_{B5} anahtarı pasif durumda S_{B6} anahtarına DGM sinyali uygulanmaktadır. Aynı şekilde, açık deniz rüzgâr ve yüzeysel akıntı enerjisinden üretilen fazla enerji ile batarya ve ultrakapasitör guruplarının şarj olmasını sağlamaktadır, yani 24 V'yi 12 V'ye düşürmektedir. Bu durumda ise Şekil 4.14 (c)'deki gibi S_{B6} anahtarı pasif durumda S_{B5} anahtarına DGM sinyali uygulanmaktadır. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısında bobin, iki adet yarı iletken anahtarlama elemanı ve kondansatör kullanılmaktadır. Tasarlanan çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısında bulunan C_{B14} , C_{B04} kondansatörleri giriş ve çıkıştaki gerilim dalgalanmalarını engellemek amacıyla kullanılmıştır. DA/DA yükseltici dönüştürücüde hesaplanan kondansatör değerleri bu dönüştürücü tipinde de aynı şekilde kullanılmaktadır [88]. Çift yönlü DA/DA dönüştürücüde kullanılacak kondansatör değeri 750 μ F'dir. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü tasarımı için gerekli olan bobinin hesabı Eşitlik 4.9'da verilmektedir.

$$L_{B4}f_p = \frac{2V_{BAT\&UK}^2}{P_{BD}} \quad (4.9)$$

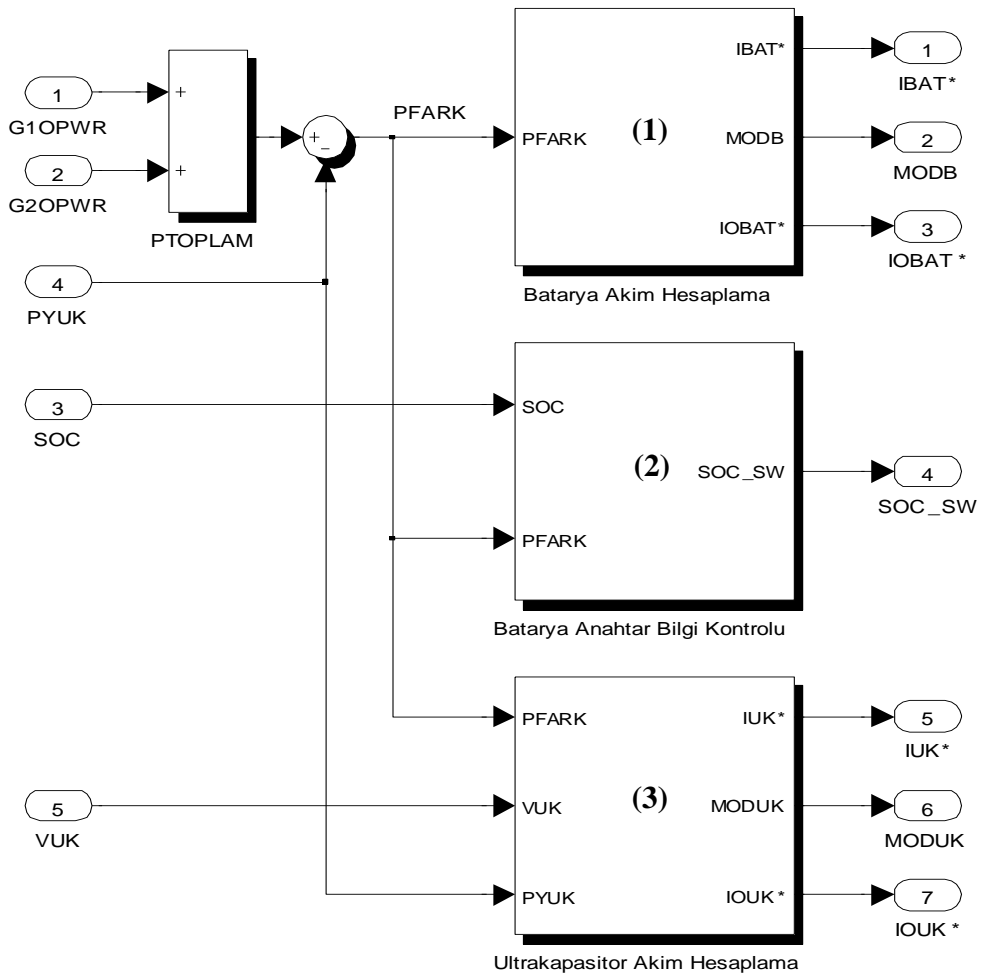
Buradaki; L_{B4} çift yönlü DA/DA dönüştürücü bobini, f_p anahtarlama frekansı, $V_{BAT\&UK}$ çift yönlü DA/DA dönüştürücü giriş gerilimi, V_{DA} çift yönlü DA/DA dönüştürücü çıkış gerilimi, P_{BD} çift yönlü DA/DA dönüştürücü çıkış gücüdür. Batarya ve ultrakapasitör gurubunda kullanılan çift yönlü DA/DA dönüştürücü parametreleri Çizelge 4. 3'de verilmektedir.

Çizelge 4.3. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü parametreleri.

Parametreler	Değeri
$V_{BAT\&UK}$	10-20 V
V_{DA}	24 V
P_{BD}	30 W
f_p	10 kHz
L_{B4}	>90 μ H
C_1	750 μ F
C_2	750 μ F

4.5. AKILLI ENERJİ YÖNETİM ALGORİTMASI

Bu tez çalışmasında HGÜS ve HEDS'in en önemli kontrol birimi olan akıllı enerji yönetim algoritması simulink blok diyagramı Şekil 4.15'de verilmektedir. HGÜS ve HEDS birçok olası çalışma durumu bulunmaktadır. Sistemdeki bütün olası çalışma şartları HGÜS ve HEDS'de bulunan kaynak ve yüklerin güç ve akım parametrelerini belirlemektedir. Sistemdeki olası çalışma şartları ele alındığında Çizelge 4.4'deki gibi toplamda dokuz adet durum ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.15. Akıllı enerji yönetim algoritması simulink blok diyagramı.

Akıllı enerji yönetim algoritması Çizelge 4.4'de belirlenen olası çalışma durumlarına göre karar vererek sistemdeki güç akışlarını kontrol etmekte ve her durumu şartlandırarak çalışmaktadır. Açık deniz rüzgâr ve yüzeysel akıntı enerjisinden üretilen enerjiyi sistemde doğadan alınan toplam enerji olarak tanımlanmakta ve bu

enerjiye P_{TOP} olarak isimlendirilmekte ve Eşitlik 4.10'da verilmektedir. HGÜS ve HEDS'nin birincil olarak yapması gereken görev yük talebini sürekli olarak sağlamaktır. Daha sonra üretilen ve talep enerji arasındaki farka bakılarak batarya ve ultrakapasitör gurubunu şarjlı tutmaktır. Böylelikle herhangi bir anda yük talebine sistem hazır hale gelmektedir.

$$P_{TOP} = P_{G1OPWR} + P_{G2OPWR} \quad (4.10)$$

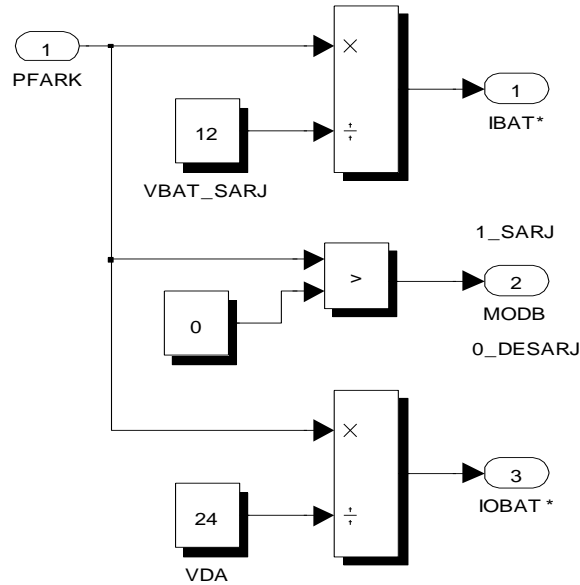
Çizelge 4.4. HGÜS ve HEDS olası çalışma durumları.

Durumlar	$P_{TOP}/P_{YÜK}$ karşılaştırması	Batarya doluluk durumu (SOC)	Ultrakapasitör doluluk durumu (V_{UK})
Durum 1	$P_{TOP} \approx P_{YÜK}$	Düşük	Düşük
Durum 2	$P_{TOP} \approx P_{YÜK}$	Yüksek	Yüksek
Durum 3	$P_{TOP} > P_{YÜK}$	Düşük	Düşük
Durum 4	$P_{TOP} > P_{YÜK}$	Yüksek	Yüksek
Durum 5	$P_{TOP} < P_{YÜK}$	Düşük	Düşük
Durum 6	$P_{TOP} < P_{YÜK}$	Yüksek	Yüksek
Durum 7	$P_{TOP} = 0$	Düşük	Düşük
Durum 8	$P_{TOP} = 0$	Yüksek	Yüksek
Durum 9	$P_{YÜK} = 0$	Düşük	Düşük

Akıllı enerji yönetim algoritması sadece güç değerlerine bakarak birimlerin akım miktarlarını hesaplamakla birlikte aynı zamanda sistemde bulunan bütün dönüştürücü birimlerinin de kontrolünü sağlamaktadır. Simülasyon diyagramları olarak ayrı ayrı gösterilmesine rağmen DA bara gerilim kontrollerini, batarya ve ultrakapasitör gurubunun şarj/deşarj anahtarlama işlemlerini gerçekleştirmektedir.

Akıllı enerji yönetim algoritması, sistemde sürekli olarak tarama çevrimi yaparak (simülasyon çalışmasında tarama çevrimi 1 μ s olarak seçilmiştir) HGÜS üretilen güç değerine ve yük talep gücüne bakarak sistemin kararlı olarak çalışmasını amaçlamaktadır. HEDS ile enerji depolama süreci gerçekleştirerek, HGÜS'deki birimlerin günün belli periyotlarında enerji üretilmediğinde depolama birimleri ile yükün güç ihtiyacını sağlamaktadır. Böylece yenilenebilir enerji kaynaklarının en büyük sorunu olan kesintili ve kararsız enerji üretimi HEDS ile ortadan kaldırılmaktadır.

Şekil 4.16’da akıllı enerji yönetim algoritma bloğunun (1) numaralı blokta bulunan batarya gurubunun akım hesaplama kontrol blok diyagramı verilmektedir. Batarya gurubunun kontrolü için HGÜS’de üretilen güç ile yük talep gücü arasındaki farka (P_{FARK}) bakarak batarya gurubunun şarj veya deşarj olmasına karar vermektedir. P_{FARK} gücü Eşitlik 4.11’deki şekilde hesaplanmaktadır. Bu bilgi MODB sinyali ile batarya gurubunu kontrol eden çift yönlü DA/DA dönüştürücü kontrol ünitesine gönderilmektedir. P_{FARK} gücü sıfırdan büyükse ($P_{FARK}>0$) yani yük talebi karşılandıktan sonra fazla enerji varsa bu enerji batarya ve ultrakapasitör gurubunun şarj olması için kullanılacağı anlamına gelmektedir ve MODB bilgi sinyali ile 1 değeri üretilmektedir. Elde edilen fark gücü sıfırdan küçük ($P_{FARK}<0$) ise batarya gurubunu deşarj moduna alacak şekilde MODB sinyaline 0 bilgisini vermektedir. Batarya gurubunun şarj olması bilgisinden sonra şarj olması gereken referans akım değeri (I_{BAT}^*) Eşitlik 4.12’deki gibi hesaplanmaktadır. Batarya gurubunun deşarj olması bilgisi geldiğinde ise yük talebinin ihtiyacı olan gücü Eşitlik 4.13’te hesaplayarak deşarj akım referansını (I_{OBAT}^*) kontrol birimine göndermektedir.



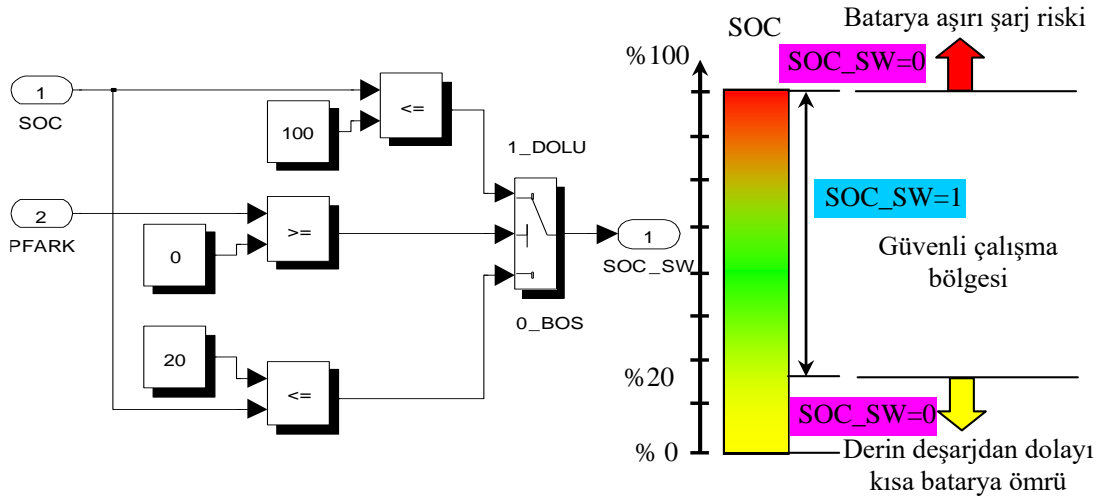
Şekil 4.16. Batarya gurubunun akım hesaplama kontrol blok diyagramı.

$$P_{FARK} = P_{TOP} - P_{YÜK} \quad (4.11)$$

$$I_{BAT}^* = \frac{P_{FARK}}{V_{BAT_SARJ}} \quad (4.12)$$

$$I_{OBAT}^* = \frac{P_{FARK}}{V_{DA}} \quad (4.13)$$

Şekil 4.17’de akıllı enerji yönetim algoritma bloğunun (2) numaralı blokta bulunan batarya gurubunun anahtar bilgisi kontrol blok diyagramı verilmektedir. Bu kontrol bloğu batarya gurubunun doluluk durumunu denetleyerek aşırı şarj/deşarj olmasının önüne geçmektedir. Böylelikle batarya gurubunun sağlıklı sınır koşullarında çalıştırılarak çevrim ömrünün uzatılmasını hedeflenmektedir. Akıllı enerji yönetim algoritması batarya doluluk durumu (State of Charge (SOC)) % 20’nin altına düştüğünde çift yönlü DA/DA dönüştürücü anahtarlarına sıfır bilgisi göndererek devreden çıkartmaktadır. Aynı şekilde şarj sırasında batarya terminal gerilimi doluluk durumuna ulaştığında yani SOC değeri % 100 olduğunda yine batarya gurubunu devre dışı bırakarak aşırı şarj olmasının önüne geçmektedir. Batarya gurubunun çift yönlü DA/DA dönüştürücü devresine SOC_SW bilgisi aracılığıyla bilgi vermektedir. Şekil 4.17’deki grafikteki gösterim gibi SOC_SW bilgisi batarya gurubunun doluluk oranı % 20 ve % 100 aralığında olduğu zaman 1, diğer durumlarda 0 olmaktadır.



Şekil 4.17. Batarya gurubunun SOC durum anahtar bilgisi.

Şekil 4.18’de akıllı enerji yönetim algoritma bloğunun (3) numaralı blokta bulunan ultrakapasitör gurubunun akım hesaplama ve mod durum bilgisini belirleyen kontrol blok diyagramı verilmektedir. Bu kontrol bloğunda ultrakapasitör gurubunun

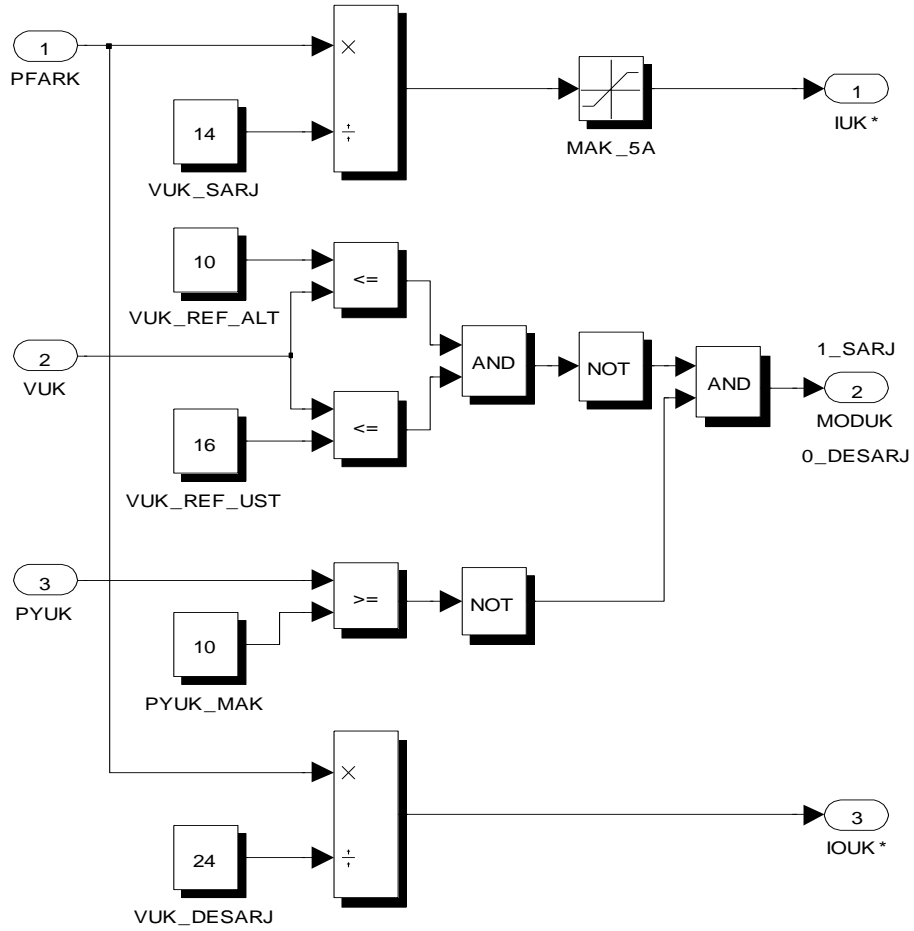
şarj/deşarj olmasına karar veren ünite bulunmaktadır. Bu bilgi ultrakapasitör gerilimi olan V_{UK} değerine ve yükün talep ettiği güç miktarına göre karar verilmektedir. Ultrakapasitör gurubu anlık yüksek güçlere cevap verdiği için sürekli olarak dolu olması gerekmektedir. HGÜS ve HEDS’de bu maksimum güç değeri 10 W olarak belirlenmiştir. Bu güç değeri ve üzerinde bir talep olduğu zaman ultrakapasitör gurubunun bulunduğu çift yönlü DA/DA dönüştürücü devresine MODUK bilgisinden 0 değeri gönderilerekdeşarj moduna geçmesi sağlanmaktadır. Böylece sistemde bulunan DA bara geriliminde bir düşüş ve dalgalanma olmadan anlık güç talebi karşılanmaktadır.

Ultrakapasitör gurubu şarj modunda 10 V ile 16 V arasında bir bantta sürekli olarak şarjda olması sağlanmaktadır. Bu bant geriliminin nedeni sistemde eğer uzun süre boyunca ani güç ihtiyacı olamadığında ultrakapasitör gurubu yapısal özelliğinden dolayı kendi kendinedeşarj (self-discharge) olmaktadır. Budeşarj frekansı çok kısa süreli olmakla birlikte ultrakapasitör gurubunu dolu tutarak ani yük talebine hazırlıklı olması sağlanmaktadır.

Ultrakapasitör gurubunun karakteristiğinden dolayı ilk şarj sırasında boş bir kondansatör gibi davranarak DA baradan çok yüksek şarj akımları çekeceğinden dalgalanma ve çökmeye neden olabilir. Bu yüzden özellikle ilk şarj sırasındaki şarj akımı 5 A olarak sınırlandırılmıştır. Ultrakapasitör gurubunun şarj akım referansı I_{UK}^* Eşitlik 4.14’de hesaplanmakta ve MODUK bilgisinden 1 değeri gönderilmektedir. Ani aşırı yük talebi olduğunda ultrakapasitör gurubudeşarj moduna geçerek Eşitlik 4.15 ile hesaplanan I_{OUK}^* referansdeşarj akım değeri üretilmektedir.

$$I_{UK}^* = \frac{P_{FARK}}{V_{UK_SARJ}} \quad (4.14)$$

$$I_{OUK}^* = \frac{P_{FARK}}{V_{UK_DESARJ}} \quad (4.15)$$



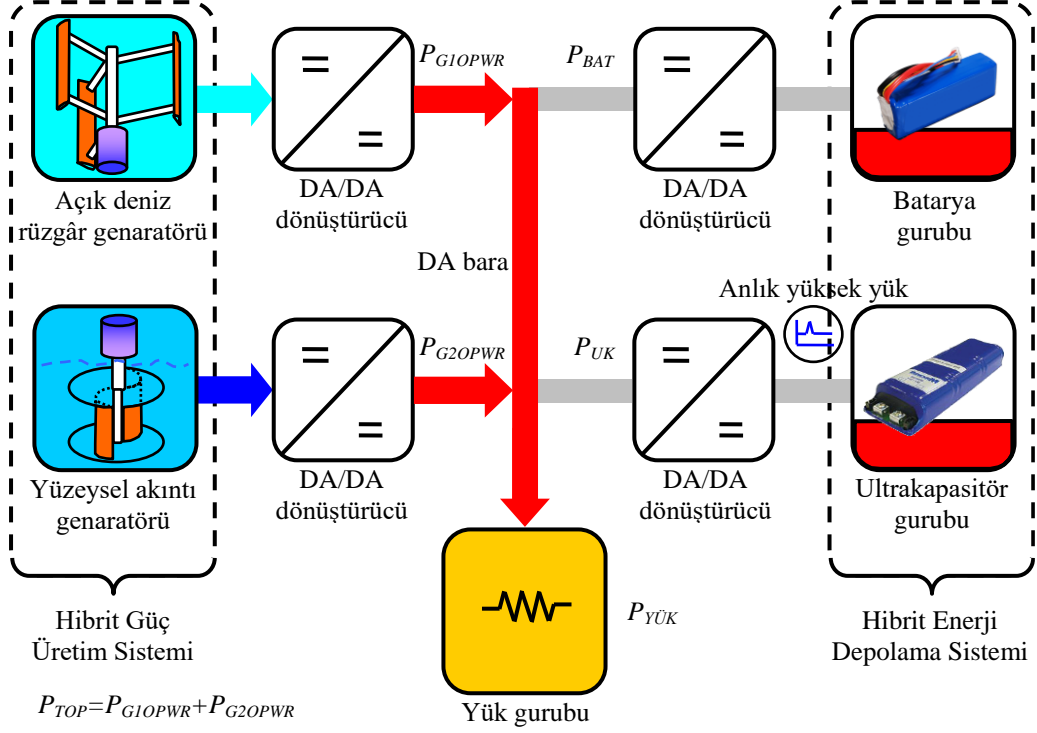
Şekil 4.18. Ultrakapasitör gurubunun akım hesaplama blok diyagramı.

4.6. HİBRİT SİSTEMİN SİMÜLASYON SONUÇLARI

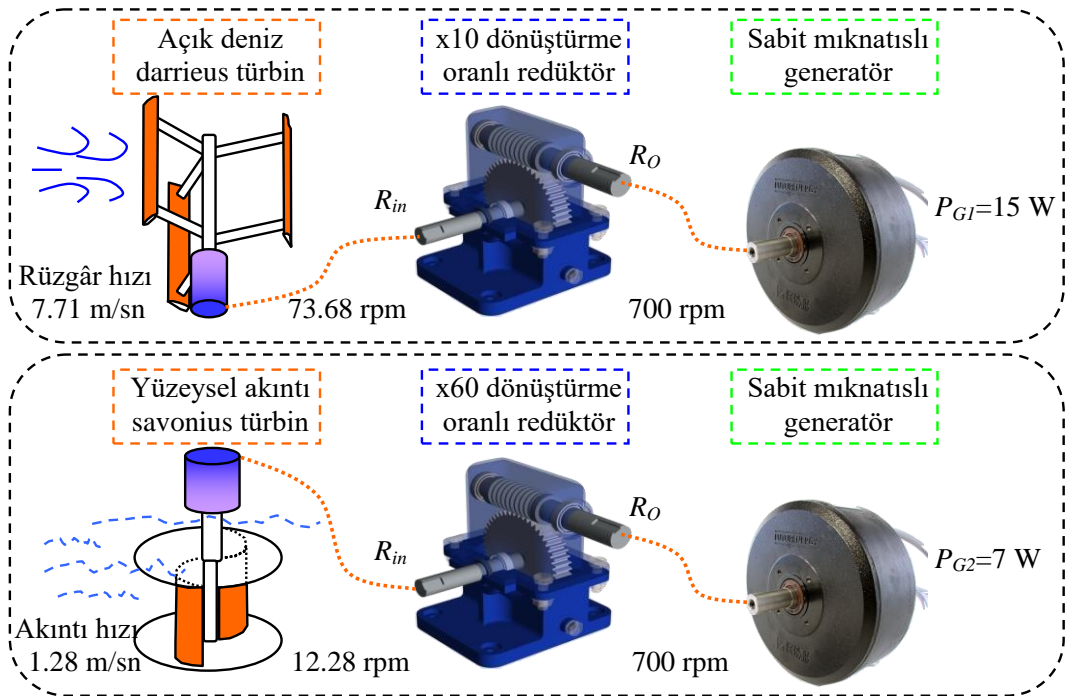
4.6.1. Durum 1 için Simülasyon Sonuçları

Durum 1’de $P_{TOP} \approx P_{YÜK}$ olduğunda, P_{BAT} ve P_{UK} doluluk durumu düşük olduğundaki durum incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 4.19’da verilmektedir. Bu durumda açık deniz rüzgâr ve yüzeysel akıntı enerjisinden üretilen toplam güç miktarı P_{TOP} yükün talep etmiş olduğu güce $P_{YÜK}$ yaklaşık olarak eşittir. Batarya ve ultrakapasitör gurubuna ihtiyaç olmadığı bu durumda devre dışı olan HEDS akıllı enerji yönetim algoritmasına bağlı olarak ihtiyaç olduğu anda devreye girecektir. Durum 1’de HEDS için doluluk durumlarının düşük olduğu seviye incelenmiştir. Simülasyon çalışmalarında güç anahtarlarının üzerindeki ve devre elemanlarının kayıpları olabildiğince düşük tutulmuştur. Böylece sistemin özellikle akıllı enerji

yönetim algoritmasının dinamik davranışlara verdiği tepkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir.



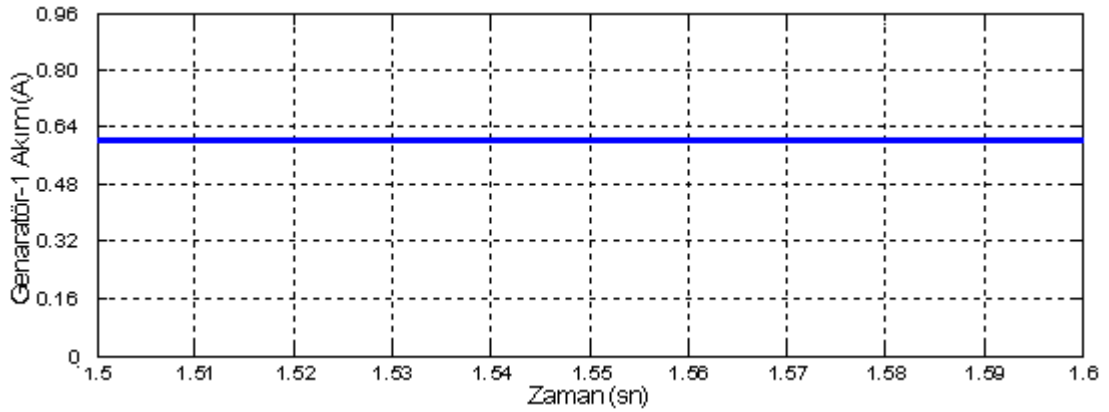
Şekil 4.19. Durum 1 için güç akış diyagramı.



Şekil 4.20. Durum 1 için HGÜS simülasyon parametre değerleri.

Durum 1’de açık deniz rüzgâr hızı 7 m/sn olduğu durumdaki redüktör giriş ve çıkış sonucu genaratörden elde edilen güç değeri P_{G1} 15 W’tır. Aynı şekilde yüzeysel akıntıda 1.17 m/sn olduğu durumda redüktör giriş ve çıkış sonucu diğer genaratörden elde edilen güç değeri P_{G2} 7 W’tır. Durum 1 $P_{TOP} \approx P_{YÜK}$ olduğundaki HGÜS simülasyon parametre değerleri ayrıntılı olarak Şekil 4.20’de verilmektedir. HGÜS ve HEDS Matlab/Simulink çalışmasında her bir birim ayrıntılı olarak benzetimi yapıldığından toplam simülasyon süresi 2 sn olarak seçilmiştir.

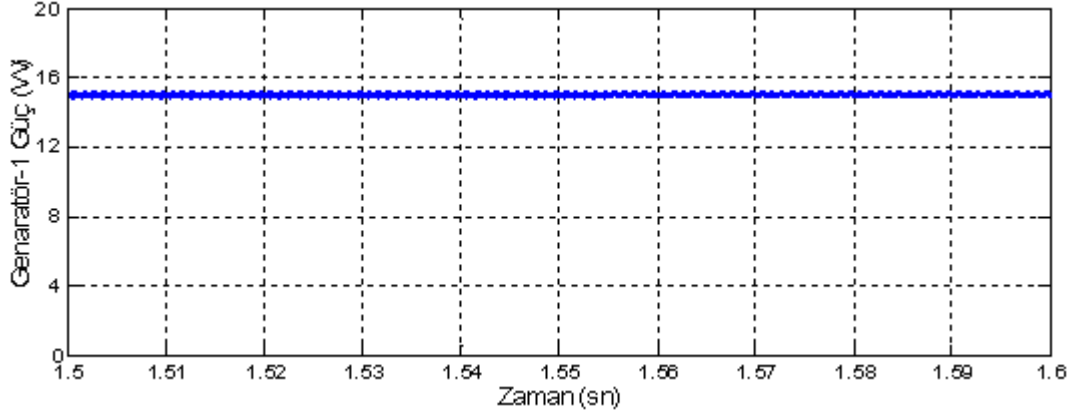
Şekil 4.21’de Durum 1 için açık deniz rüzgâr genaratöründen üretilen enerjinin DA/DA yükseltici devre çıkış akımındaki değeri 0.6 A olarak üretimi verilmektedir. HGÜS ve HEDS’de bulunan DA bara gerilimi 24 V olacak şekilde kontrolü yapılmaktadır. Bütün olası çalışma durumlarında DA bara gerilim değeri sabit bir şekilde tutulmaktadır. Şekil 4.25’de DA bara gerilim değeri 24 V çalışma durumu verilmektedir. DA bara gerilimi bütün DA/DA dönüştürücü çıkışlarında aynı olduğundan sadece Durum 1’de verilmektedir. Bunun sonucu olarak açık deniz rüzgâr genaratöründen üretilen gücün toplam miktarı 15 W olduğu Şekil 4.22’de verilmektedir.



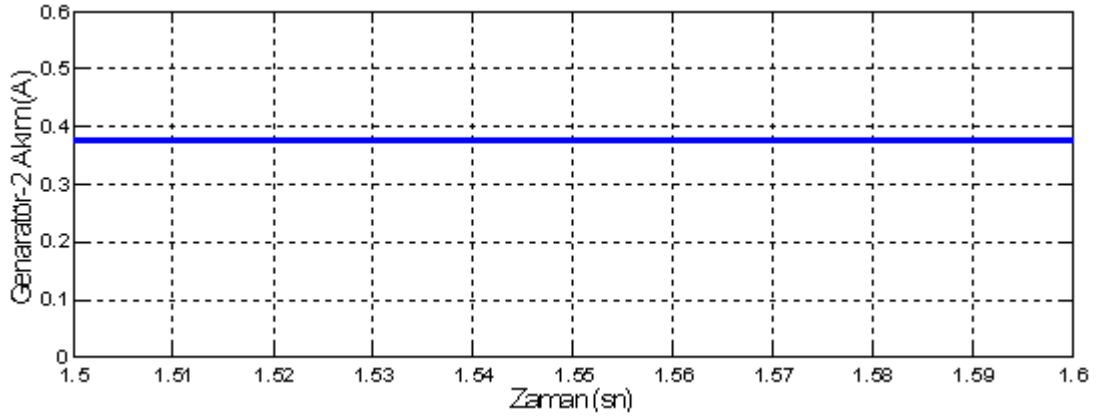
Şekil 4.21. Durum 1 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış akımı.

Şekil 4.23’de verilen Durum 1 için yüzeysel akıntı genaratöründen üretilen enerjinin DA/DA yükseltici devre çıkış akımındaki değeri 0.38 A’dır. Şekil 4.24’de yüzeysel akıntı genaratöründen üretilen gücün toplam miktarı 7 W simülasyon sonucu verilmektedir. Şekil 4.26’da verilen Durum 1 için batarya gurubu devrede olmadığı için akım değeri 0 A’dır. Bu durumda batarya gurubunun doluluk durumu düşüktür

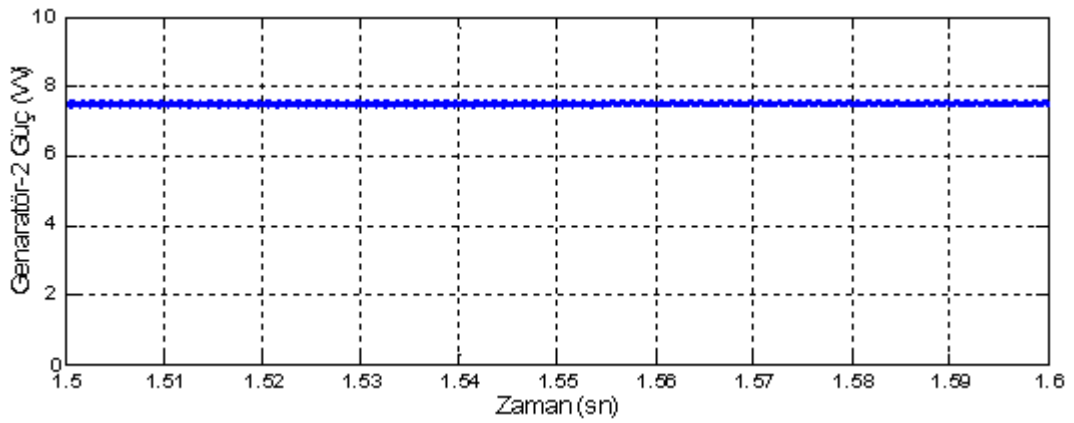
ve bu doluluk durumu SOC % 25 olarak Şekil 4.27’de görülmektedir. Şekil 4.28’de HGÜS ve HEDS bağlı bulunan yük gurubu tarafından çekilen akım değeri ayrıntılı olarak verilmektedir.



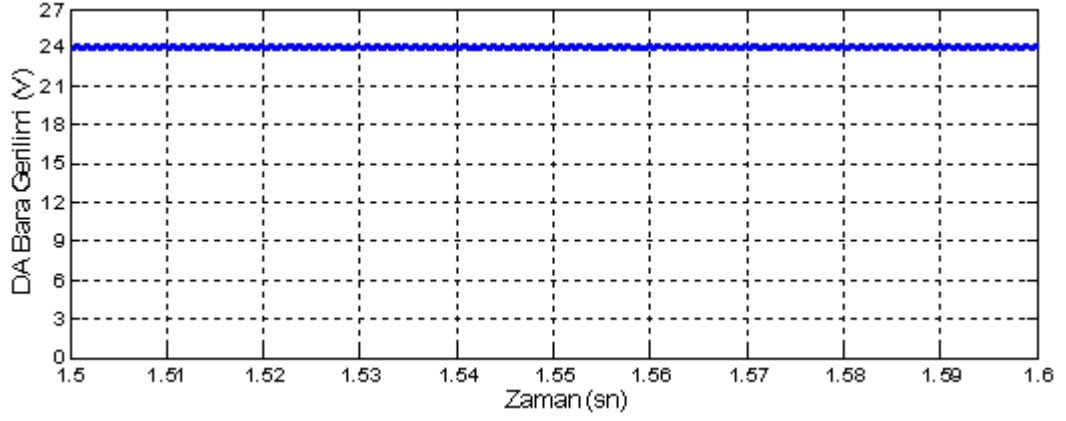
Şekil 4.22. Durum 1 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış gücü.



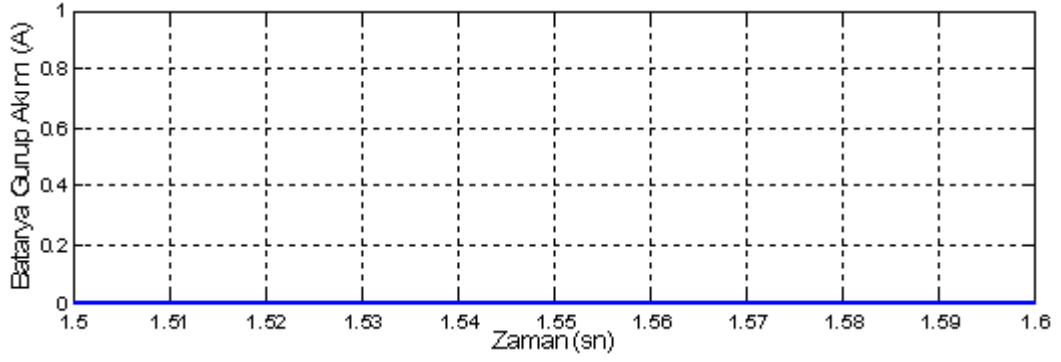
Şekil 4.23. Durum 1 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış akımı.



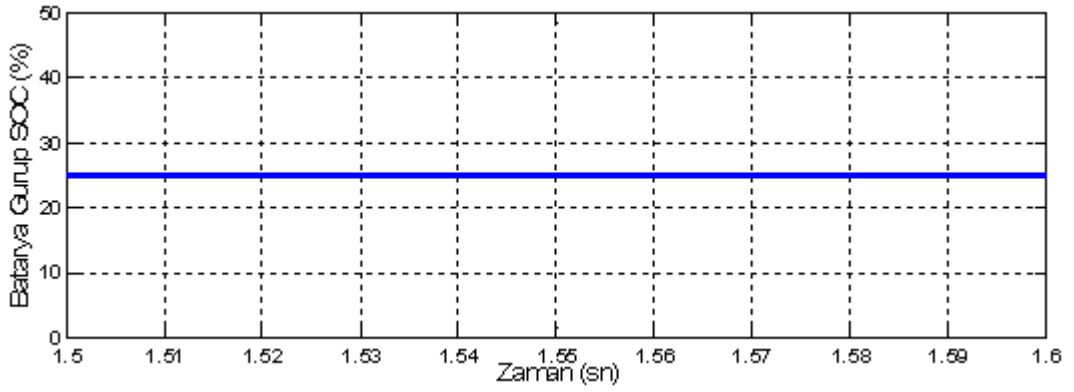
Şekil 4.24. Durum 1 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış gücü.



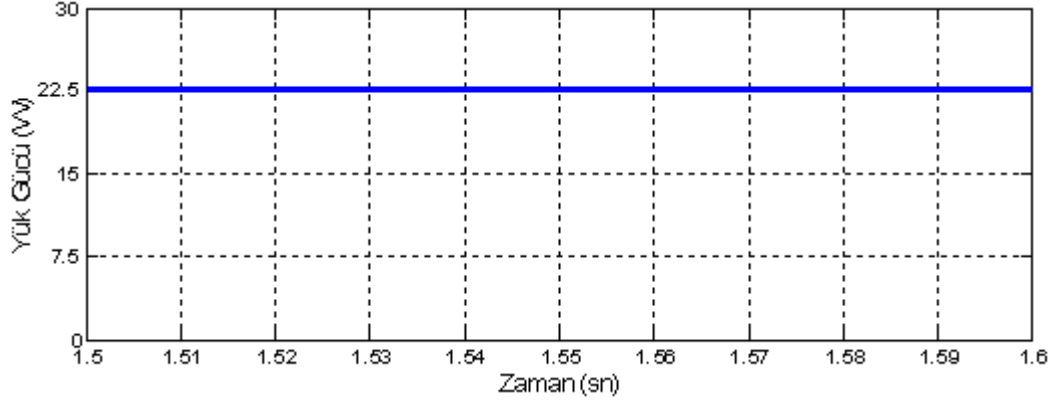
Şekil 4.25. Durum 1 için DA bara gerilimi.



Şekil 4.26. Durum 1 için batarya gurubu giriş akımı.



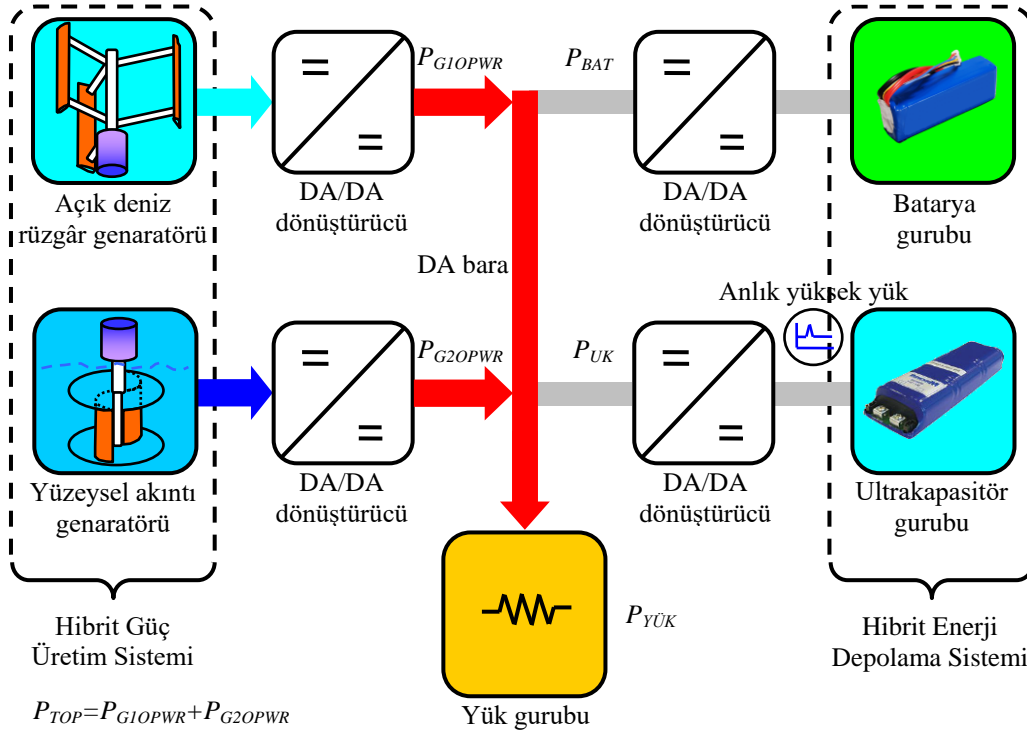
Şekil 4.27. Durum 1 için batarya gurubu SOC doluluk durumu.



Şekil 4.28. Durum 1 için yük gücü.

4.6.2. Durum 2 için Simülasyon Sonuçları

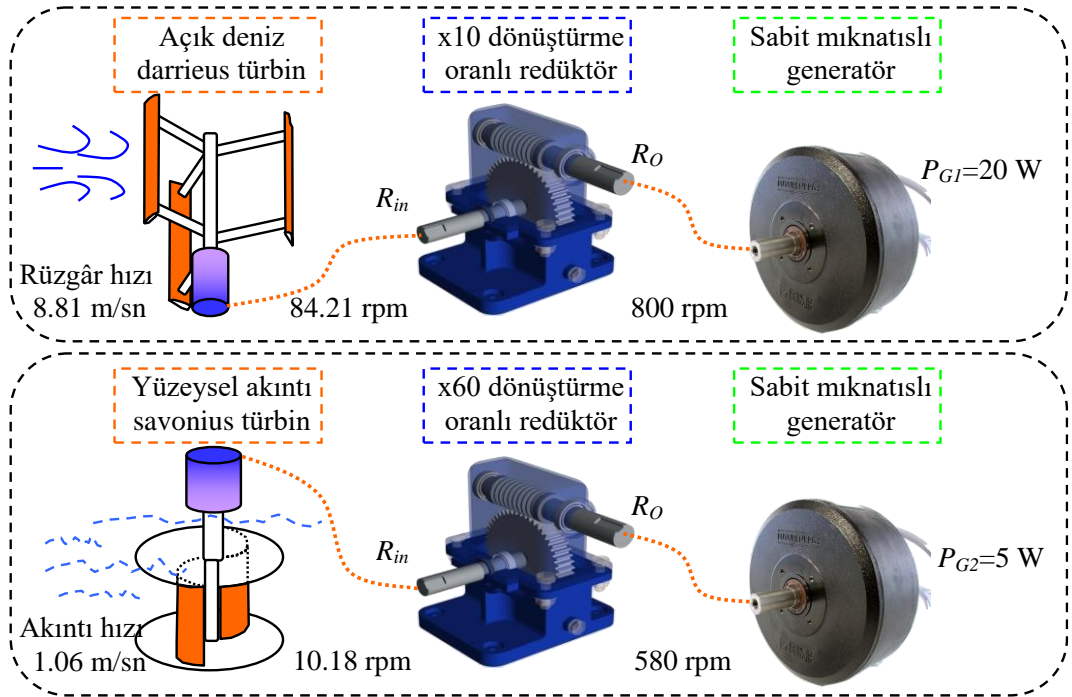
Durum 2’de $P_{TOP} \approx P_{YÜK}$ olduğunda; P_{BAT} ve P_{UK} doluluk durumlarının yüksek olduğu olası çalışma koşulu incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 4.29’da verilmektedir. Bu durum bir önceki Durum 1’den farklı olarak batarya ve ultrakapasitör gurubunun doluluk durumlarının yüksek olması halidir.



Şekil 4.29. Durum 2 için güç akış diyagramı.

Açık deniz rüzgâr ve yüzeysel akıntı genaratörlerinden üretilen toplam güç 25 W'tır ve bu güç değeri yük gurubunun talep ettiği değere yaklaşık olarak eşittir. Durum 2'de batarya ve ultrakapasitör gurubunun doluluk durumu yüksek olduğu için anlık yüksek güç talebinde akıllı enerji yönetim algoritması hızlı bir şekilde ultrakapasitör gurubunu devreye alarak DA baradaki gerilim dalgalanmalarının önüne geçecektir.

Şekil 4.30'de HGÜS'ün güç üretim parametreleri ayrıntılı olarak verilmektedir. Durum 2'de açık deniz darrieus türbini 8.81 m/sn hızla esen bir rüzgârda dönerek redüktör ile hızı artırılarak genaratöre aktarılmakta ve genaratör çıkışından 20 W elektriksel güç üretilmektedir. Yüzeysel akıntı savonius türbini 1.06 m/sn hızla dönerek redüktörle aktarılan güç ile genaratörden 5 W elektrik enerjisi elde edilmektedir.

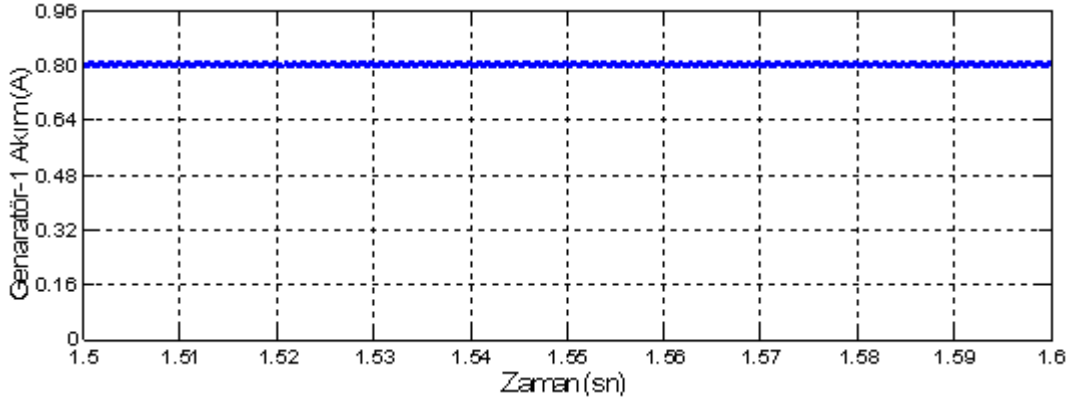


Şekil 4.30. Durum 2 için HGÜS simülasyon parametre değerleri.

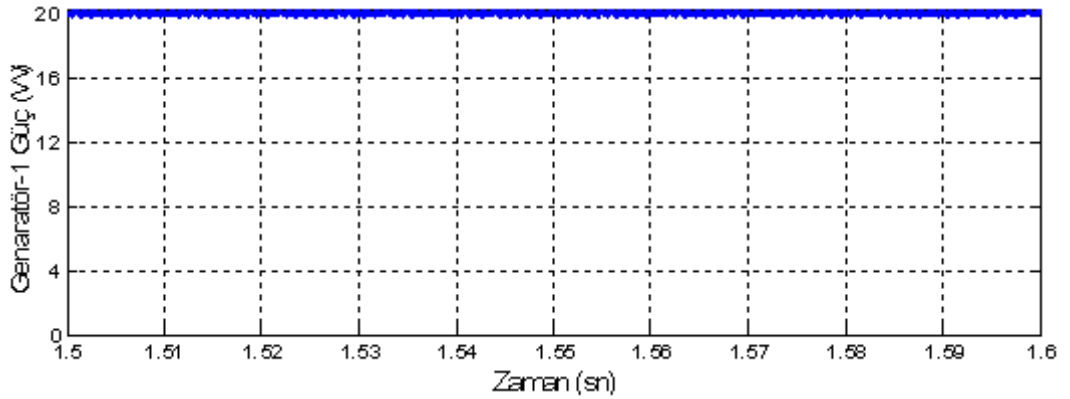
Şekil 4.31'de Durum 2 için açık deniz rüzgâr genaratörüne bağlı bulunan DA/DA yükseltici devresinin çıkış akımı verilmektedir. Genaratör tarafından üretilen güç değeri ise maksimum seviyededir. Bu güç değeri 20 W'tır ve Şekil 4.32'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Şekil 4.33'de Durum 2 için yüzeysel akıntı genaratörü çıkışındaki DA/DA yükseltici dönüştürücüsü tarafından üretilen akım değeri

verilmektedir. HGÜS ve HEDS DA bara gerilimi 24 V olduğundan bu genaratörden üretilen güç değeri 5 W civarındadır ve Şekil 4.34'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Durum 2'de batarya gurubunun doluluk durumu % 80 seviyesindedir ve Şekil 4.35'de verilmektedir.

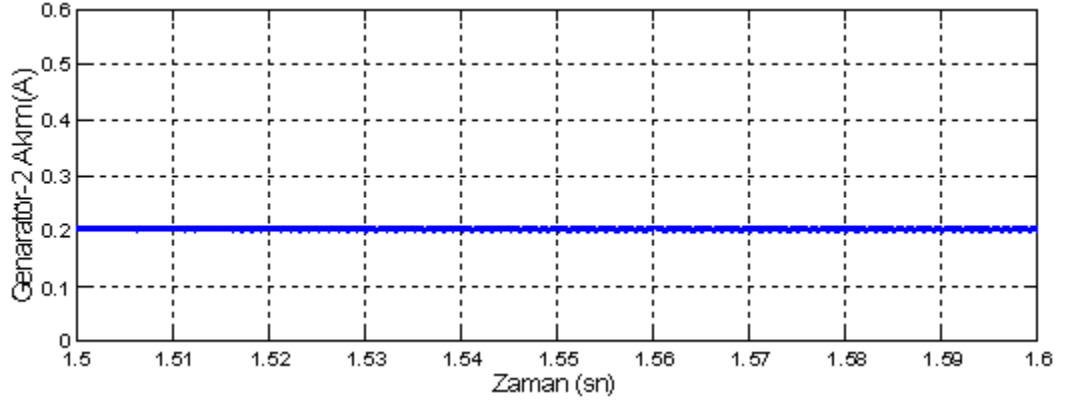
Ultrakapasitör gurubunun doluluk durumu da yüksektir ve akıllı enerji yönetim algoritmasıyla bu gerilim değeri yaklaşık olarak 14 V civarında tutulmaktadır. Ultrakapasitör gurubunun terminal uçlarındaki gerilimi Şekil 4.36'da verilmektedir. Durum 2'de HGÜS tarafından üretilen güç değeriyle yükün talep ettiği güç değeri yaklaşık olarak eşittir. Yük gurubunun çektiği güç değeri Şekil 4.37'de 25 W olarak verilmektedir.



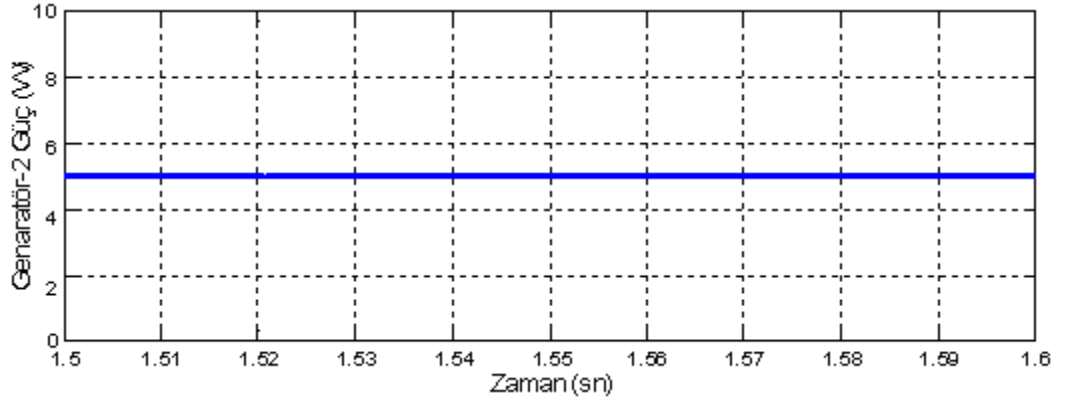
Şekil 4.31. Durum 2 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış akımı.



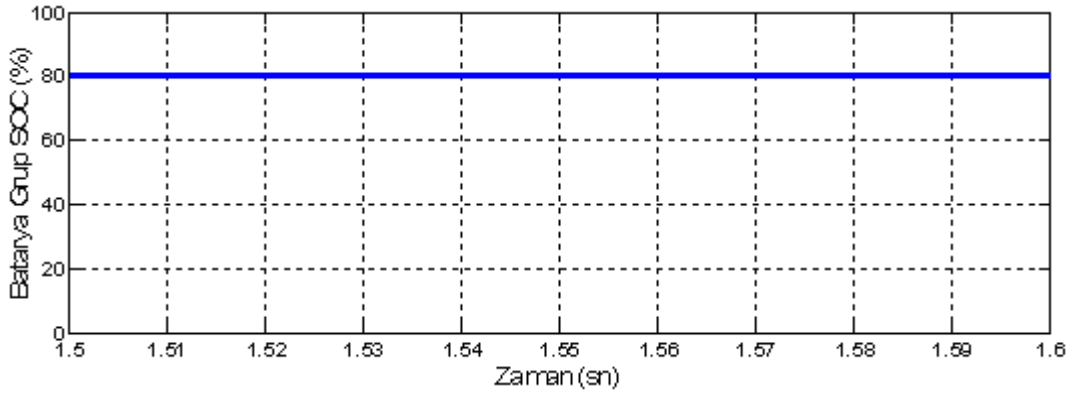
Şekil 4.32. Durum 2 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış gücü.



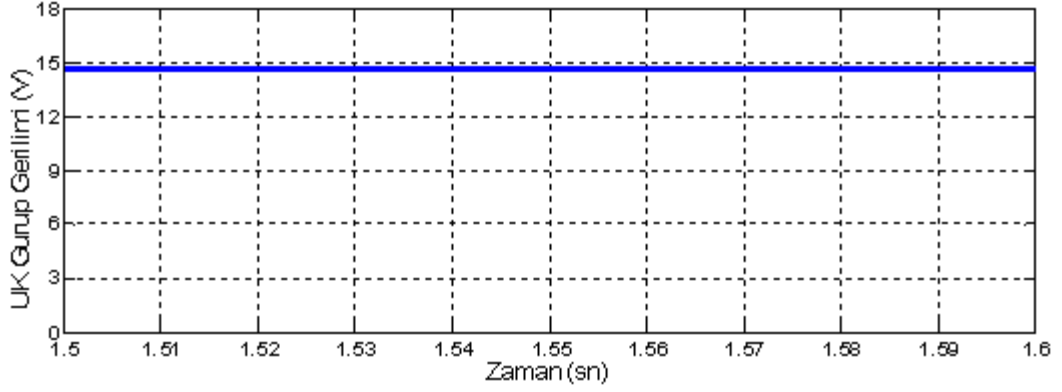
Şekil 4.33. Durum 2 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış akımı.



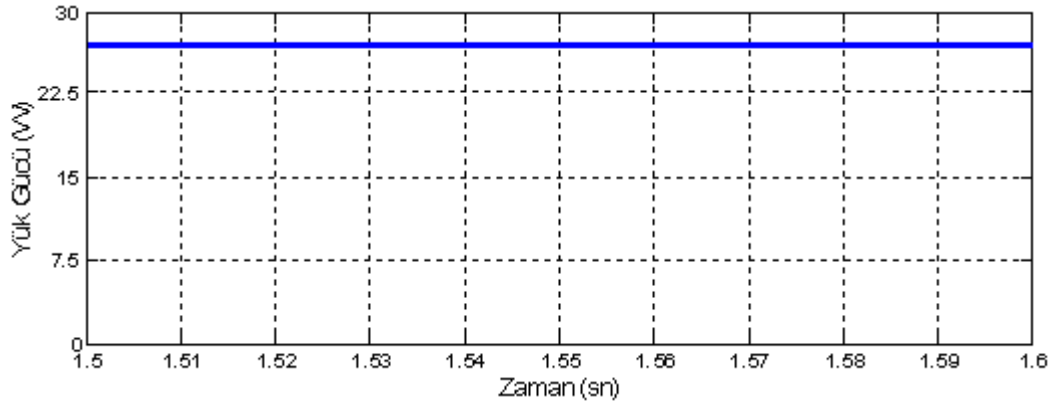
Şekil 4.34. Durum 2 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış gücü.



Şekil 4.35. Durum 2 için batarya gurubu SOC doluluk durumu.



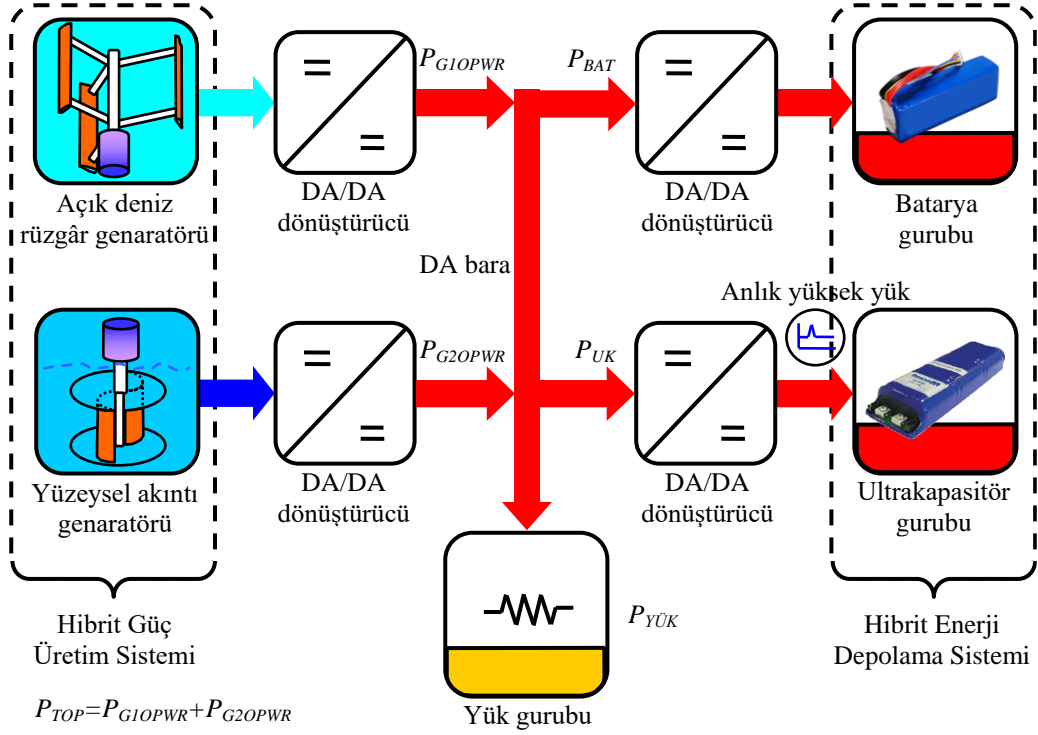
Şekil 4.36. Durum 2 için ultrakapasitör grup terminal gerilimi.



Şekil 4.37. Durum 2 için yük gücü.

4.6.3. Durum 3 için Simülasyon Sonuçları

Durum 3’de $P_{TOP} > P_{YÜK}$ olduğunda; P_{BAT} ve P_{UK} batarya ve ultrakapasitör gurubunun doluluk durumunun düşük olduğu durum incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 4.38’de verilmektedir. Bu durumda HGÜS’den üretilen güç değerini yük gurubunun talep ettiği güç değerinden yüksek olduğu olası çalışma koşul sonuçları incelenmektedir. HGÜS üretilen güç P_{TOP} yüksek, batarya ve ultrakapasitör gurubunun da doluluk seviyeleri düşük olduğundan HEDS akıllı enerji yönetim algoritması tarafından şarj edilmektedir. Akıllı enerji yönetim algoritması fazla olan fark gücü hesaplayarak batarya ve ultrakapasitörün şarj olması gereken akım değerlerini vermektedir. Böylece sistem hızlı bir şekilde dinamik davranışları değerlendirerek HGÜS ve HEDS’in kararlı çalışmasını sağlamaktadır.



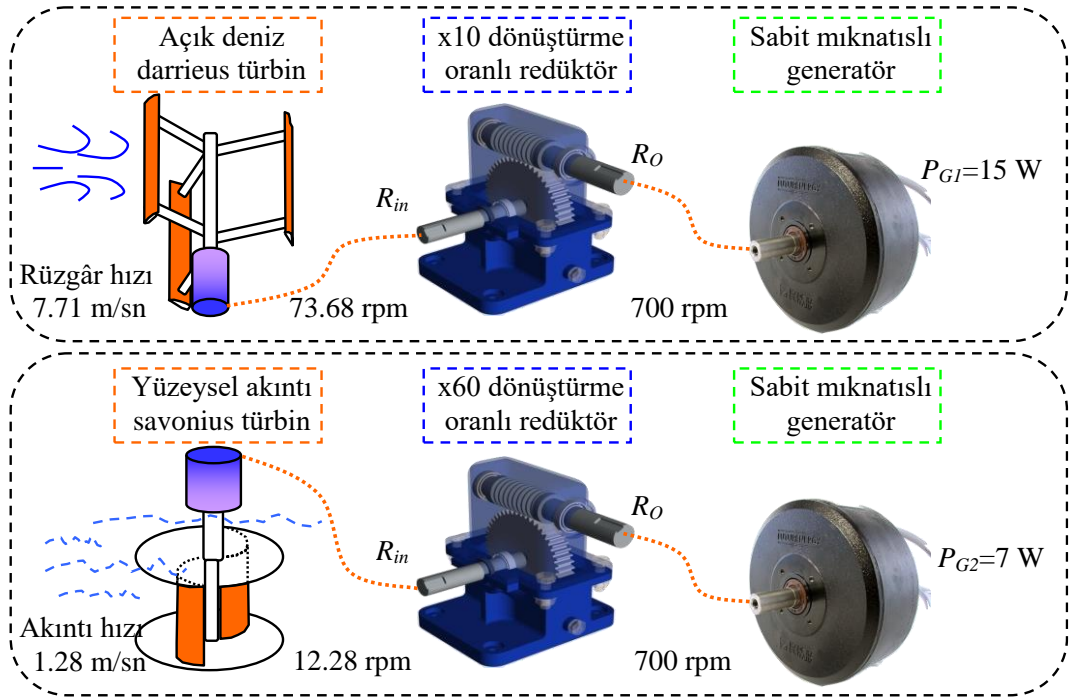
Şekil 4.38. Durum 3 için güç akış diyagramı.

Şekil 44’de açık deniz rüzgâr ve yüzeysel akıntı sistemlerinin simülasyon parametre değerleri verilmektedir. Açık deniz darrieus türbinine gelen 7.71 m/sn’lik rüzgâr hızı redüktör aracılığıyla generatöre aktarılmakta ve generatör tarafından 15 W elektriksel güç elde edilmektedir. Yüzeysel akıntı savonius türbinine gelen 1.28 m/sn’lik akıntı hızı redüktör ile dönüştürme oranı yükseltilip generatörlere aktarılarak 7 W elektriksel güç değeri üretilmektedir.

Şekil 4.40’da açık deniz rüzgâr generatör devresi çıkış akımı verilmektedir. HGÜS ve HEDS DA bara gerilimi 24 V olmakla birlikte bu generatörden elde edilen güç değeri 15 W olarak Şekil 4.41’de gösterilmektedir. Şekil 4.42’de yüzeysel akıntı generatör devresi çıkış akımı ve Şekil 4.43’de bu generatör tarafından üretilen 7 W güç değeri verilmektedir. HGÜS tarafından üretilen toplam güç 22 W olmaktadır.

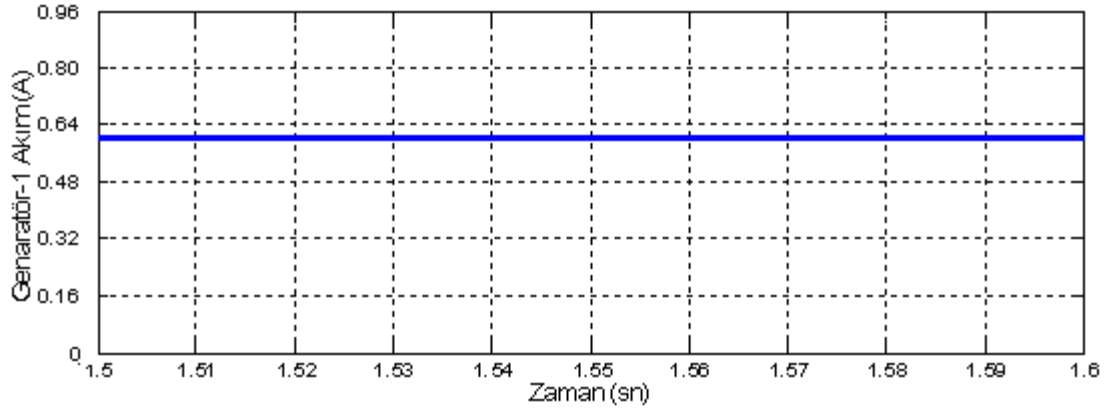
Durum 2’de üretilen güç değeri yük talep gücünden fazla olduğundan yük ile P_{TOP} arasındaki güç farkı P_{FARK} 17 W olarak akıllı enerji yönetim algoritması tarafından hesaplanmaktadır. Bu P_{FARK} güç değeri batarya ve ultrakapasitör gurubunun şarj olması için kullanılmaktadır. Ultrakapasitör gurubu tamamen boş olduğu durum

incelenmiştir. Akıllı enerji yönetim algoritması bölümünde bahsedildiği gibi boş bir ultrakapasitör gurubunun ilk andaki şarj akımı çok yüksek olduğundan, denetleyici tarafından DA bara gerilim dalgalanmasının önüne geçmek için 5 A ile sınırlandırılmıştır. Ultrakapasitör gurubunun şarj akımı Şekil 4.44’de verilmekte ve grafikte hızlı bir şekilde şarj olduğu gösterilmektedir. Aynı şekilde ultrakapasitör gurubunun terminal uçlarındaki gerilimi de hızlı bir şekilde arttığı Şekil 4.45’de verilmektedir.

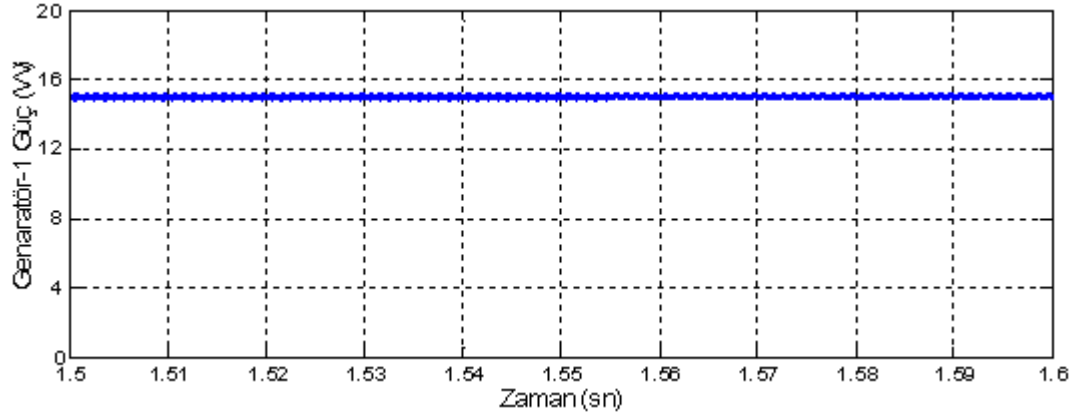


Şekil 4.39. Durum 3 için HGÜS simülasyon parametre değerleri.

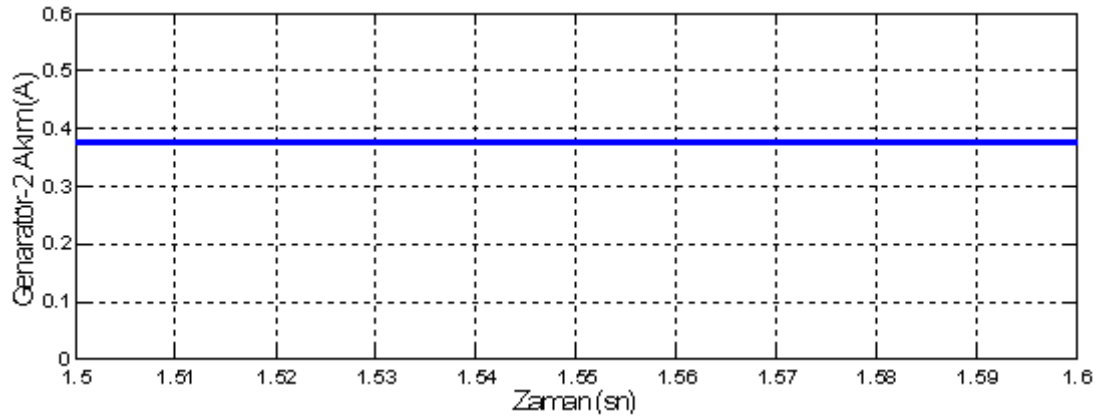
Akıllı enerji yönetim algoritması batarya gurubunun şarj olması gereken akımı hesaplayarak çift yönlü DA/DA dönüştürücüye bu referans akım bilgisini iletmektedir. Şekil 4.46’da batarya gurubunun girişindeki şarj akım değeri verilmektedir. Şekil 4.47’de batarya gurubunun şarj olduğu SOC bilgisi verilen Şekil 4.47’de ayrıntılı olarak gösterilmektedir. SOC bilgi grafiğinde skala % 30’un yakın olduğu değerlerde verilmiştir. Batarya gurubu yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğu için 1 sn’deki küçük bir kısmı gözlenmektedir. Durum 2’de yükün talep ettiği güç değeri P_{TOP} güç değerinden oldukça düşüktür ve 5 W’tır.



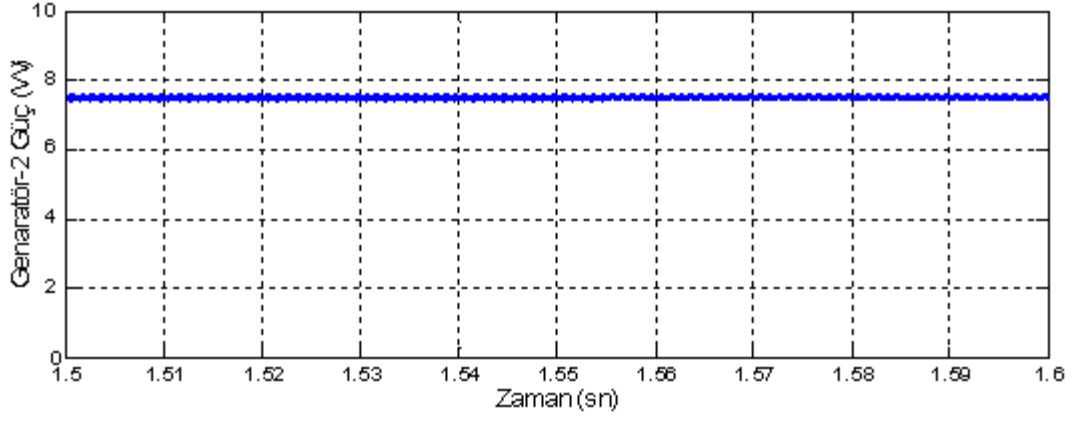
Şekil 4.40. Durum 3 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış akımı.



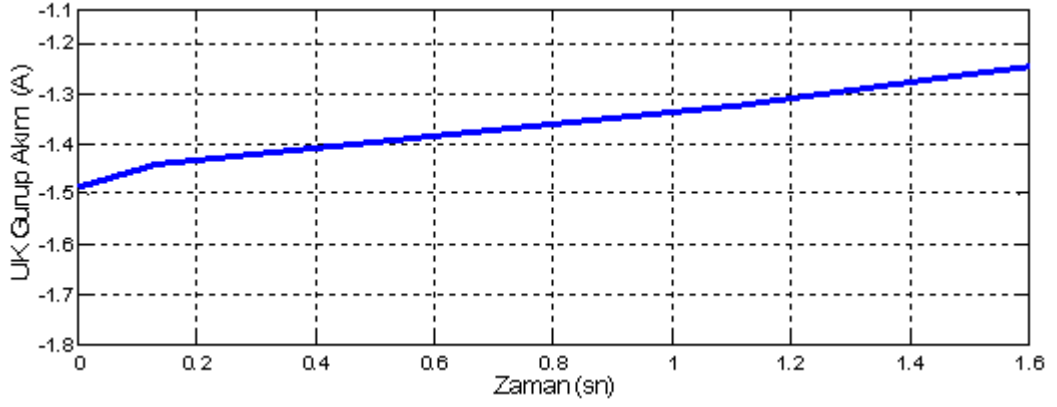
Şekil 4.41. Durum 3 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış gücü.



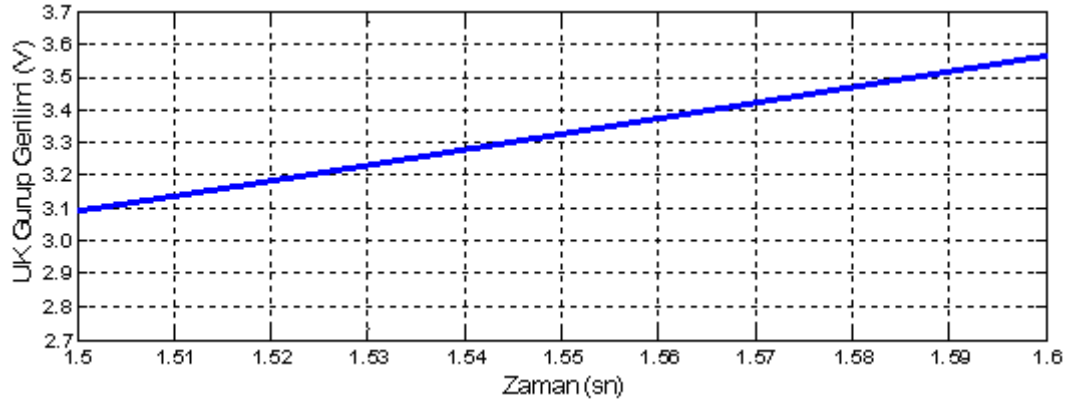
Şekil 4.42. Durum 3 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış akımı.



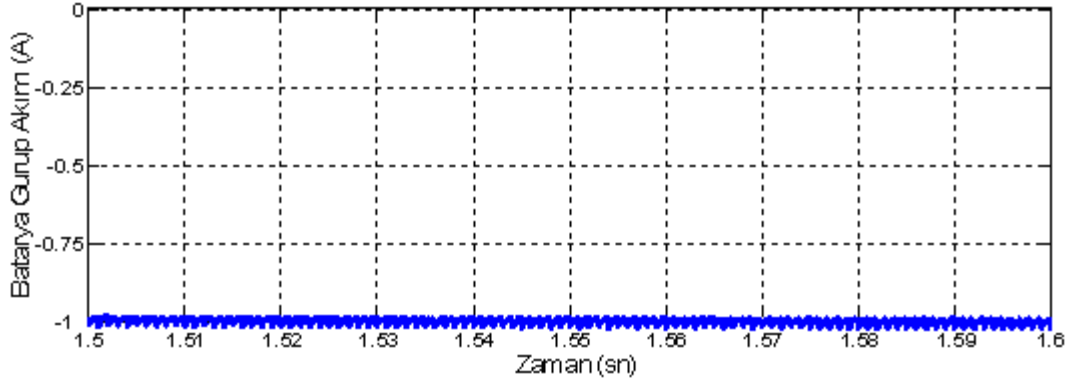
Şekil 4.43. Durum 3 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış gücü.



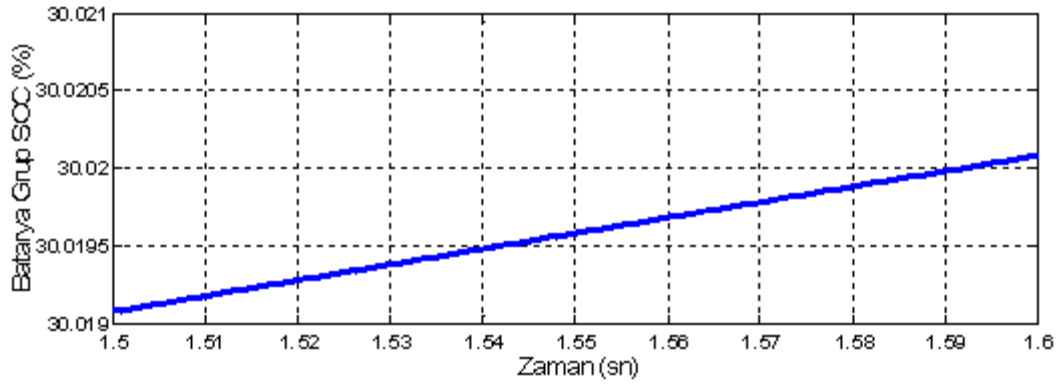
Şekil 4.44. Durum 3 için ultrakapasitör gurubu giriş akımı.



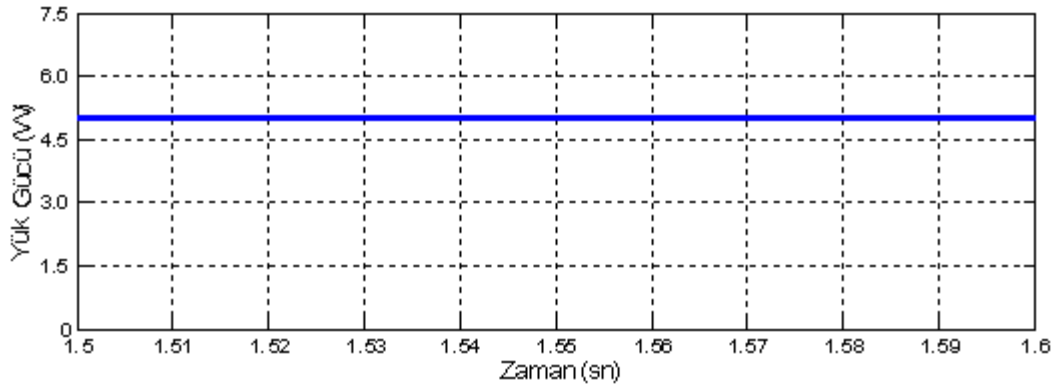
Şekil 4.45. Durum 3 için ultrakapasitör gurup terminal gerilimi.



Şekil 4.46. Durum 3 için batarya gurubu giriş akımı.



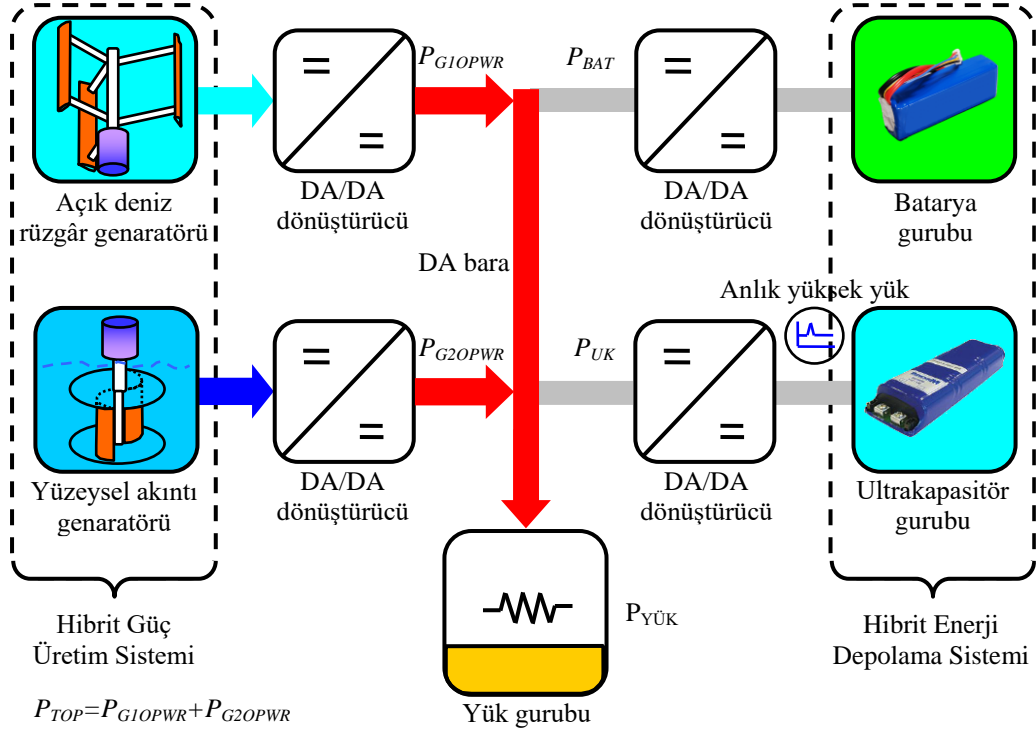
Şekil 4.47. Durum 3 için batarya gurubu SOC doluluk durumu.



Şekil 4.48. Durum 3 için yük gücü.

4.6.4. Durum 4 için Simülasyon Sonuçları

Durum 4'de $P_{TOP} > P_{YÜK}$ olduğunda; P_{BAT} ve P_{UK} doluluk durumlarının yüksek olduğu durum incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 4.49'da verilmektedir.

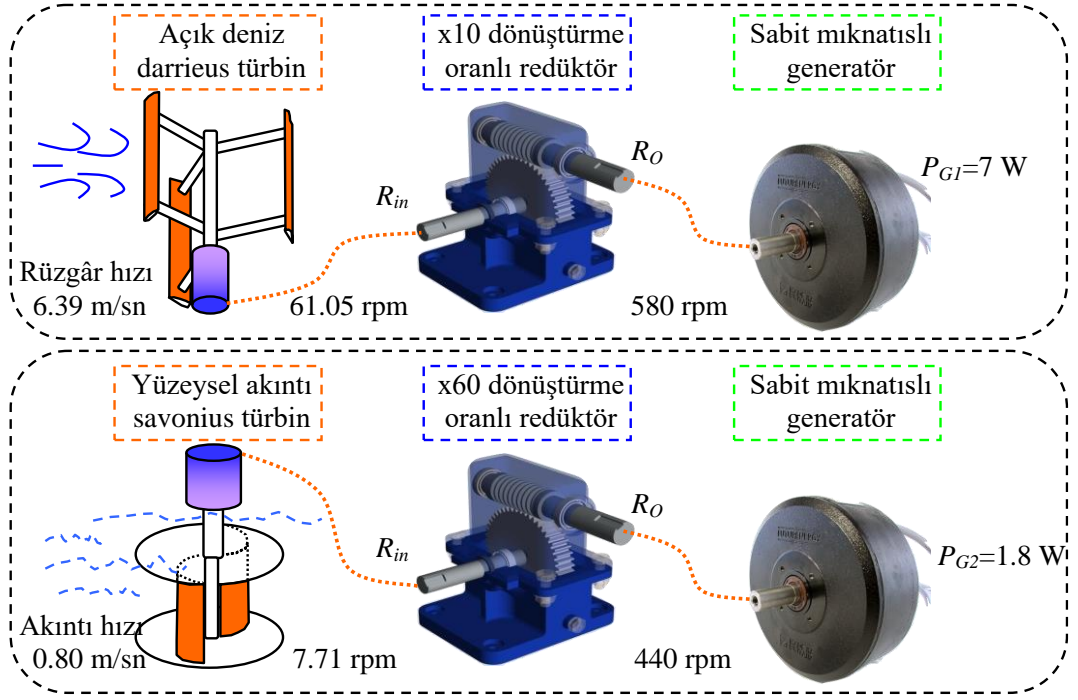


Şekil 4.49. Durum 4 için güç akış diyagramı.

Bu durum bir önceki olası çalışma koşulundan farklı olarak batarya ve ultrakapasitör gurubu dolmuştur. Bu yüzden HEDS'in şarj olmaması gerekmektedir. Akıllı enerji yönetim algoritması batarya gurubunun SOC değerine bakarak % 100 olduğunda şarj olmasını kesmektedir. Ultrakapasitör gurubunun da gerilim seviyesi sürekli olarak denetlenip 12 V civarında tutulmaktadır. HGÜS tarafından yük gurubunun talep ettiği güç değerinden fazla güç üretilmekte ve ilk olarak bakıldığında sistemde fazla enerji olduğu görülmektedir. Aslında fazla enerji üretilmemekte yükün talep ettiği güç miktarınca HGÜS'den enerji alınmaktadır. HGÜS'de bulunan generatörleri farklı güçte yüklediğimiz için aynı rpm dönüş hızlarında farklı enerji alınmaktadır. Eğer HGÜS ve HEDS şebeke bağlantılı bir yapıya sahip olsaydı fazla üretilen enerji şebekeye aktarılacaktı.

Şekil 4.50'de Durum 4 için HGÜS simülasyon parametre verilmektedir. Açık deniz rüzgâr darrieus türbinine 6.39 m/sn rüzgâr hızı gelmekte ve redüktör dönüştürme oranı ile generatöre aktarılmakta ve generatör 580 rpm devir hızında döndürülmektedir. Bu devirde generatör 10 W üretebilmektedir fakat sistemde düşük güçlü yük gurubu olduğundan açık deniz rüzgâr generatöründen 7 W civarında güç

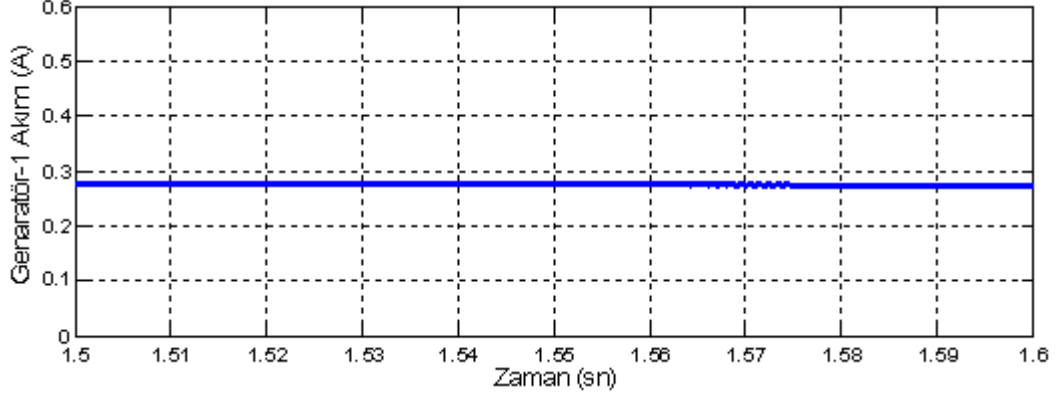
aktarımı yapılmaktadır. Yüzeysel akıntı türbini savonius 0.80 m/sn akıntı hızıyla dönerek redüktör ile genaratör 440 rpm devir hızında döndürülmektedir. Aynı şekilde bu genaratörden de 5 W güç üretilebilmektedir. Fakat yük gurubundan dolayı 1.8 W civarında bir güç aktarılmaktadır. HGÜS Durum 4 gibi olası çalışma koşullarında güç paylaşımını eşit oranda yaptığı görülmektedir.



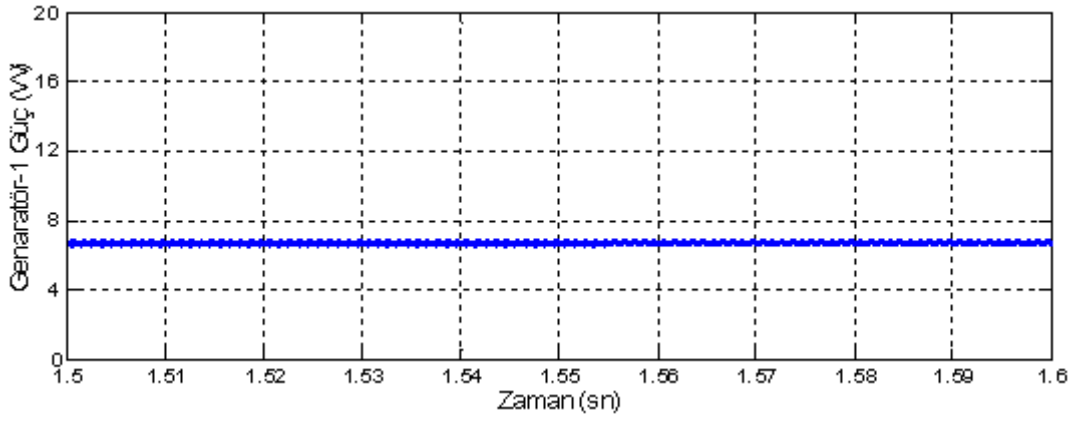
Şekil 4.50. Durum 4 için HGÜS simülasyon parametre değerleri.

Şekil 4.51’de açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkışındaki akım değeri ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Bu genaratör tarafından üretilen güç miktarı 7 W Şekil 4.52’de verilmektedir. Şekil 4.53’de yüzeysel akıntı genaratör çıkışındaki DA/DA yükseltici çıkışındaki akımı grafiği verilmektedir. Bu genaratörden yük gurubunun talep etmiş olduğu güce bağlı olarak yaklaşık olarak 1.8 W’tır ve Şekil 4.54’de gösterilmektedir. Durum 4’de batarya ve ultrakapasitör gurubunun doluluk seviyesi yüksek olduğundan devrede değillerdir. Şekil 4.55’de batarya gurubunun doluluk seviyesinin % 100 olduğu gösterilmektedir. Aynı şekilde ultrakapasitör gurubunun doluluk seviyesini gösteren terminal uçlarındaki gerilimi Şekil 4.56’da 14 V olarak verilmektedir. Bu olası çalışma durumunda eğer yükte 10 W altında bir güç değişimi olursa akıllı enerji yönetim algoritması batarya gurubunu devreye alarak yük talebini karşılayacaktır. Yükün talep etmiş olduğu güç miktarı 10 W üzerinde ise batarya

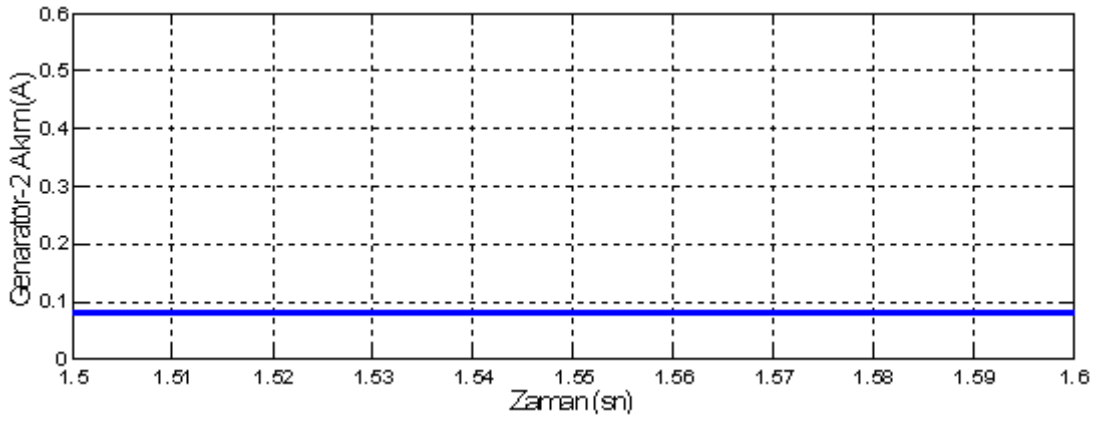
gurubu ve ultrakapasitörü yanı anda devreye alarak sistemde oluşabilecek gerilim dalgalanmasını önleyecektir. Yük gurubunun talep ettiği güç miktarı 5 W Şekil 4.57’de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



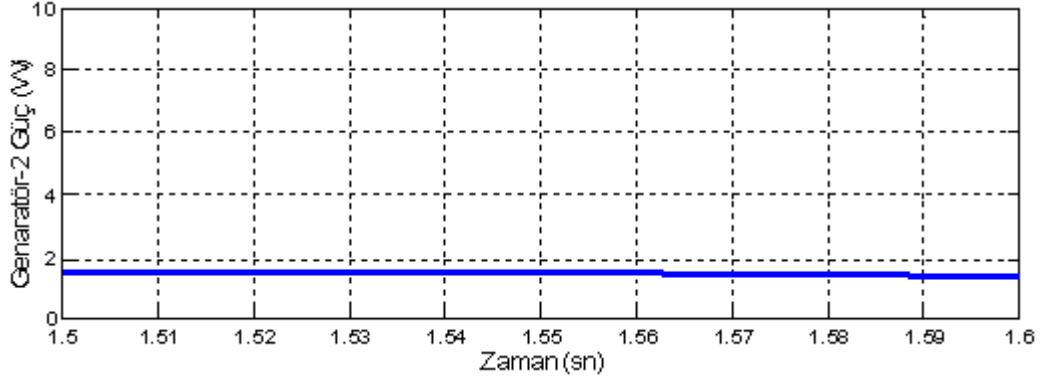
Şekil 4.51. Durum 4 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış akımı.



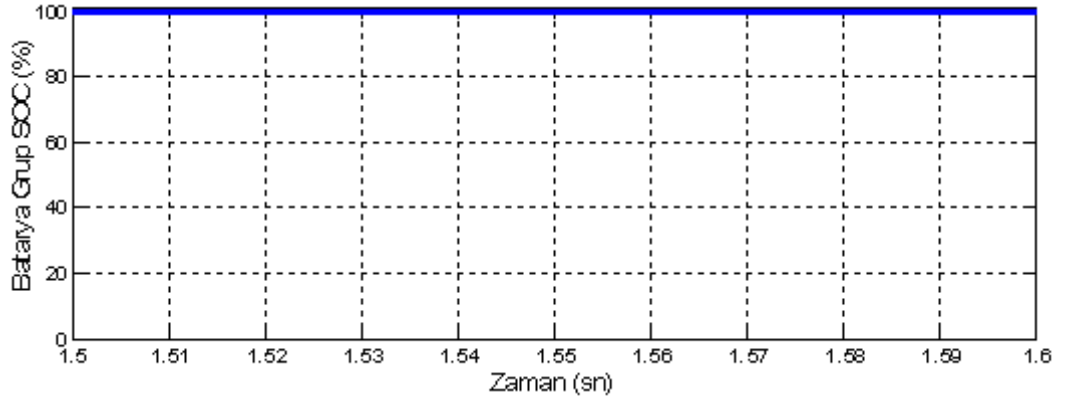
Şekil 4.52. Durum 4 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış gücü.



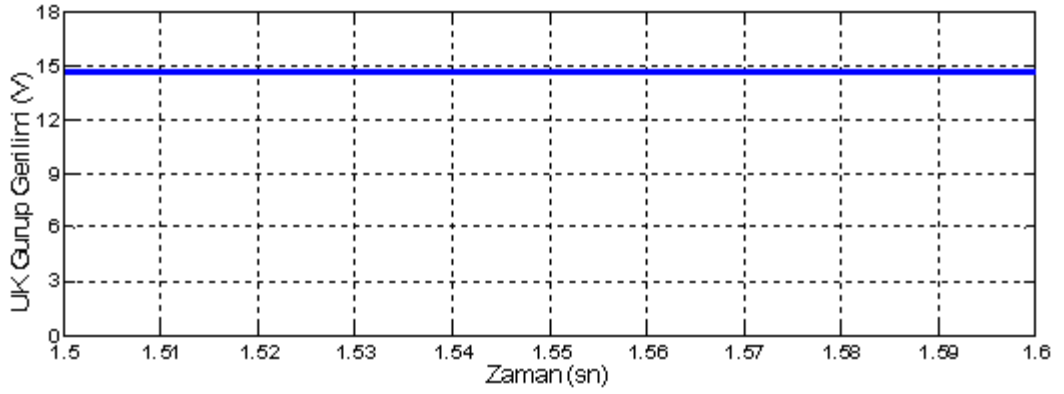
Şekil 4.53. Durum 4 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış akımı.



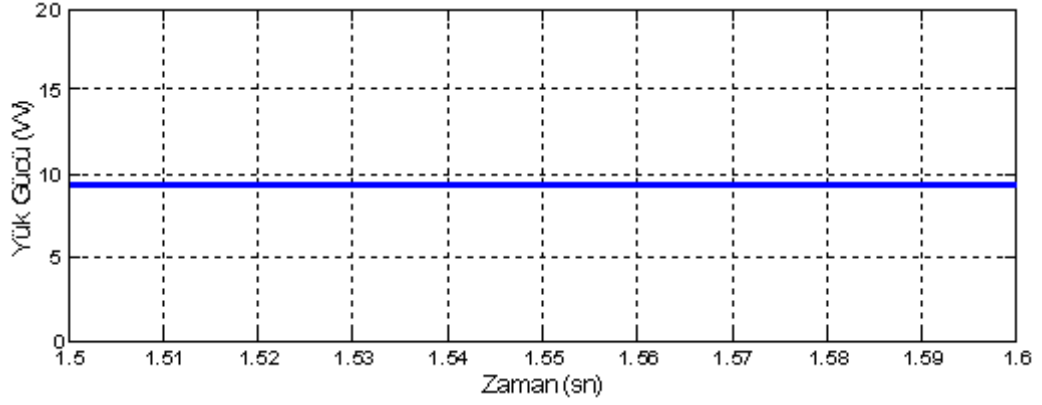
Şekil 4.54. Durum 4 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış gücü.



Şekil 4.55. Durum 4 için batarya gurubu SOC doluluk durumu.



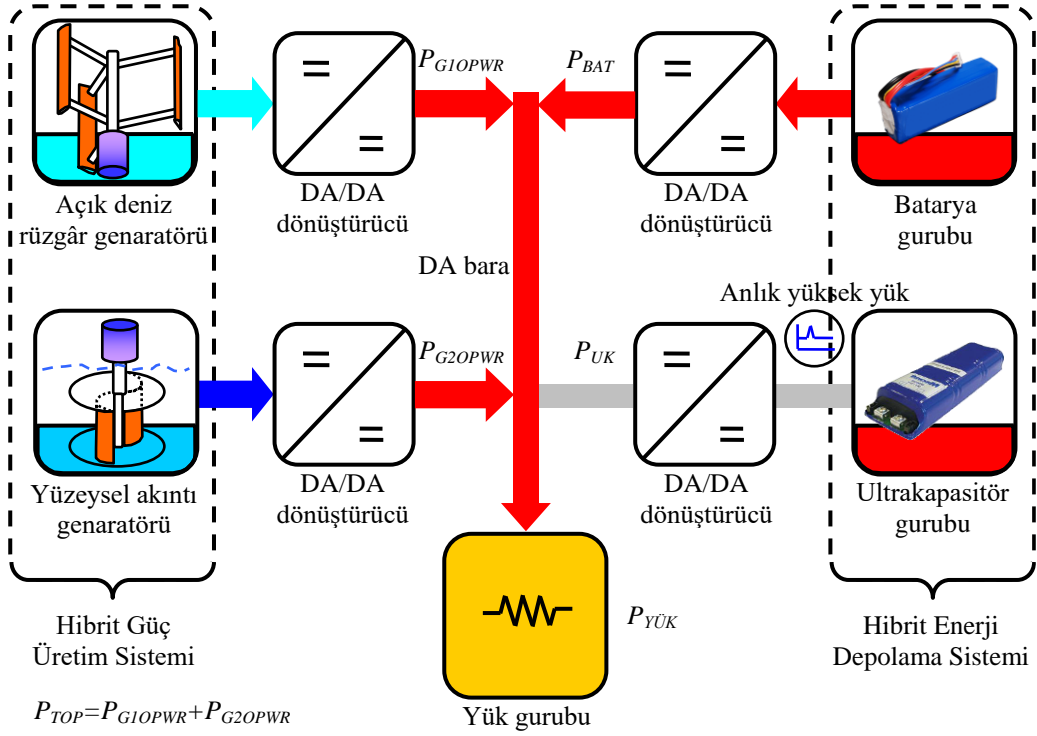
Şekil 4.56. Durum 4 için ultrakapasitör gurup terminal gerilimi.



Şekil 4.57. Durum 4 için yük gücü.

4.6.5. Durum 5 için Simülasyon Sonuçları

Durum 5’de $P_{TOP} < P_{YÜK}$ olduğunda; P_{BAT} ve P_{UK} doluluk durumlarının düşük olduğu olası çalışma koşulları incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 4.58’de verilmektedir. Bu durumda yük gurubunun talep gücü üretilen güç miktarından oldukça fazladır. HEDS bulunan her iki biriminde doluluk seviyesi düşüktür.

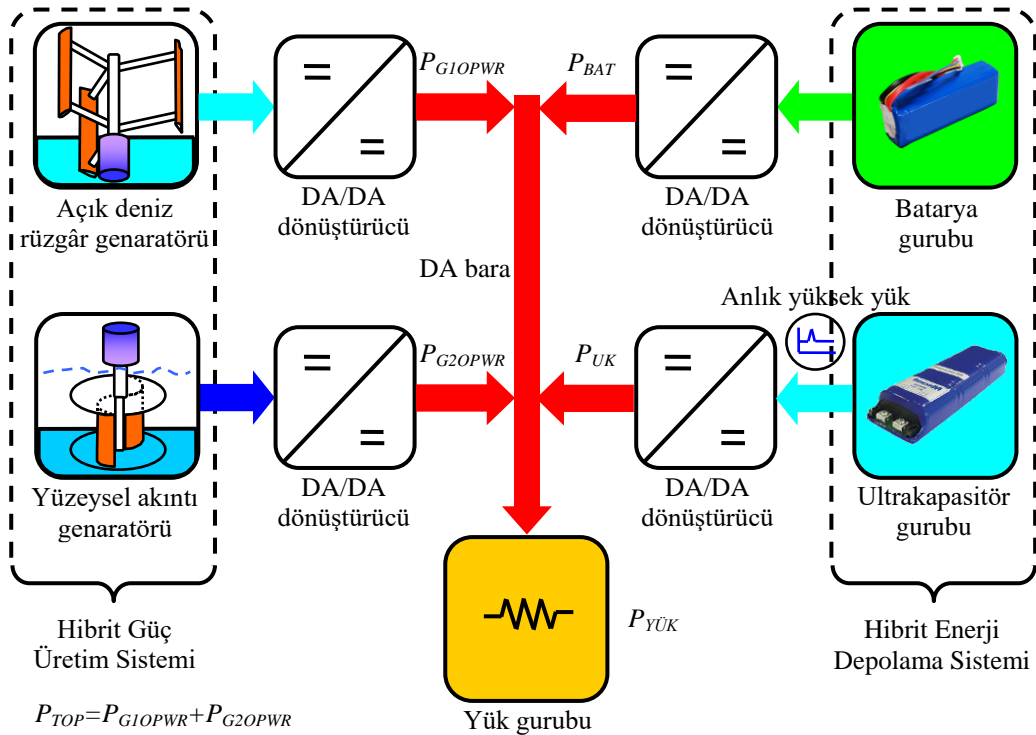


Şekil 4.58. Durum 5 için güç akış diyagramı.

Bu durumda HGÜS'den üretilen güç HEDS biriminde bulunan batarya ve ultrakapasitöre aktarılmaktadır. $P_{TOP} < P_{YÜK}$ olduğu için üretilen gücün tamamının HEDS'e aktarılarak, kendi biriminde bulunan enerji depolama sistemlerine destek olması sağlanmaktadır.

4.6.6. Durum 6 için Simülasyon Sonuçları

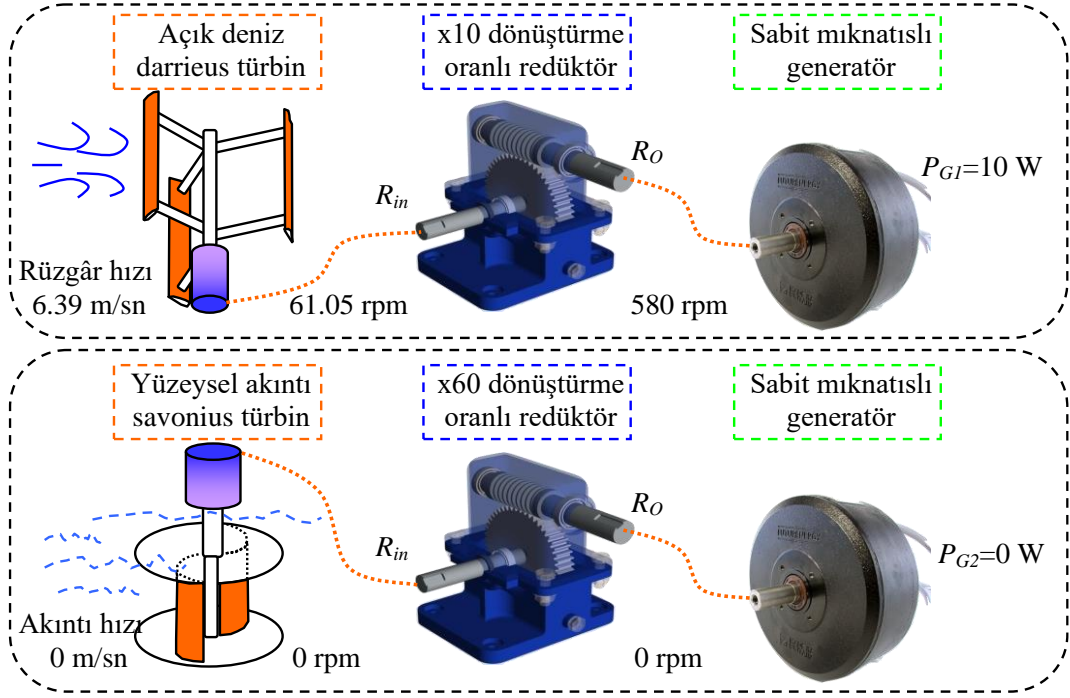
Durum 6'da $P_{TOP} < P_{YÜK}$ olduğunda; P_{BAT} ve P_{UK} doluluk durumlarının yüksek olduğu olası çalışma koşulu incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 4.59'da verilmektedir. Bu durum bir önceki Durum 5'den farklı olarak batarya ve ultrakapasitör gurubunun doluluk seviyelerinin yüksek olmasıdır. Ayrıca bu durumda ani yük talep ihtiyacı durumunda ultrakapasitör gurubu destek olarak DA barada dalgalanmasının önüne geçildiği incelenmiştir. Akıllı enerji yönetim algoritmasının sistemin hızla değişen dinamik davranışına verdiği tepki incelenmektedir.



Şekil 4.59. Durum 6 için güç akış diyagramı.

Şekil 4.60'da Durum 6 için HGÜS simülasyon parametre değerleri verilmektedir. Bu durumda açık deniz darrieus rüzgâr türbini 6.39 m/sn rüzgâr hızıyla dönmekte

redüktör ile dönüştürme oranı yükseltilecek şekilde genaratöre 580 rpm hızı ile aktarılmaktadır ve genaratör tarafından 10 W güç üretilmektedir. Yüzeysel akıntı savonius türbini durağan haldedir ve sisteme bir enerji akışı sağlamamaktadır.



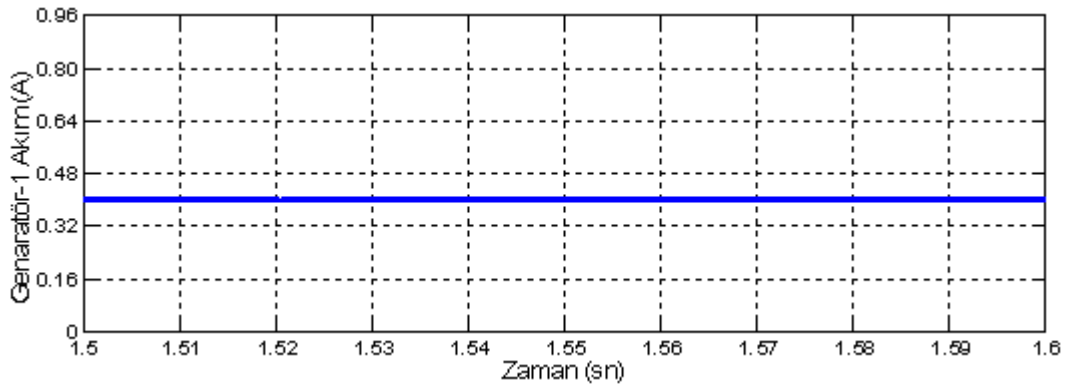
Şekil 4.60. Durum 6 için HGÜS simülasyon parametre değerleri.

Şekil 4.61’de açık deniz rüzgâr genaratör devre çıkışındaki DA/DA yükseltici devre çıkış akım grafiği verilmektedir. Genaratörden üretilen güç 10 W olmakla birlikte Şekil 4.62’de ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Yüzeysel akıntı genaratöründen bir güç üretilmediği için burada bulunan DA/DA yükseltici devresi pasif haldedir.

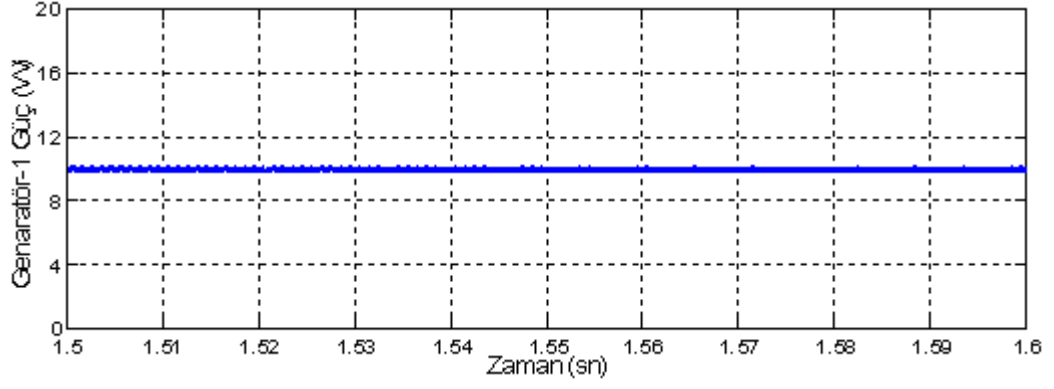
Durum 6’da açık deniz rüzgâr genaratöründen 10 W üretilmekte ve yük gurubunun talep ettiği güç miktarı 20 W’tır. P_{FARK} güç değeri -10 W olarak akıllı enerji yönetim algoritması tarafından hesaplanmaktadır. Fark gücün negatif çıkması sistemde bulunan HEDS’deki batarya gurubunu devreye alması anlamına gelmektedir. Bu fark gücü kadar batarya gurubunun deşarj olması gereken referans akım değeri hesaplanarak sisteme DA bara üzerinden güç akışı sağlanır. Sistem çalışması sırasında 1.5 sn’de aniden 13 W’lık bir yük talebi devreye girmektedir. Akıllı enerji yönetim algoritması bu ani yük talebini algılayarak ultrakapasitör gurubunu devreye almaktadır. Ultrakapasitör gurubunun deşarj olması gereken referans akım değeri

hesaplanarak çift yönlü DA/DA dönüştürücü devresine gönderilmektedir. Daha sonra ultrakapasitör gurubu, yükün uzun süreli olarak batarya gurubundan karşılanması için devreden çıkarak bütün güç batarya gurubu tarafından sağlanır. Burada akıllı enerji yönetim algoritması ve ultrakapasitör sayesinde batarya gurubunun ani deşarj (deep discharge) olmasının önüne geçilerek batarya gurubunun çevrim ömrünün uzatılması sağlanmaktadır.

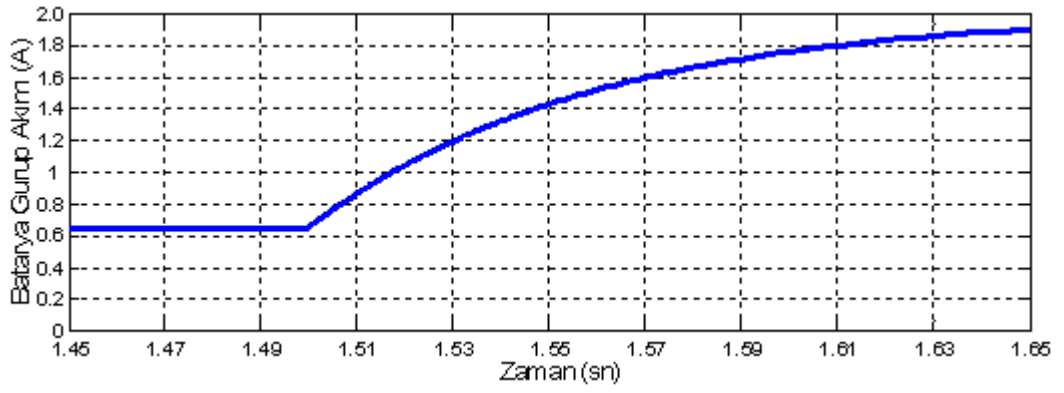
Şekil 4.63’de Durum 6 için ani yük değişim çalışma koşulundaki batarya gurubunun akım grafiği ayrıntılı olarak verilmektedir. Batarya gurubu 1.5 sn’de akıllı enerji yönetim algoritmasının hesapladığı akım değerine göre deşarj olmaktadır. Şekil 4.64’de batarya gurubunun doluluk seviyesi SOC ayrıntılı olarak verilmekte ve % 90 seviyesinden başlayarak düştüğü görülmektedir. Şekil 4.65’de ultrakapasitör gurubunun akım grafiği verilmektedir. Ultrakapasitör gurubu, sisteme ani yük talebi girdiğinde bu güç ihtiyacı akıllı enerji yönetim algoritması tarafından algılanarak devreye alınmaktadır ve hesaplanan 2 A akım değerinde deşarj edilmektedir. Şekil 4.66’da ani yük talebi sırasında deşarj olan ultrakapasitör gurubunun terminal uçlarındaki gerilim grafiği verilmektedir. Ultrakapasitör gurubunun yapısal özelliği olan düşük güç enerji yoğunluğuna sahip olmasından terminal uçlarındaki gerilim değeri çok hızlı bir şekilde düşmektedir. Şekil 4.67’de Durum 6 için sistem DA bara gerilim grafiği verilmektedir. Yük gurubu ilk olarak 20 W güç talep etmekte, 1.5 sn’de 12 W ilave güç devreye alınarak toplamda 32 W güç talep edilmektedir. Yük gurubunun talep ettiği güç değişim grafiği Şekil 4.68’de verilmektedir.



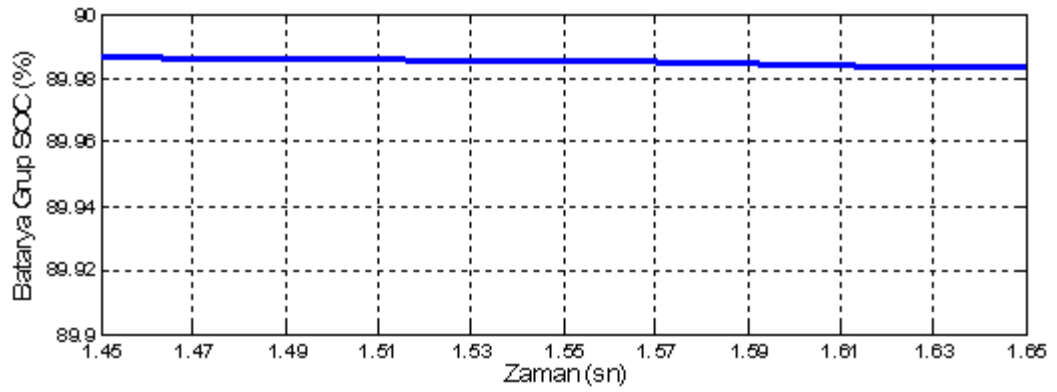
Şekil 4.61. Durum 6 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış akımı.



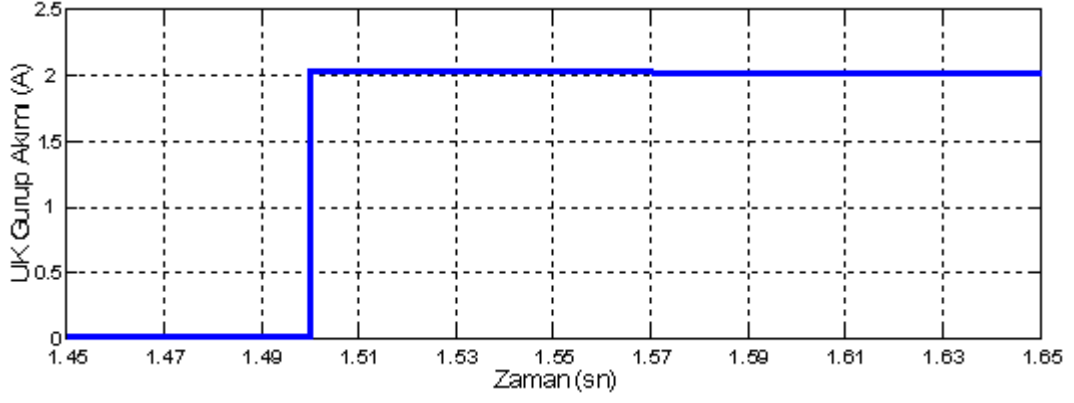
Şekil 4.62. Durum 6 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış gücü.



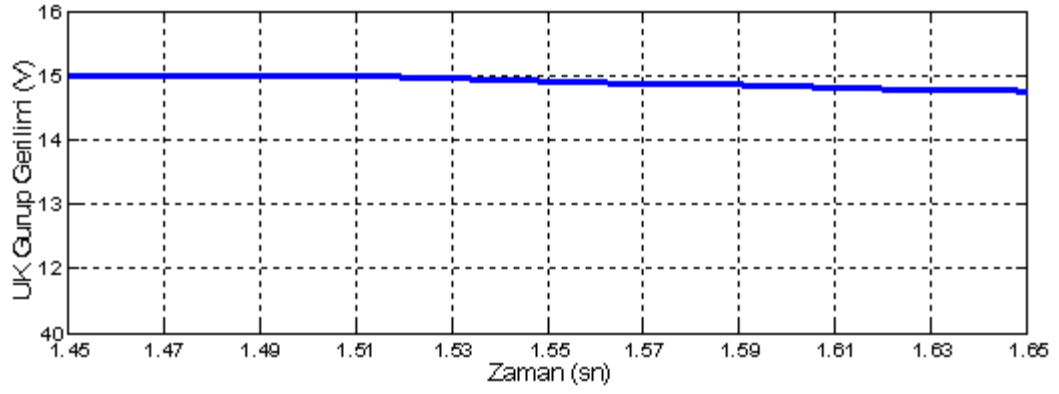
Şekil 4.63. Durum 6 için batarya gurubu giriş akımı.



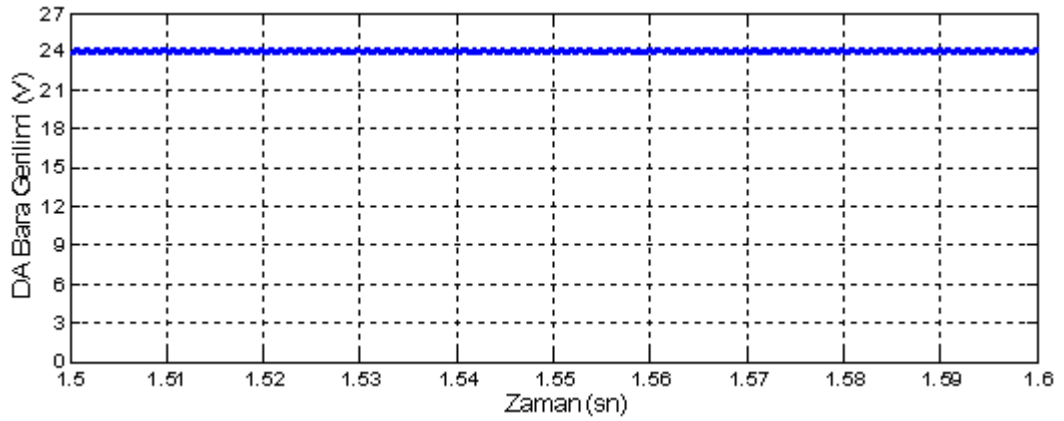
Şekil 4.64. Durum 6 için batarya gurubu SOC doluluk durumu.



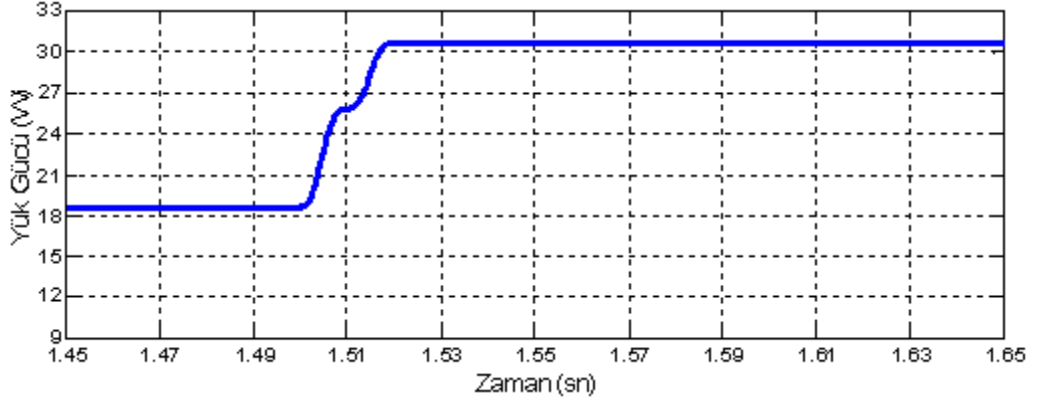
Şekil 4.65. Durum 6 için ultrakapasitör gurubu giriş akımı.



Şekil 4.66. Durum 6 için ultrakapasitör gurup terminal gerilimi.



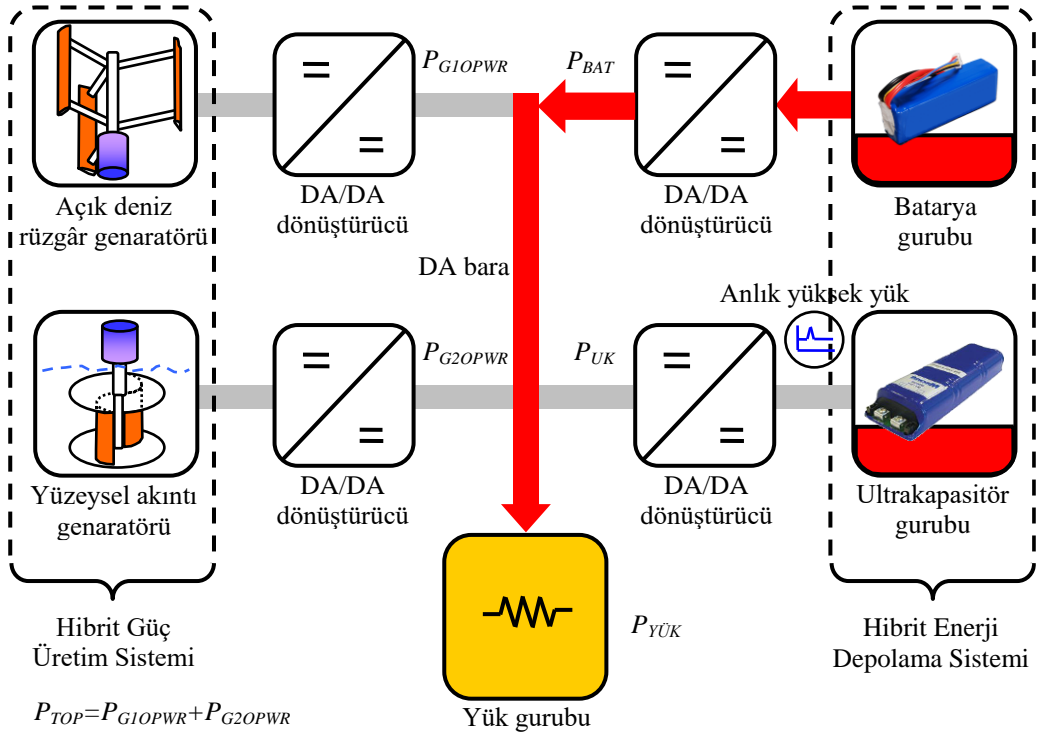
Şekil 4.67. Durum 6 için DA bara gerilimi.



Şekil 4.68. Durum 6 için yük gücü.

4.6.7. Durum 7 için Simülasyon Sonuçları

Durum 7’de $P_{TOP}=0$ olduğunda; P_{BAT} ve P_{UK} doluluk durumlarının düşük olduğu çalışma koşulu incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 4.69’da verilmektedir. Bu durumda açık deniz rüzgâr ve yüzeysel akıntı türbinleri dönmediğinden HGÜS’den herhangi bir güç aktarımı bulunmamaktadır.

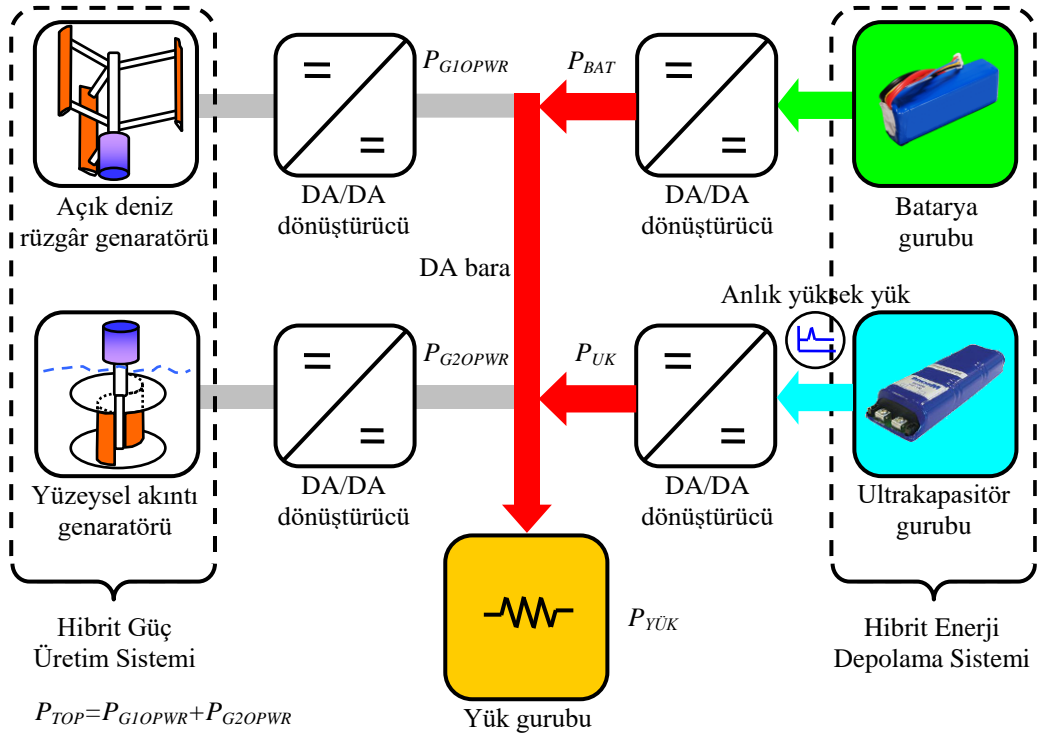


Şekil 4.69. Durum 7 için güç akış diyagramı.

Sistemde bulunan batarya ve ultrakapasitör gurubu tarafından yük talep ihtiyacı karşılanmaktadır. Bu durumda batarya enerji depolama biriminin doluluk durumu oldukça düşüktür. Eğer batarya SOC değeri % 20'nin altına düşerse, batarya gurubunun sağlığını korumak için akıllı enerji yönetim algoritması tarafından algılanarak batarya gurubu pasif duruma geçirilmektedir.

4.6.8. Durum 8 için Simülasyon Sonuçları

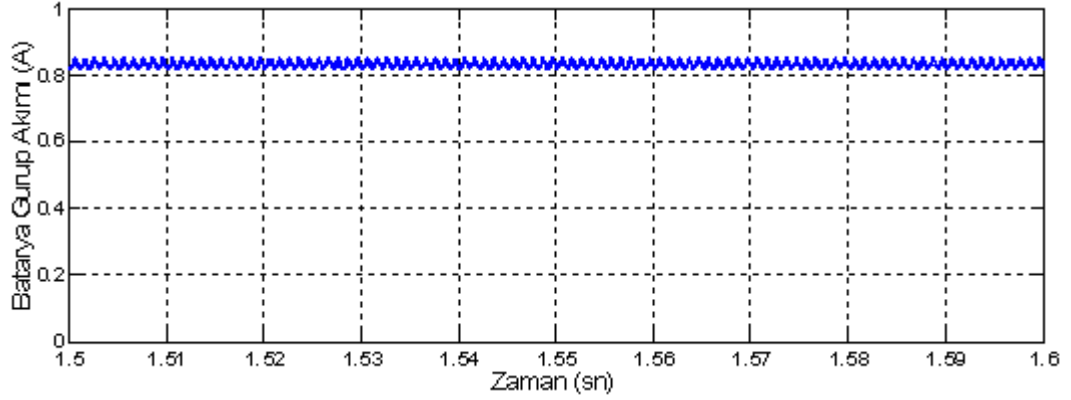
Durum 8'de $P_{TOP}=0$ olduğunda; P_{BAT} ve P_{UK} doluluk durumları yüksek olduğu olası çalışma koşulu incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 4.70'de verilmektedir. Bu durumda HGÜS'de bulunan her iki birimde güç üretmemektedir.



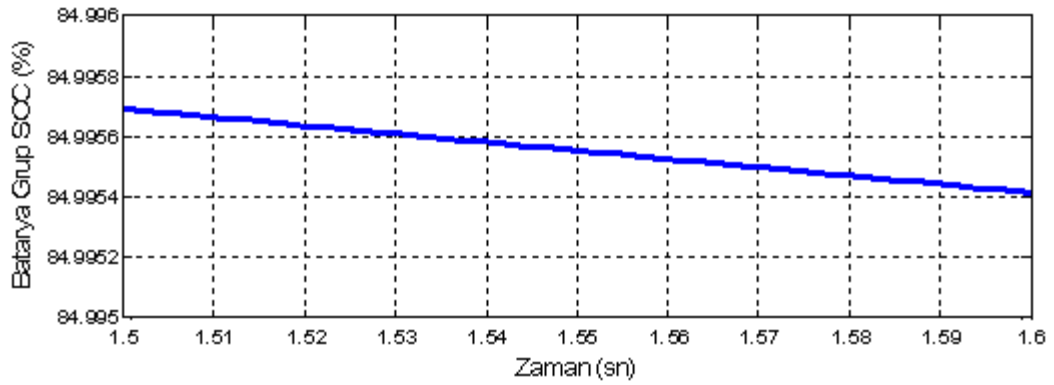
Şekil 4.70. Durum 8 için güç akış diyagramı.

Sistemde bulunan HEDS batarya ve ultrakapasitör gurubunun doluluk seviyeleri yüksektir. Şekil 4.71'de Durum 8 için batarya gurubunun giriş akım grafiği verilmektedir. Akıllı enerji yönetim algoritması tarafından hesaplanan batarya gurubunun referans deşarj akım bilgisi çift yönlü DA/DA dönüştürücüye gönderilmektedir. Bu durumda batarya gurubunun doluluk durumu % 85'dir ve yük

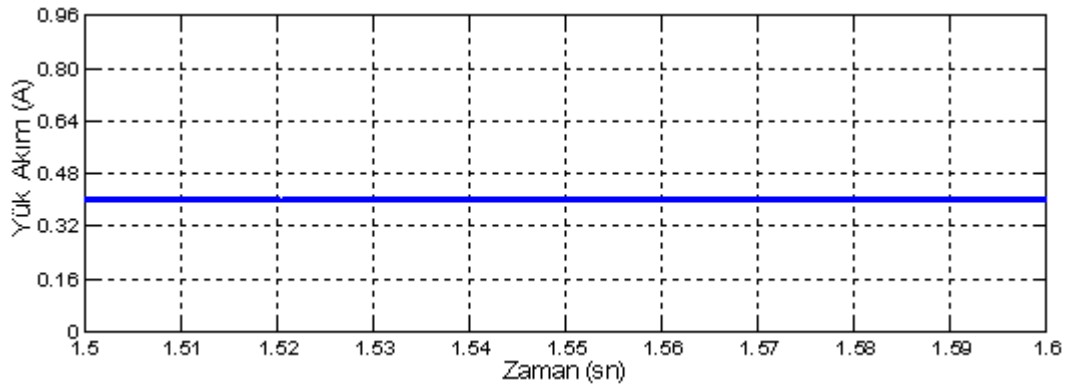
talebine bağılı olarak Şekil 4.72'deki gibi zamanla azalmaktadır. Şekil 4.73'de yük gurubu tarafından talep edilen akım değeri gösterilmektedir. 24 V DA bara geriliminde yük gurubu 10 W güç talep etmektedir.



Şekil 4.71. Durum 8 için batarya gurubu giriş akımı.

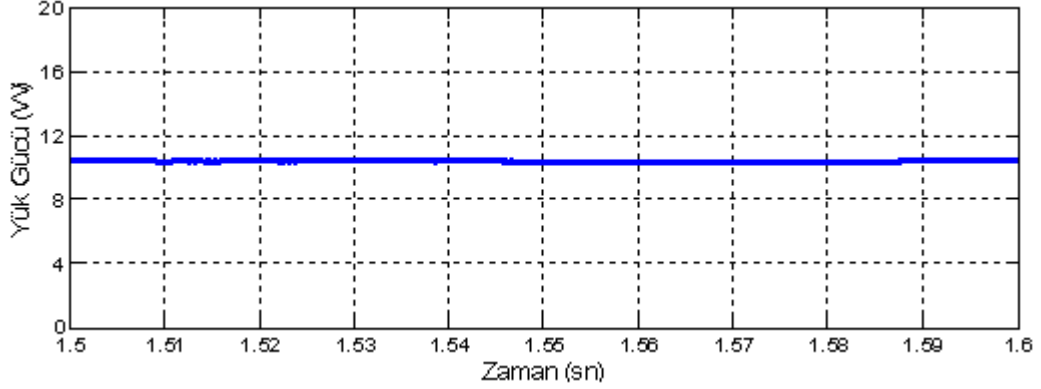


Şekil 4.72. Durum 8 için batarya gurubu SOC doluluk durumu.



Şekil 4.73. Durum 8 için yük akımı.

Şekil 4.74’de yük gurubunun talep ettiği güç değeri ayrıntılı olarak verilmektedir. Yükün talep ettiği güç değeri uzun süreli enerji ihtiyacında batarya gurubu tarafından sağlanmaktadır. Ultrakapasitör gurubu eğer anlık yüksek yük talebi olursa devreye girecektir.

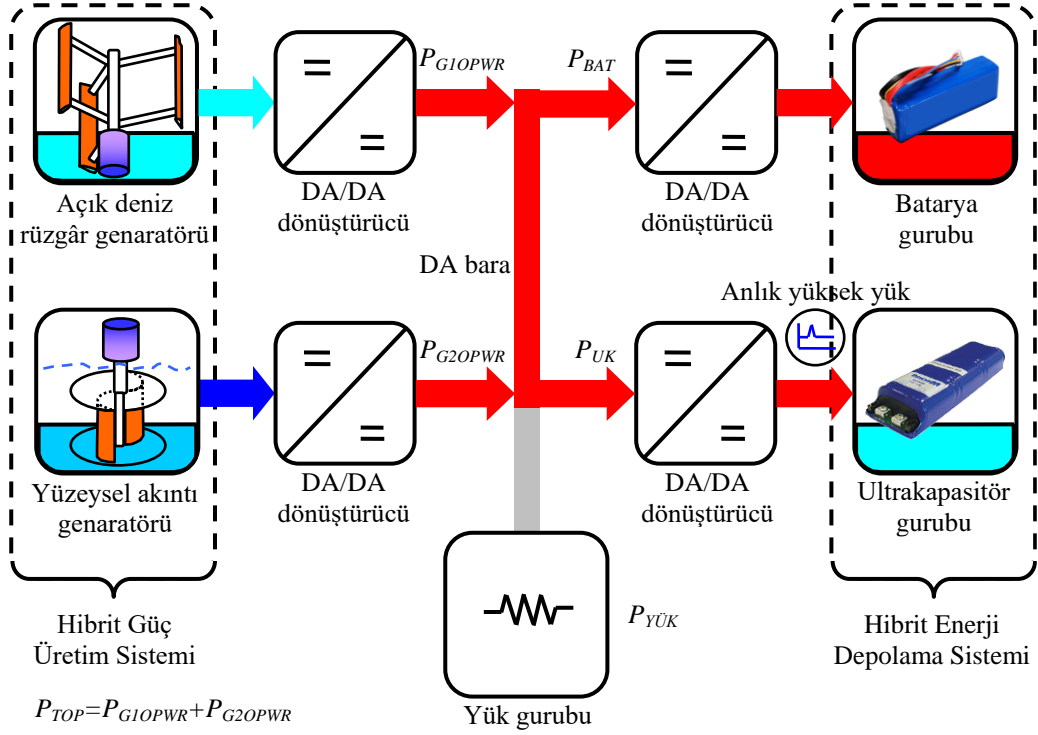


Şekil 4.74. Durum 8 için yük gücü.

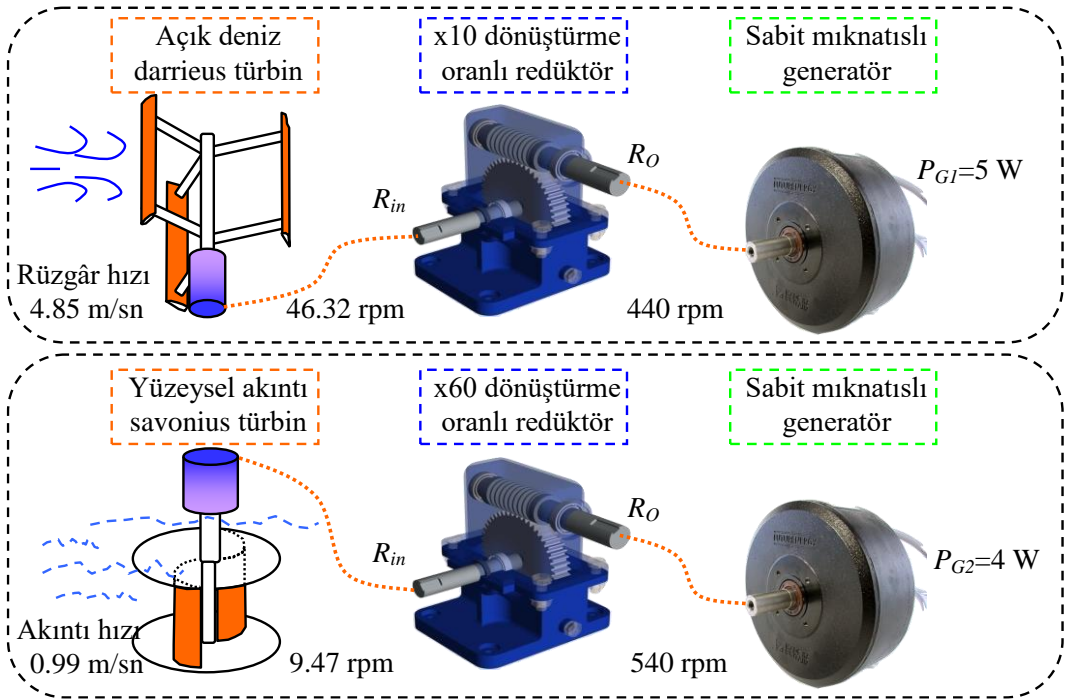
4.6.9. Durum 9 için Simülasyon Sonuçları

Durum 9’da $P_{TOP}=0$ olduğunda; P_{BAT} ve P_{UK} doluluk durumları yüksek olduğu olası çalışma koşulu incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 4.75’de verilmektedir. Bu durumda HGÜS tarafından güç üretilmektedir. Fakat sistemde herhangi bir yük talep ihtiyacı yoktur ve sistemden çekilen güç sıfırdır. Durum 9’da herhangi bir yük talebi olmadığından HGÜS tarafından üretilen bütün güç HEDS’e aktarılmaktadır. Böylece doluluk durumları düşük olan batarya ve ultrakapasitör gurubu şarj olmaktadır.

Şekil 4.76’da Durum 9 için HGÜS simülasyon parametre değerleri verilmektedir. Açık deniz darrieus türbini 4.85 m/sn hızla dönerek redüktöre mekanik olarak gücü aktarmaktadır. Redüktör dönüştürme oranıyla genaratörü 440 rpm döndürerek 5 W elektrik enerjisi elde edilmektedir. Yüzeysel akıntı savonius türbin ise 0.99 m/sn hızla dönmekte ve redüktörün dönüştürme oranıyla genaratörü 540 rpm hızında döndürerek 4 W elektriksel güç üretilmektedir.



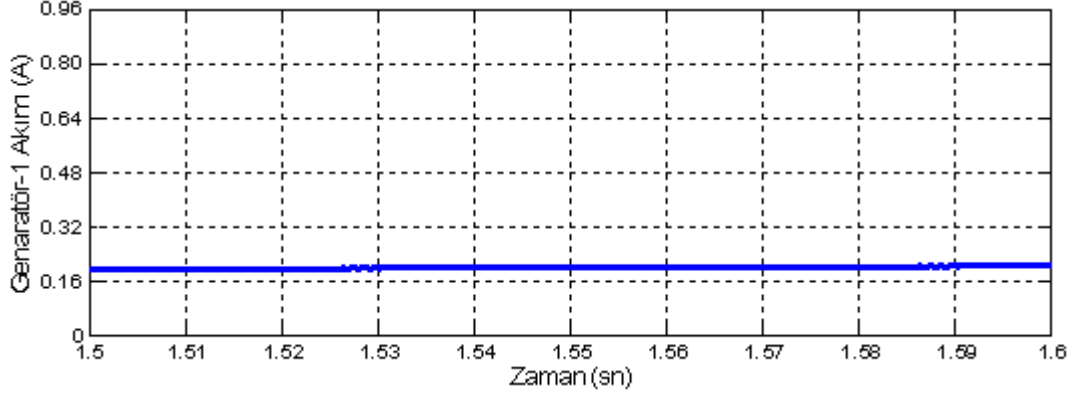
Şekil 4.75. Durum 9 için güç akış diyagramı.



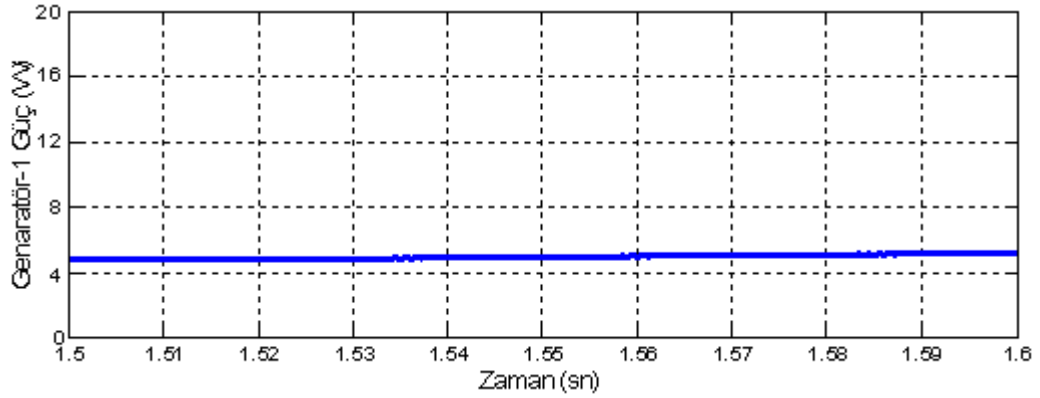
Şekil 4.76. Durum 9 için HGÜS simülasyon parametre değerleri.

Şekil 4.77’de Durum 9 için açık deniz rüzgâr generatör devre çıkışındaki DA/DA yükseltici dönüştürücü çıkış akım grafiği verilmektedir. DA bara gerilimi 24 V

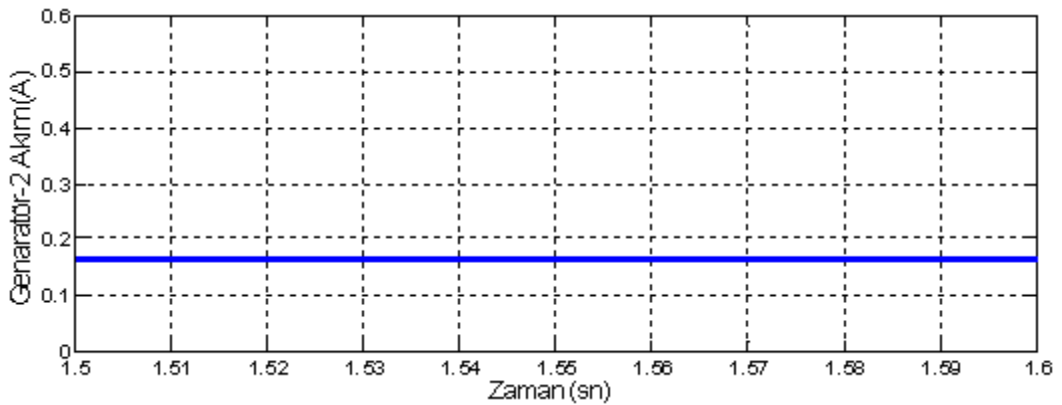
olduğu için Şekil 4.78’deki gibi yaklaşık olarak 5 W güç DA baraya aktarılmaktadır. Şekil 4.79’da yüzeysel akıntı genaratör devre çıkış akımı verilmektedir. Bu genaratör tarafından üretilen güç değeri yaklaşık olarak 4 W’tır ve Şekil 4.80’de ayrıntılı olarak verilmektedir.



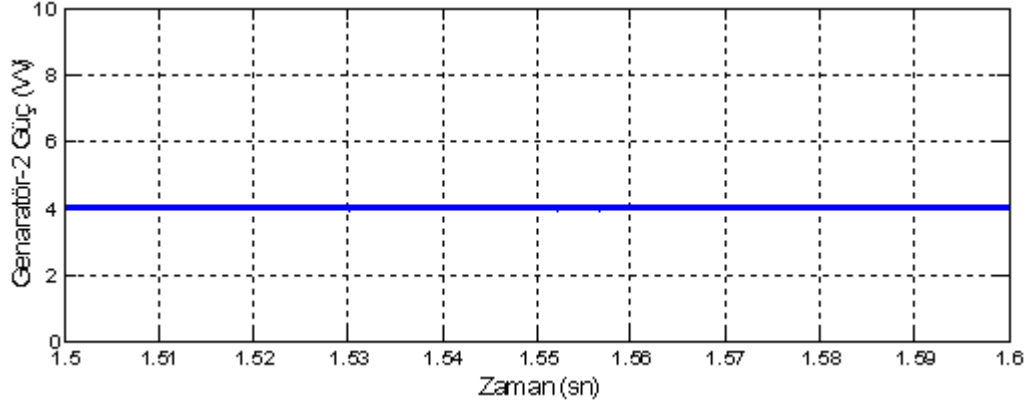
Şekil 4.77. Durum 9 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış akımı.



Şekil 4.78. Durum 9 için açık deniz rüzgâr genaratör devresi çıkış gücü.



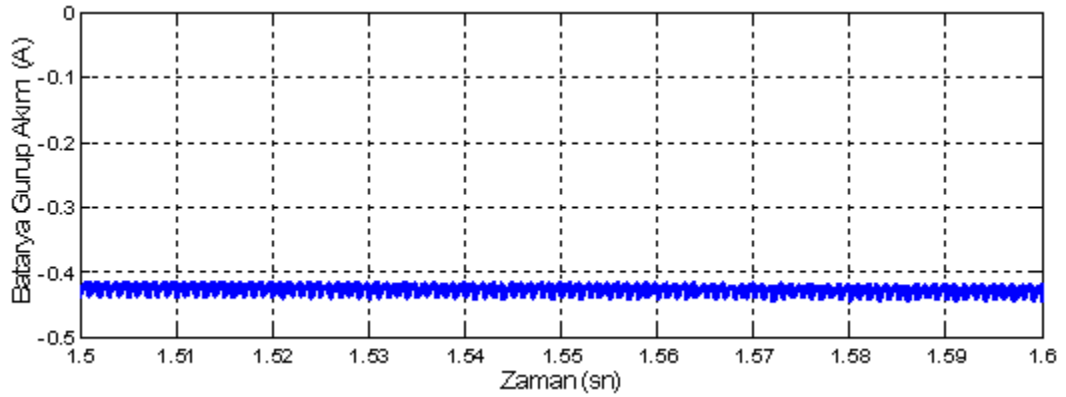
Şekil 4.79. Durum 9 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış akımı.



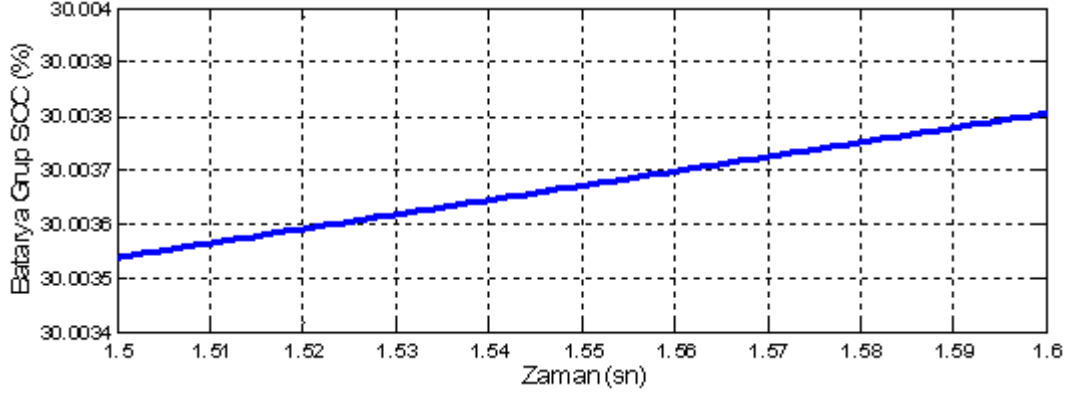
Şekil 4.80. Durum 9 için yüzeysel akıntı genaratör devresi çıkış gücü.

Durum 9’da yük talebi olmadığı için üretilen bütün güç HEDS’e aktarılmaktadır. Şekil 4.81’de verildiği gibi batarya gurubu yaklaşık olarak 0.42 A’de şarj olmaktadır. Batarya gurubunun doluluk durumu SOC Şekil 4.82’de ayrıntılı olarak verilmektedir. Bu grafikteki skala batarya gurubunun doluluk seviyesi daha iyi görülmesi için küçük bir bantta tutulmuştur. Batarya gurubunun doluluk durumu SOC % 30’dan başlayarak yükseldiği görülmektedir.

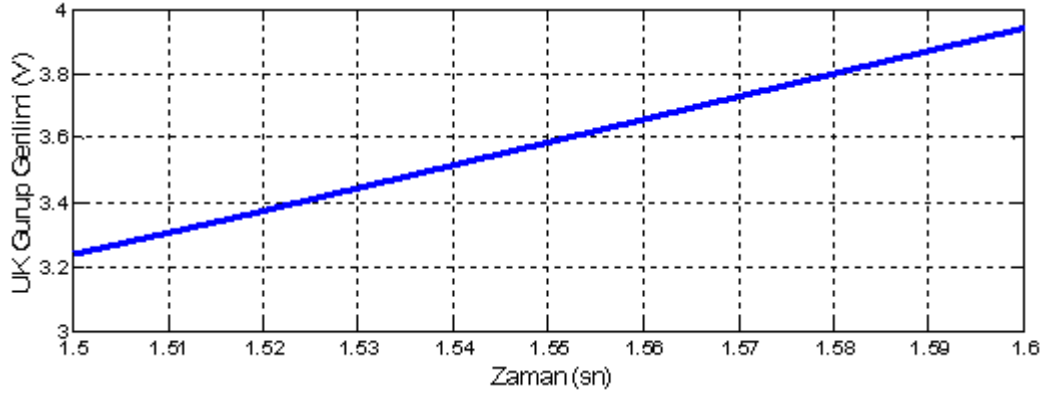
Şekil 4.83’de Durum 9 için ultrakapasitör gurubunun şarj sırasındaki terminal uçlarındaki gerilim değeri görülmektedir. Şekil 4.84’de ultrakapasitör gurubunun akıllı enerji yönetim algoritması tarafından belirlenen şarj olması gereken akım grafiği gösterilmektedir. Ultrakapasitör gurubu batarya gurubuna kıyasla çok hızlı bir şekilde şarj olarak şarj akımı kısa bir sürede sıfıra doğru gittiği görülmektedir.



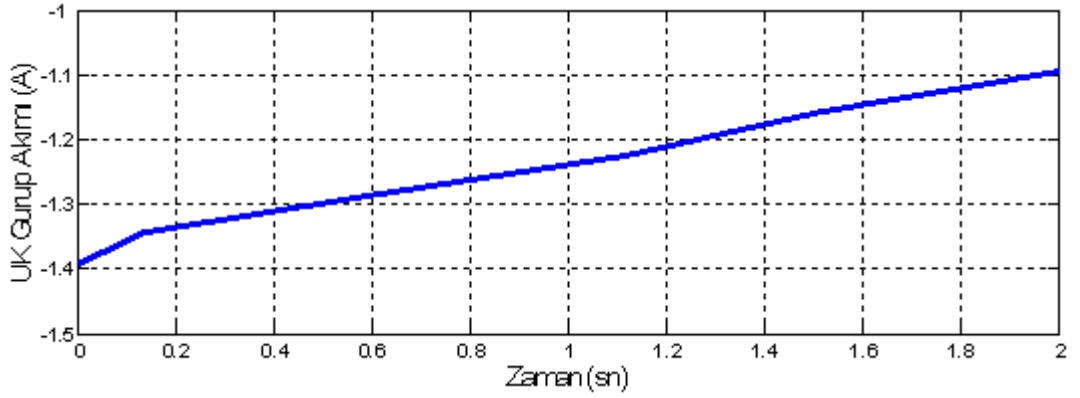
Şekil 4.81. Durum 9 için batarya gurubu giriş akımı.



Şekil 4.82. Durum 9 için batarya gurubu SOC doluluk durumu.



Şekil 4.83. Durum 9 için ultrakapasitör gurup terminal gerilimi.

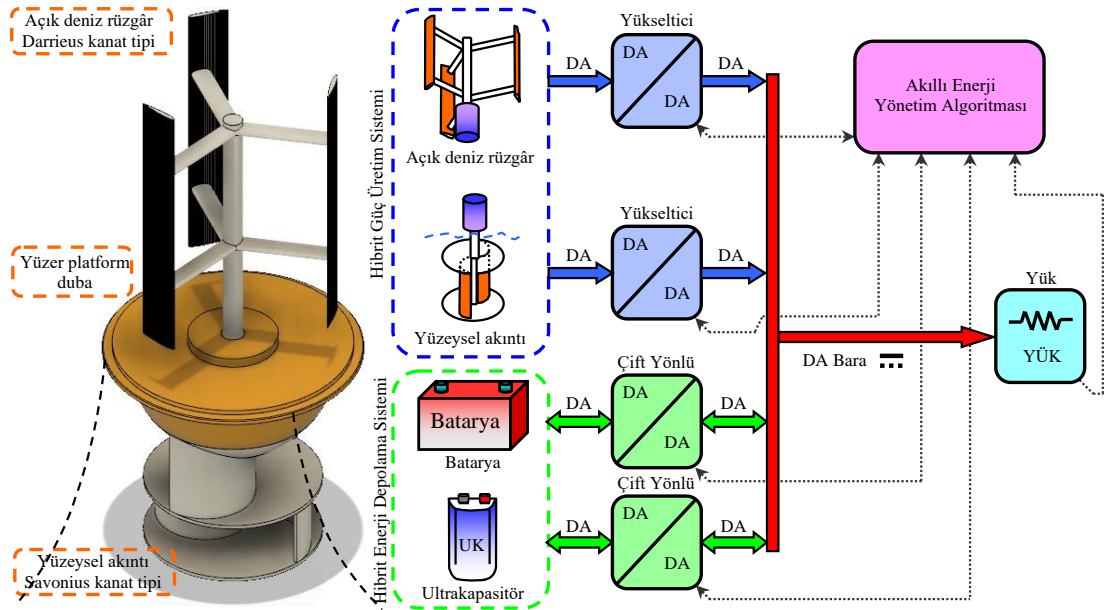


Şekil 4.84. Durum 9 için ultrakapasitör gurubu giriş akımı.

BÖLÜM 5

HİBRİT SİSTEMİN DENEYSEL ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARI

HGÜS ve HEDS bütün alt bileşenlerini kontrol eden kartlar aynı yüzer platforma eklenmiştir. Şekil 5.1’de HGÜS ve HEDS’in deneysel topoloji diyagramı verilmektedir. Deneyler sırasında kullanılacak yük gurubu da aynı sistem içine dâhil edilmektedir. Açık deniz rüzgâr enerjisi Darrieus ve akıntı enerjisi Savonius türbin kanadından alınan tahrik güçleri redüktörler aracılığıyla ayrı ayrı generatörlere iletilmektedir. Generatörler tarafından üretilen DA elektriksel enerji DA/DA yükselticiler ile tek bir DA barada toplanmaktadır. Sistemde bulunan HEDS birimlerini oluşturan batarya ve ultrakapasitör gurubu, enerjinin iki yönlü akışını sağlayan DA/DA çift yönlü dönüştürücü ile ortak DA baraya bağlanmaktadır. DA baradan alınan enerji son kullanıcıya yani yüke aktarılmaktadır. Sistemde bulunan dönüştürücü ve kontrol devreleri ile sensörlerden alınan bilgilere göre denetimi yapılmaktadır.

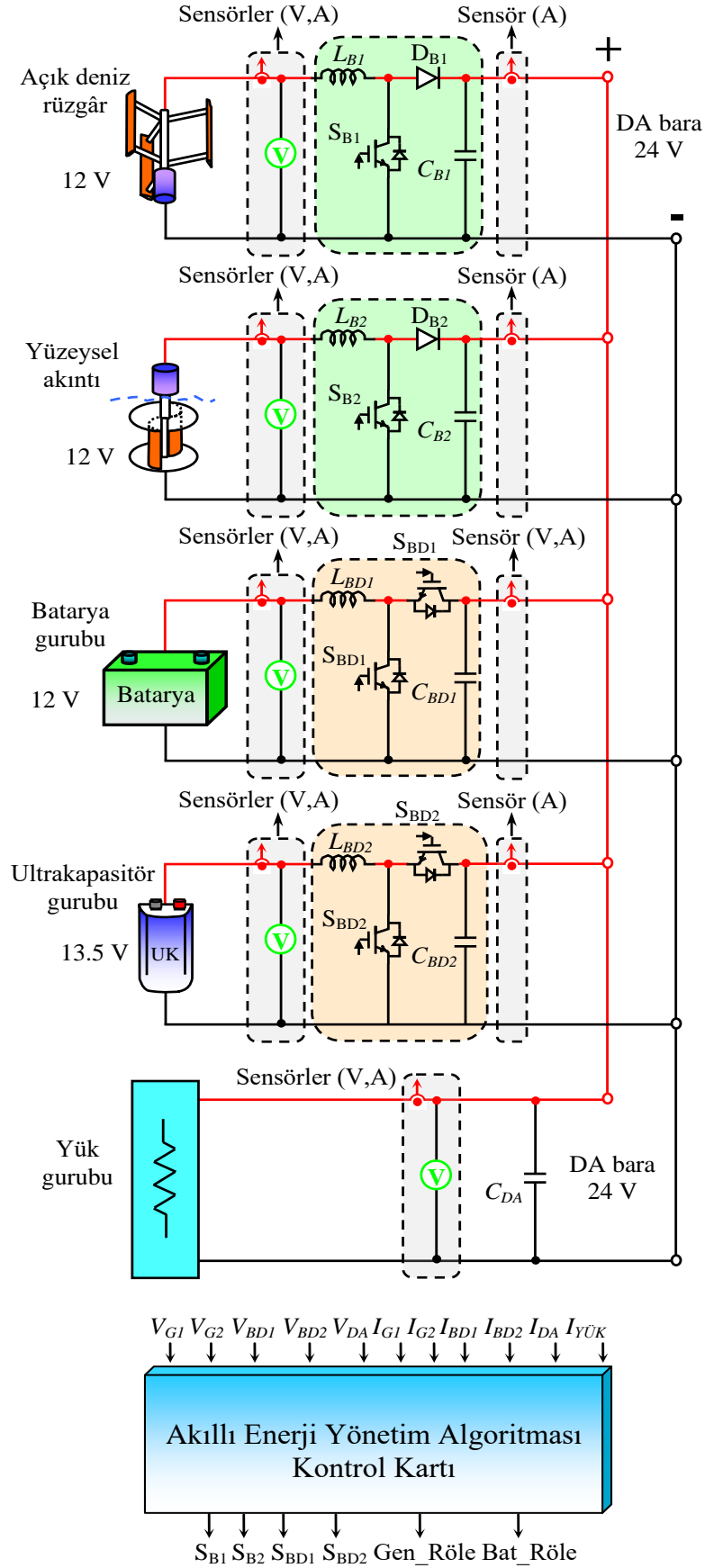


Şekil 5.1. HGÜS ve HEDS'in deneysel topoloji diyagramı.

HGÜS ve HEDS'in birçok olası çalışma durumuna bağlı olarak ve ayrıca sensörlerden aldığı bilgiler doğrultusunda akıllı enerji yönetim algoritması bütün sistemin verimli ve güvenli bir şekilde kontrolünü gerçekleştirmektedir.

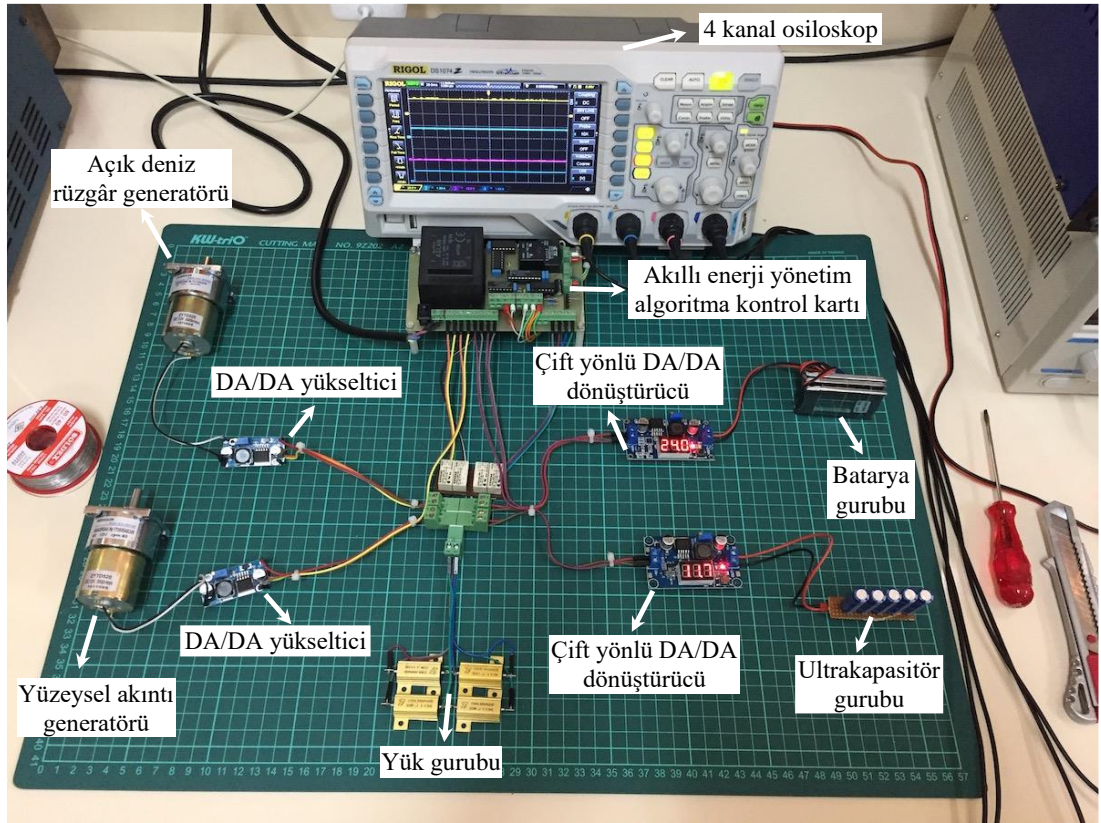
HGÜS ve HEDS'in tüm alt birimleriyle birlikte gösterimi Şekil 5.2'de ayrıntılı olarak görülmektedir. Güç dönüştürücü devrelerinde bulunan sensör verileri AEYA için önemli olmakla birlikte bütün kararları bu verile bağlı olarak vermektedir. Sistemin DA bara gerilimi 24 V olarak belirlenmiştir. Enerji depolama için yalnızca bataryalar kullanılırsa; tepe yük taleplerini karşılayabilmesi için büyük güç değerlerine ulaşmak üzere büyük boyutlu depolama elemanı gerekir. Aynı şekilde sadece ultrakapasitör kullanılırsa, YEK'lerin ve yüklerin kesintili yapısıyla baş edebilmek üzere yüksek değerde enerji sağlayabilmesi için yine büyük boyutlu (fazla büyük) olması gerekmektedir. HGÜS yapısı düşünüldüğünde enerji depolama uygulamaları için batarya ve ultrakapasitör gibi depolama elemanlarının bir arada kullanımı daha uygun olmaktadır. Batarya ve ultrakapasitörlerin bir arada kullanıldığı HEDS oldukça umut vaad eden başarılı sistemler olmaktadır.

Şekil 5.3'de hibrit güç üretim ve hibrit enerji depolama sisteminin elektriksel kontrol devre fotoğrafı verilmektedir. Deneysel çalışmalarda rüzgâr ve akıntı türbinlerinde kullanılan 12 V DA gerilim çıkışlı redüktörlü generatörler kullanılmıştır. Rüzgâr türbini için 1/60 dönüştürme oranlı akıntı türbini için 1/10 dönüştürme oranlı redüktör seçilmiştir. Redüktör dönüştürme oranları Bölüm 4'te açıklandığı gibi İstanbul Boğazı'nın rüzgâr ve akıntı hızlarına göre belirlenmiştir. Rüzgâr ve akıntı türbin çıkışında bulunan DA/DA yükseltici devreler generatör çıkışındaki 12 V'u DA barada 24 V olacak şekilde yükseltmektedir. Enerji depolama birimi olan batarya gurubundan üç adet 3.7 V 1050 mAh Lityum iyon batarya kullanılarak 12 V gerilim seviyesi elde edilmiştir. Ultrakapasitör olarak Maxwell marka beş adet 2.7 V 10 F ultrakapasitör seri bağlanarak 13.5 V gerilime sahip bir gurup kullanılmıştır. Batarya ve ultrakapasitör çıkışında çift yönlü DA/DA dönüştürücü devreleri bulunmaktadır. Bu devreler sayesinde hem enerji depolama birimleri şarj deşarj edilmekte ve hem de 24 V DA bara gerilimi elde edilmektedir. Sistemde yük gurubu olarak direnç gurupları kullanılmıştır. Bu dirençler ile 10 W ve 20 W güç çekecek şekilde 15 Ω ve 30 Ω direnç gurubu tasarlanmıştır.



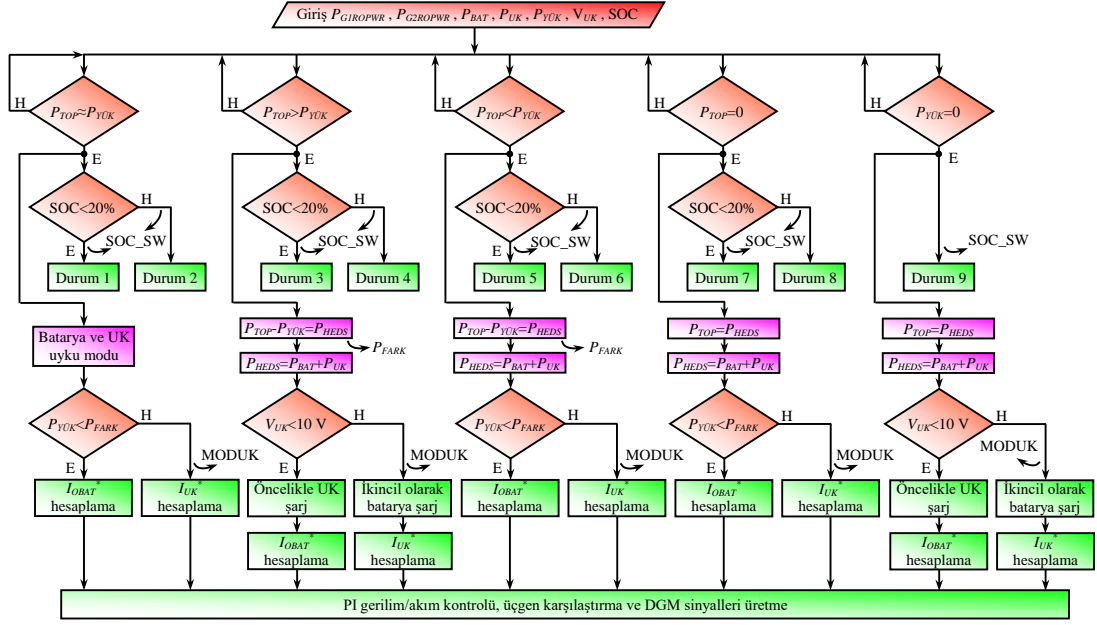
Şekil 5.2. HGÜS ve HEDS'in elektriksel tüm alt birimleri.

Batarya gurubunun doluluk durumunu tespit etmek için LTC4150 coulomb counter entegresi kullanılmıştır. Bu coulomb counter entegresi sayesinde batarya gurubunun doluluk durumu sistemde bulunan ana işlemciye gönderilmektedir. Son olarak sistemde bulunan bütün birimlerin kontrolünü sağlamak için akıllı AEYA kartı tasarlanmıştır. Bu AEYA kartında ana işlemci olarak PIC 18F4550 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Bu işlemciye sistemde bulunan bütün akım ve gerilim değerleri giriş olarak verilmektedir. Tez çalışması kapsamında yazılan AEYA yazılımı birimlerin çalışmasını sağlamaktadır.



Şekil 5.3. HGÜS ve HEDS'in deneysel fotoğrafı.

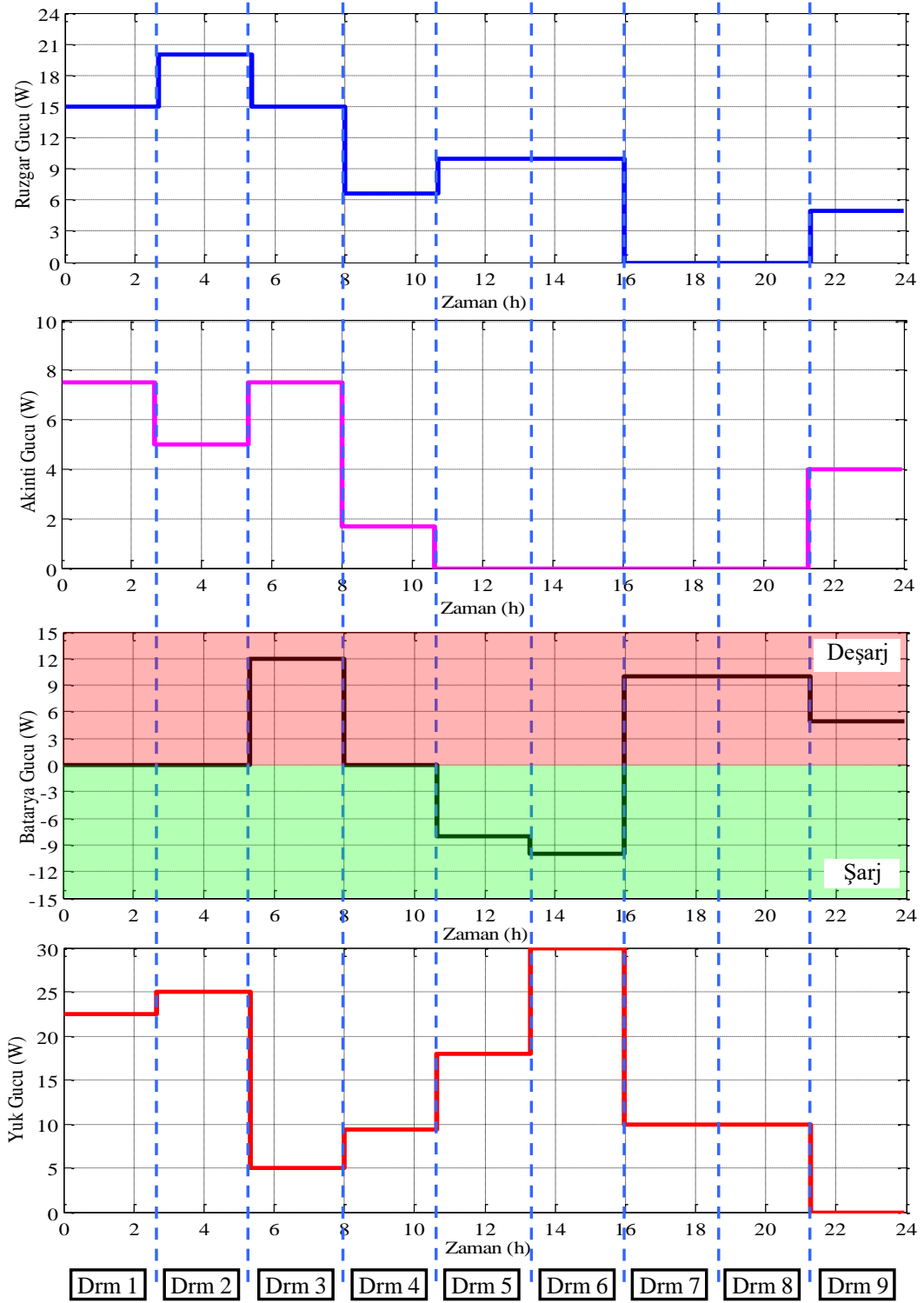
Tez çalışmasında kullanılan AEYA'nın akış diyagramı Şekil 5.4'de ayrıntılı olarak verilmektedir. AEYA sistemde bulunan mikrodenetleyiciye MicroC programı kullanılarak kodlanmıştır. AEYA'da batarya gurubunun şarj ve deşarj olması gereken akım değeri hesaplanmaktadır.



Şekil 5.4. Akıllı enerji yönetim algoritmasının akış diyagramı.

Şekil 5.5’de deneysel çalışmaların yapıldığı güç değerlerinin grafiği verilmektedir. Örnek olarak çalışma durumları bir günlük zaman diliminde temsil edilmiştir. Bu grafikte sırasıyla rüzgâr türbin, akıntı türbin, batarya ve yük gurubunun güç grafik dağılımı verilmektedir. Farklı çalışma güçlerinde dokuz olası çalışma durumu belirlenmiştir. Tez çalışma kapsamında geliştirilen AEYA’nın sistem dinamik davranışı bu güç grafiğiyle ayrıntılı olarak gözlenmektedir. Sistemde bulunan batarya gurubu olası çalışma durumlarına göre şarj deşarj edilerek devreye alınmaktadır.

Bir günlük güç grafiğiyle sistemin dinamik davranışları incelenmiştir. Durum 1’de açık deniz rüzgâr türbininden 15 W, yüzeysel akıntı türbininden 7.5 W güç üretilmektedir. Yük gurubunun gücü 22.5 W’tır ve batarya gurubu pasif durumdadır. Durum 2’de açık deniz rüzgâr türbininden 20 W, yüzeysel akıntı türbininden 5 W güç elde edilmektedir. Batarya gurubunun SOC değeri yüksek olduğundan pasif durumdadır. Yük gurubu 25 W’tır ve HGÜS tarafından enerjisi karşılanmaktadır. Durum 3’de ise açık deniz rüzgâr türbininden 15 W, yüzeysel akıntı türbininden 7.5 W güç üretildiği durumda yük gurubu 5 W güç talep etmektedir. Batarya gurubunun SOC değeri düşük olduğundan 12 W ile şarj olmaktadır. Durum 4’de açık deniz rüzgâr türbininden 6.6 W, yüzeysel akıntı türbininden 1.7 W güç üretilirken yük gurubu 9.3 W güç çekmektedir.



Şekil 5.5. Çalışma durumlarının bir günlük güç grafiği dağılımı.

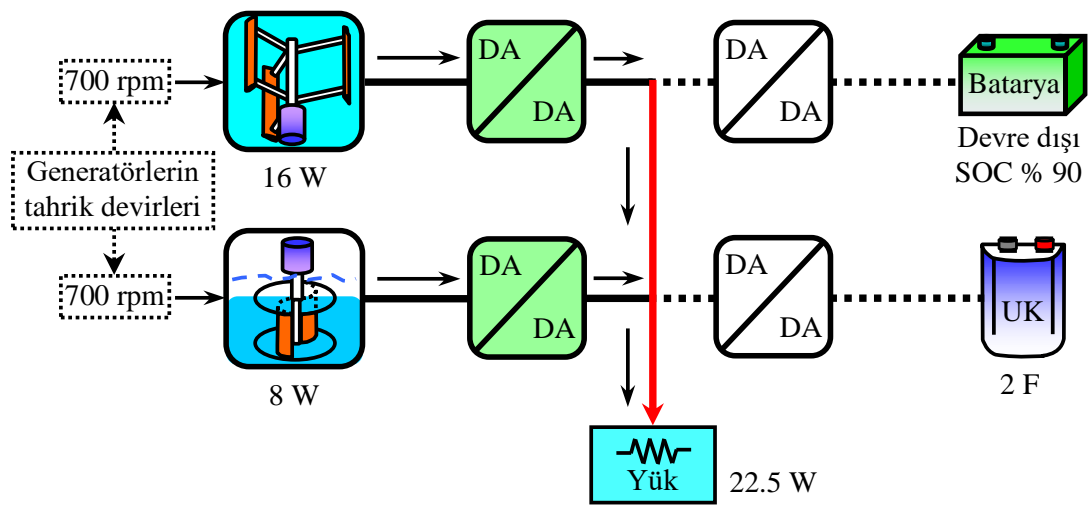
Batarya grubunun SOC değeri yüksek olduğundan pasif durumdadır. Durum 5 ve Durum 6 arasında sadece batarya doluluk durumu farkı vardır. Bu durumda açık deniz rüzgâr türbini 15 W, yüzeysel akıntı türbini 0 W güç üretilmektedir. Yük grubu 18

W'tan 30 W'a çıkmaktadır ve ultrakapasitör gurubu batarya gurubuna destek olmaktadır. Durum 7 ve Durum 8 arasında yalnızca batarya doluluk durumu farkı bulunmaktadır. Bu iki durumda açık deniz rüzgâr türbini ve yüzeysel akıntı türbininin pasif olduğu durum incelenmiştir. Yük gurubu 10 W güç talep etmektedir ve bu güç batarya gurubu tarafından karşılanmaktadır. Durum 9'da açık deniz rüzgâr türbininden 5 W, yüzeysel akıntı türbininden 4 W güç üretilmektedir. Yük gurubu güç talep etmemektedir ve üretilen bütün güç enerji depolama birimine aktarılmaktadır.

5.1. HİBRİT SİSTEMİN DENEYSEL SONUÇLARI

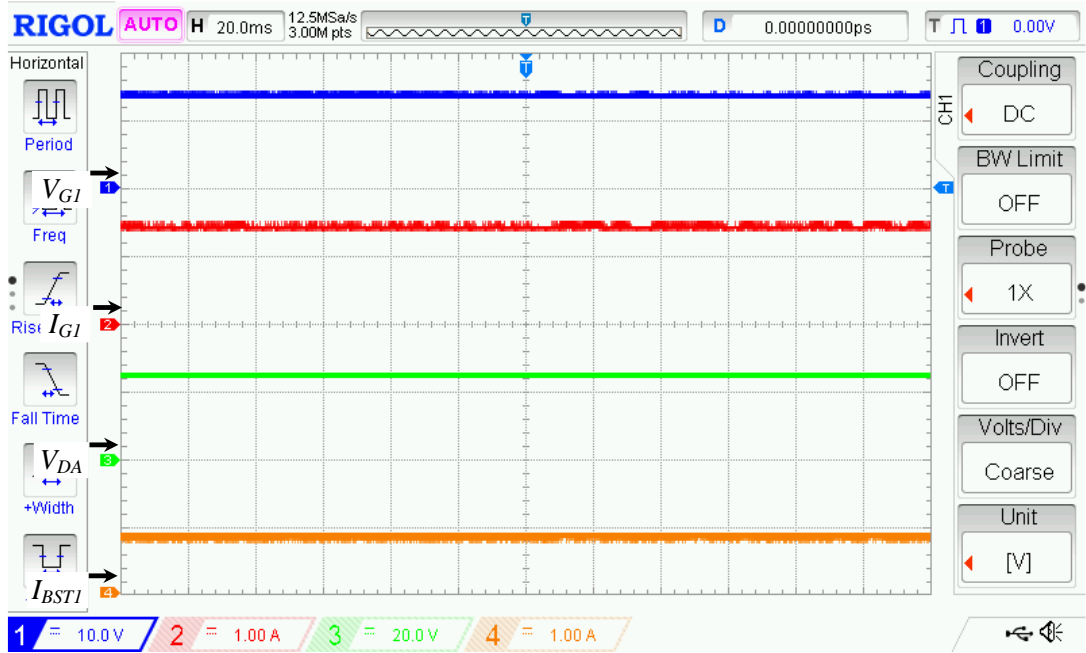
5.1.1. Durum 1 ve Durum 2 için Deneysel Sonuçları

HGÜS ve HEDS ilk olası durumları olan Durum 1 ve Durum 2 arasında sadece enerji depolama birimlerinin doluluk durum farkı bulunmaktadır. Bu yüzden Durum 1 ve Durum 2 için tek bir deneysel sonuç alınmıştır. Durum 1'de batarya doluluk durumu düşük iken Durum 2'de batarya doluluk durumu yüksektir. Her iki durumda da rüzgâr ve akıntı türbinlerinden üretilen güç yük gücüne yaklaşık olarak eşit olduğundan batarya ve ultrakapasitör pasif durumdadır. Durum 1 ve Durum 2 için deneysel sonuçların güç akış şeması Şekil 5.6'da verilmektedir.



Şekil 5.6. Durum 1 ve Durum 2 için deneysel sonuçların güç akış şeması.

Şekil 5.7’de Durum 1 ve Durum 2 için rüzgâr türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları verilmektedir. Rüzgâr türbin generatör çıkışı gerilimi 13 V, akımı 1.23 A ve elde edilen güç 16 W’ır. Generatör çıkışında bulunan DA/DA yükseltici devresi DA bara 24 V olacak şekilde anahtarlamaktadır. DA/DA yükseltici devre çıkış gerilimi 24 V, akımı 0.62 A’dır. Rüzgâr türbin generatöründen sisteme DA/DA yükseltici kayıplarından sonra toplamda 15 W enerji aktarılmaktadır.

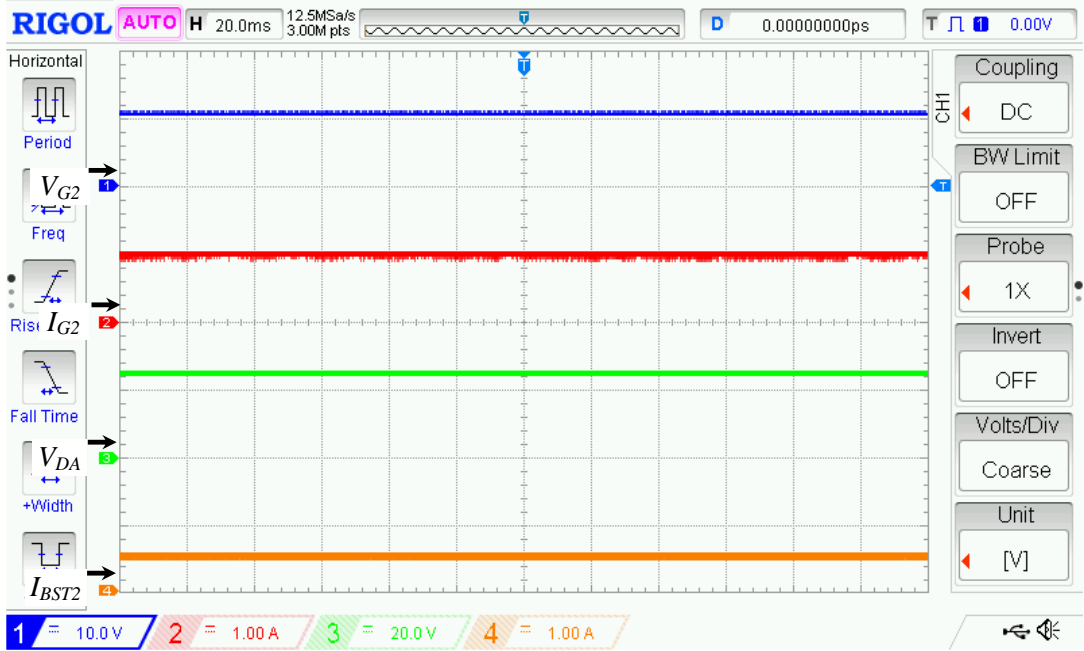


Şekil 5.7. Durum 1 ve Durum 2 için rüzgâr türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları.

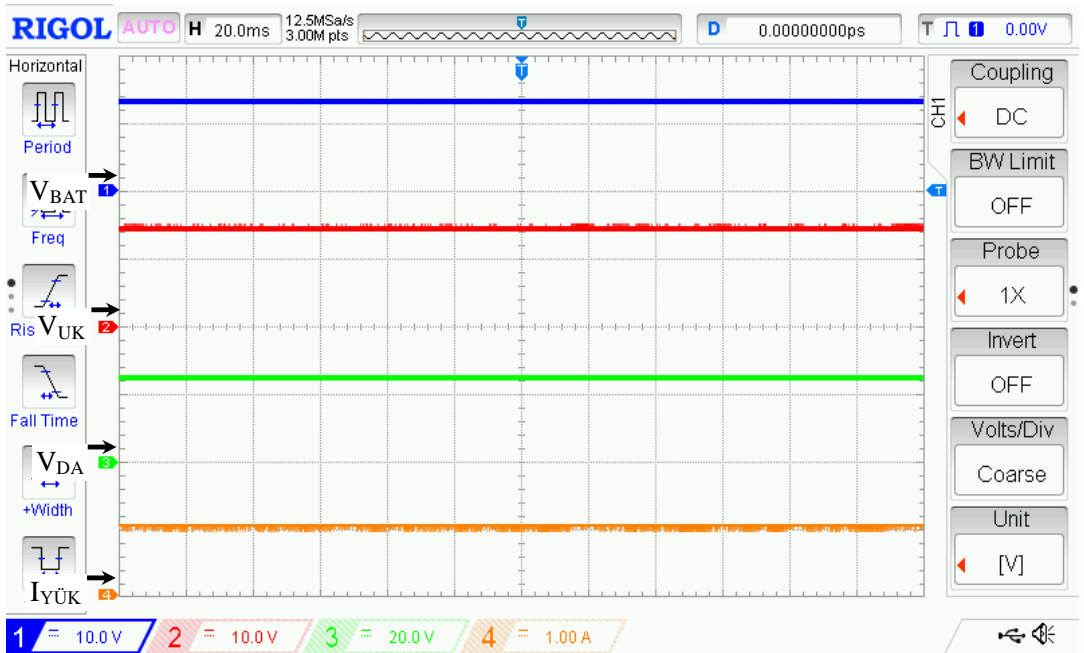
Şekil 5.8’de Durum 1 ve Durum 2 için akıntı türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları verilmektedir. Akıntı türbin generatör çıkışı gerilimi 10 V, akımı 0.8 A ve elde edilen güç 8 W’ır. DA/DA yükseltici devre çıkış gerilimi 24 V, akımı 0.31 A’dır. Rüzgâr türbin generatöründen sisteme toplamda 7.5 W enerji aktarılmaktadır. Sistemde bulunan hibrit güç üretim birimlerinin ikisinden de güç aktarımı sağlanmaktadır.

Şekil 5.9’da Durum 1 ve Durum 2 için sırasıyla batarya, ultrakapasitör, DA bara gerilimi ve yükün çekmiş olduğu akım verilmektedir. Yük DA baraya direkt olarak bağlı olduğundan yük gerilimi DA bara gerilimine eşittir. Yük bu durumda 22.5 W güç çekmektedir. HGÜS tarafından üretilen güç miktarı yükün talep etmiş olduğu

güce yaklaşık olarak eşit olduğundan batarya ve ultrakapasitör gurubu pasif durumdadır. Batarya gurubunun doluluk durumu % 90, gerilimi 12.5 V ve ultrakapasitör gurup gerilimi ise 13 V'tur.



Şekil 5.8. Durum 1 ve Durum 2 için akıntı türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları.



Şekil 5.9. Durum 1 ve Durum 2 için batarya, ultrakapasitör, yük gerilim ve akımları.

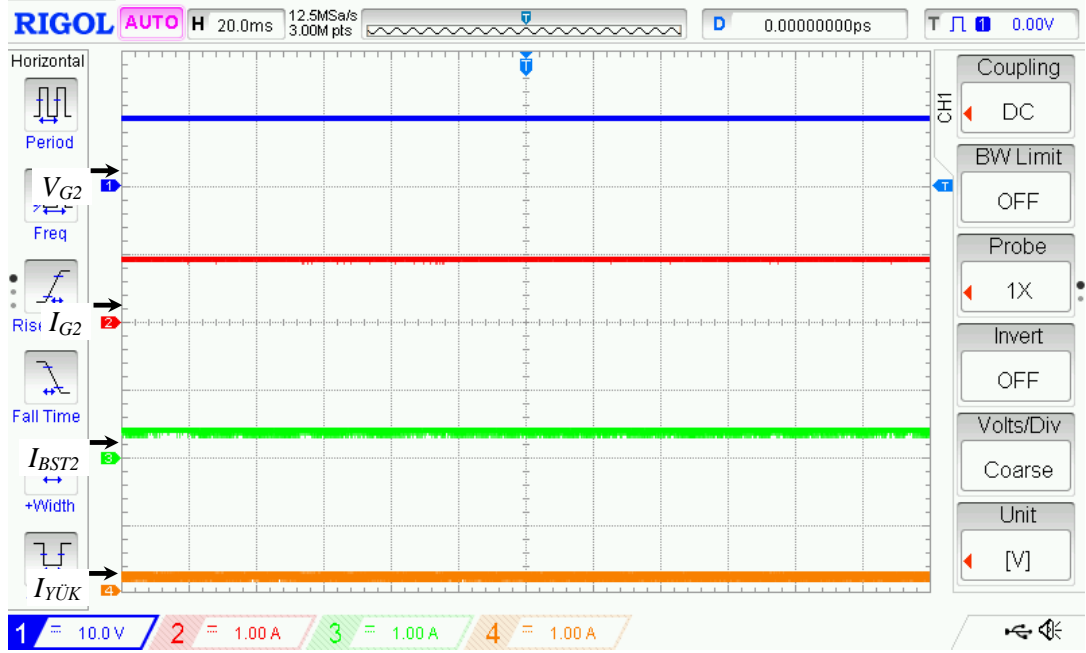
yüke kalan güç ise HEDS'e aktarılmaktadır. Yük gurubu bu durumda 24 V gerilimde 0.2 A akım çekmektedir.

Şekil 5.13'de Durum 3 için batarya gurubuna bağlı bulunan DA/DA çift yönlü dönüştürücü devresinin giriş/çıkış akım ve gerilim sonuçları verilmektedir. DA/DA çift yönlü dönüştürücü bataryanın şarj olmasını sağlamaktadır. 24 V olan DA bara gerilimini bataryanın şarj olması gereken gerilim değerine düşürerek batarya gurubunu 11.2 V ile şarj etmektedir. Bu durumda DA baradan 0.5 A akım çekilirken batarya gurubu 1 A ve 11.1 W ile şarj edilmektedir.

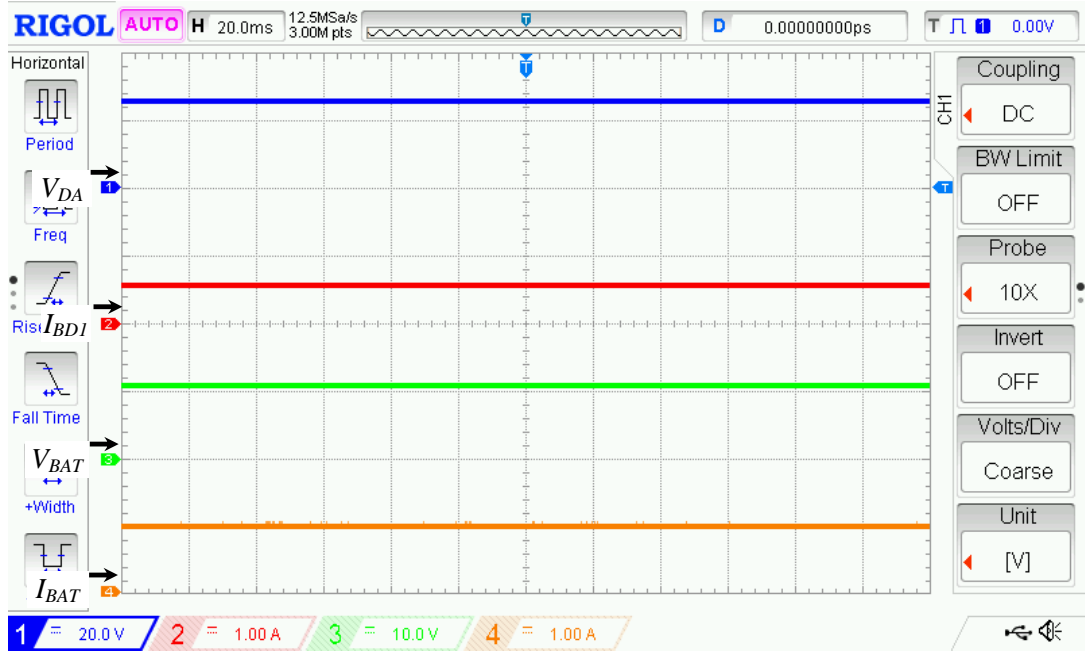
Şekil 5.14'de Durum 3 için ultrakapasitörün ve çift yönlü DA/DA dönüştürücünün akım, gerilim sonuçları verilmektedir. Ultrakapasitör gurubuna bağlı bulunan DA/DA çift yönlü dönüştürücü devresi yaklaşık olarak 5 W bir güç ile şarj etmektedir. Ultrakapasitör gurup gerilimi 6.5 V akımı 0.78 A'dan başlayarak hızlı bir şekilde şarj olmaktadır. Ultrakapasitör gurubu batarya gurubuna göre çok daha hızlı bir şekilde şarj olduğu bu durumda ayrıntılı olarak görülmektedir.



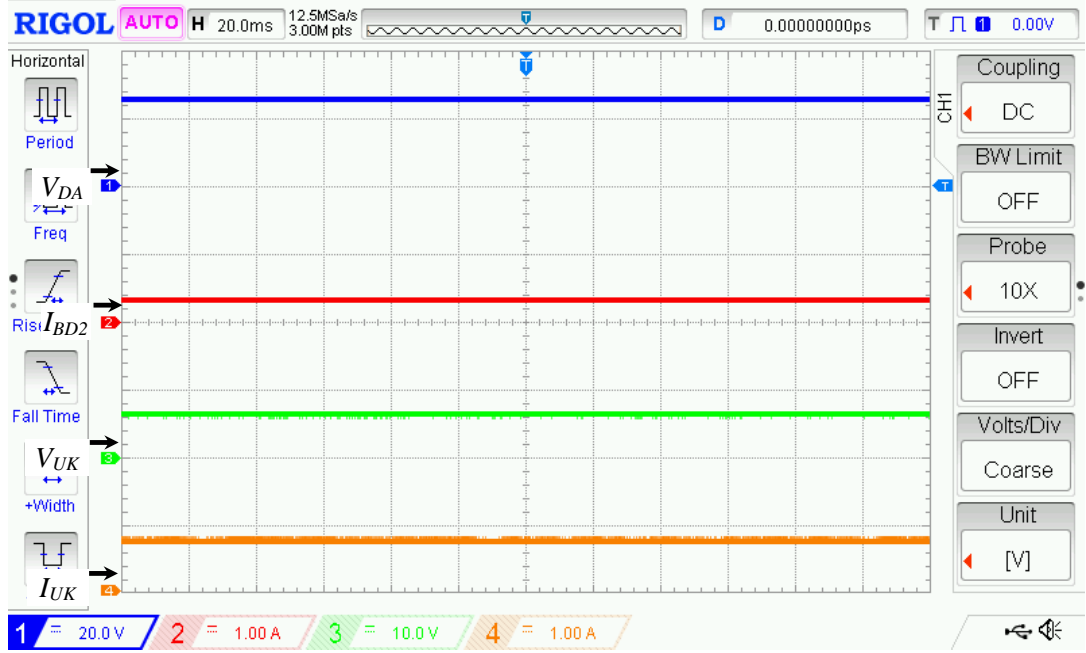
Şekil 5.11. Durum 3 için rüzgâr türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları.



Şekil 5.12. Durum 3 için akıntı türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları.



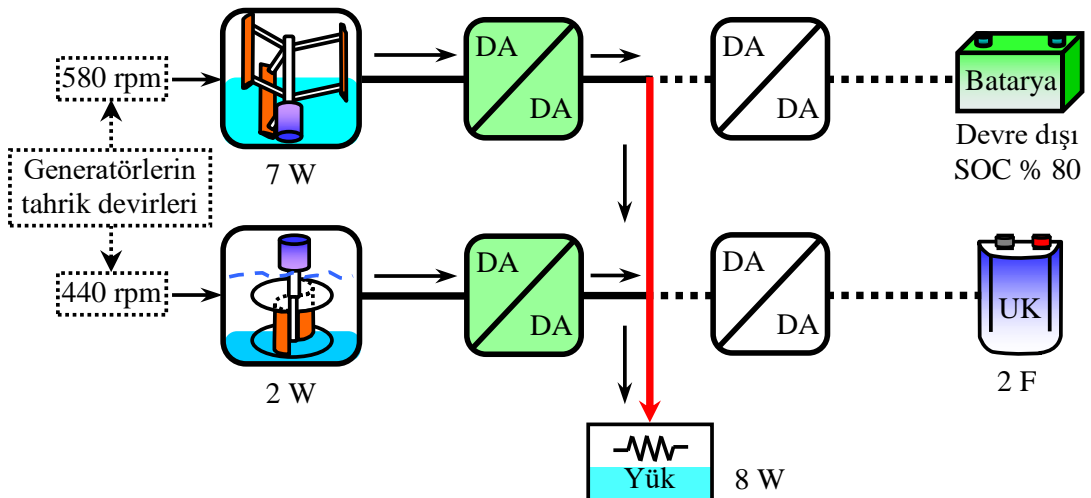
Şekil 5.13. Durum 3 için batarya, çift yönlü DA/DA dönüştürücü çıkış gerilim ve akımları.



Şekil 5.14. Durum 3 için ultrakapasitör, çift yönlü DA/DA dönüştürücü çıkış gerilim ve akımları.

5.1.3. Durum 4 için Deneysel Sonuçları

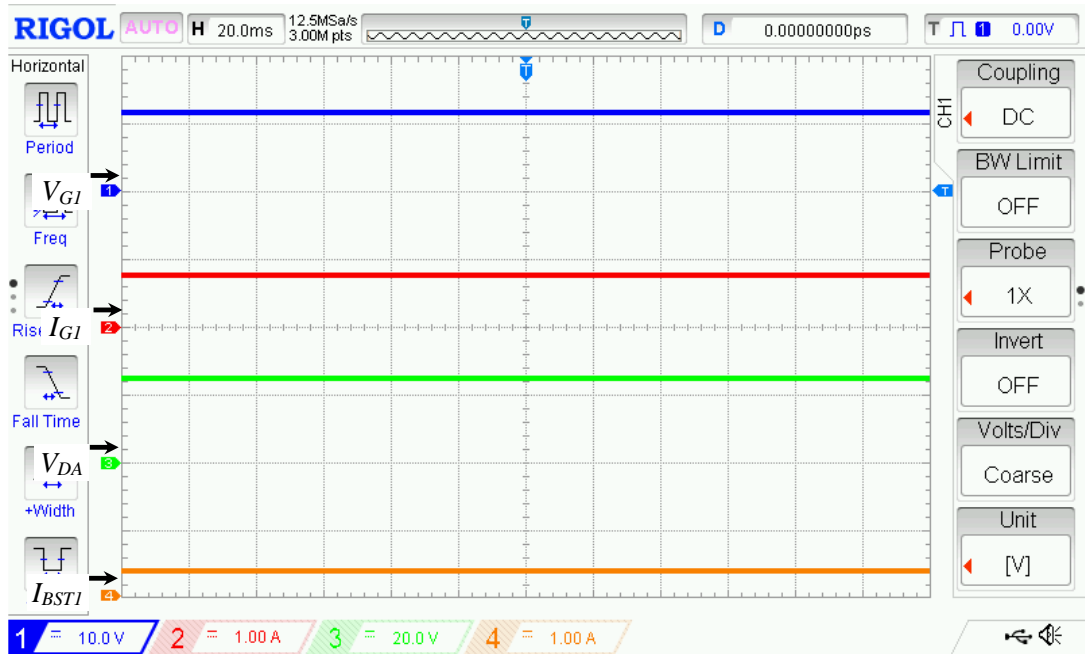
Şekil 5.15’de Durum 4 için deneysel sonuçların güç akış diyagramı verilmektedir. Bu durumda rüzgâr türbin generatörü 7 W, akıntı türbin generatörü 2 W güç üretmektedir. Batarya ve ultrakapasitör gurubunun doluluk durumu yüksek olduğundan HEDS birimleri pasif durumdadır.



Şekil 5.15. Durum 4 için deneysel sonuçların güç akış şeması.

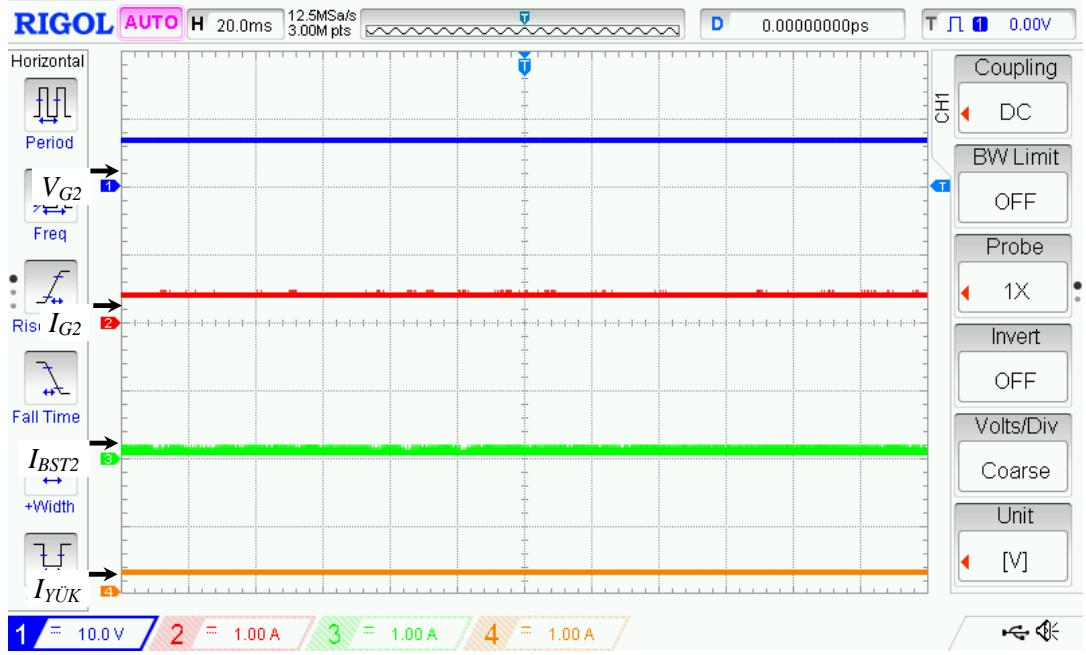
Rüzgâr ve akıntı türbin generatöründen yüksek bir güç üretilmektedir, fakat devrede alıcı olarak yalnızca yük bulunmakta ve gücü 8 W'tır. Kaynak tarafından fazla güç üretilmiş olursa dahi yalnızca yük talebi kadar enerji akışı olmaktadır.

Şekil 5.16'da Durum 4 için rüzgâr türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları verilmektedir. Rüzgâr türbin generatörü gerilimi 11 V, akımı 0.63 A ve gücü 7 W'tır. DA/DA yükseltici dönüştürücü devre çıkış gerilimi 24 V, akımı 0.27 A ve gücü 6.5 W'tır.



Şekil 5.16. Durum 4 için rüzgâr türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları.

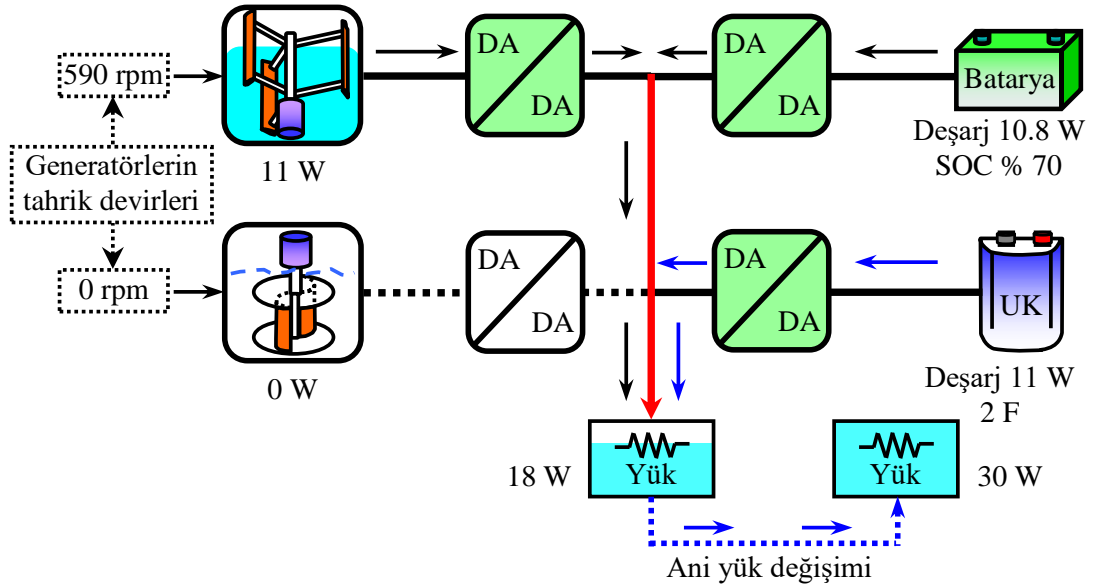
Şekil 5.17'de Durum 4 için sırasıyla akıntı türbin generatör gerilimi, akımı, DA/DA yükseltici çıkış akımı ve yük akımı verilmektedir. Bu durumda generatör çıkış gerilimi 6 V akımı 0.33 A ve gücü 2 W'tır. DA/DA yükseltici dönüştürücü çıkış akımı 0.06 A'dir. Yük bu durumda yalnızca 8 W talep etmektedir. HGÜS daha fazla güç üretmiş olsa dahi sistemde alıcı bulunmadığı için yük gücü kadar güç aktarılacaktır.



Şekil 5.17. Durum 4 için akıntı türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkışı, yük gerilim ve akımları.

5.1.4. Durum 5 ve Durum 6 için Deneysel Sonuçları

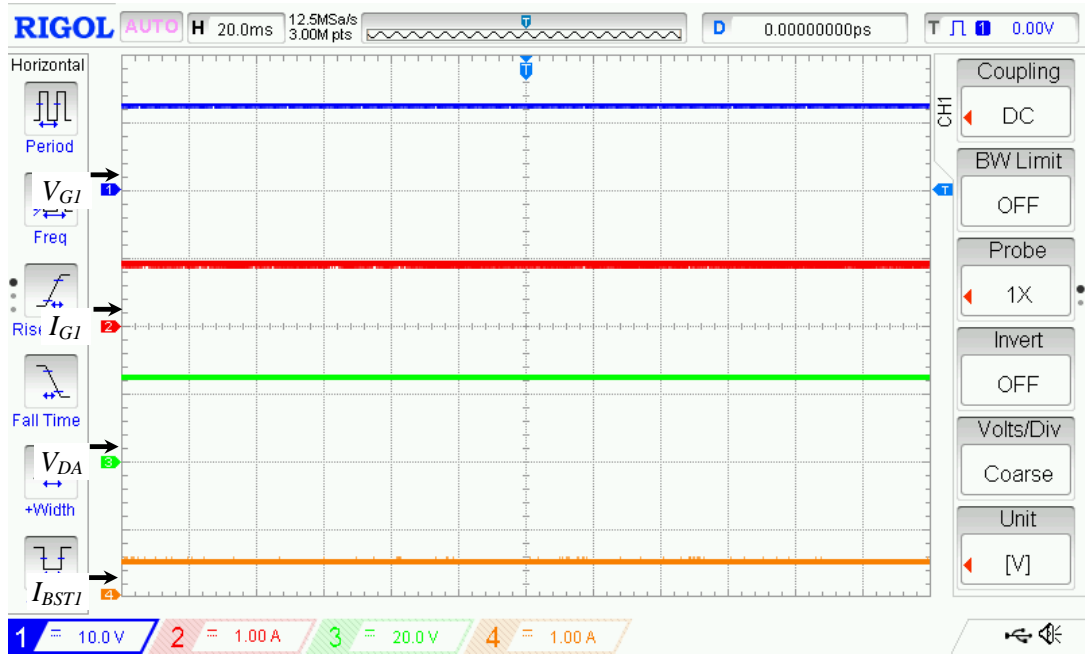
Şekil 5.18’de Durum 5 ve Durum 6 için deneysel sonuçların güç akış şeması verilmektedir. Bu durumda sistemin dinamik davranışı gözlenmektedir.



Şekil 5.18. Durum 5 ve Durum 6 ani yük değişim için deneysel sonuçların güç akış şeması.

Bu durumda sistemde bulunan yük gurubunun talep ettiği güç değeri 18 W'tan 30 W'a çıkartılmaktadır. Yükün ani değişiminin incelendiği bu durumda ultrakapasitör gurubu devreye girerek bataryanın derin deşarj olmasını önleyerek batarya çevriminin uzatılmasına destek olmaktadır. Sistemde bulunan AEYA ani yük değişimini algılayarak ultrakapasitör gurubunu devreye almaktadır. Durum 5 ve Durum 6'da rüzgâr türbin generatörü 11 W güç üretmekte ve yük 18 W güç talep etmektedir. Batarya gurubu, rüzgâr türbin generatörüne destek olarak 10.8 W ile deşarj olarak yük gurubunu beslemektedir.

Şekil 5.19'da Durum 5 ve Durum 6 için rüzgâr türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları verilmektedir. Rüzgâr türbin genaratör çıkışı gerilimi 12 V, akımı 0.9 A ve elde edilen güç 11 W'tır. DA/DA yükseltici devre çıkış gerilimi 24 V, akımı 0.41 A'dır. Rüzgâr türbin generatöründen sisteme DA/DA yükseltici ile toplamda 10 W enerji aktarılmaktadır.

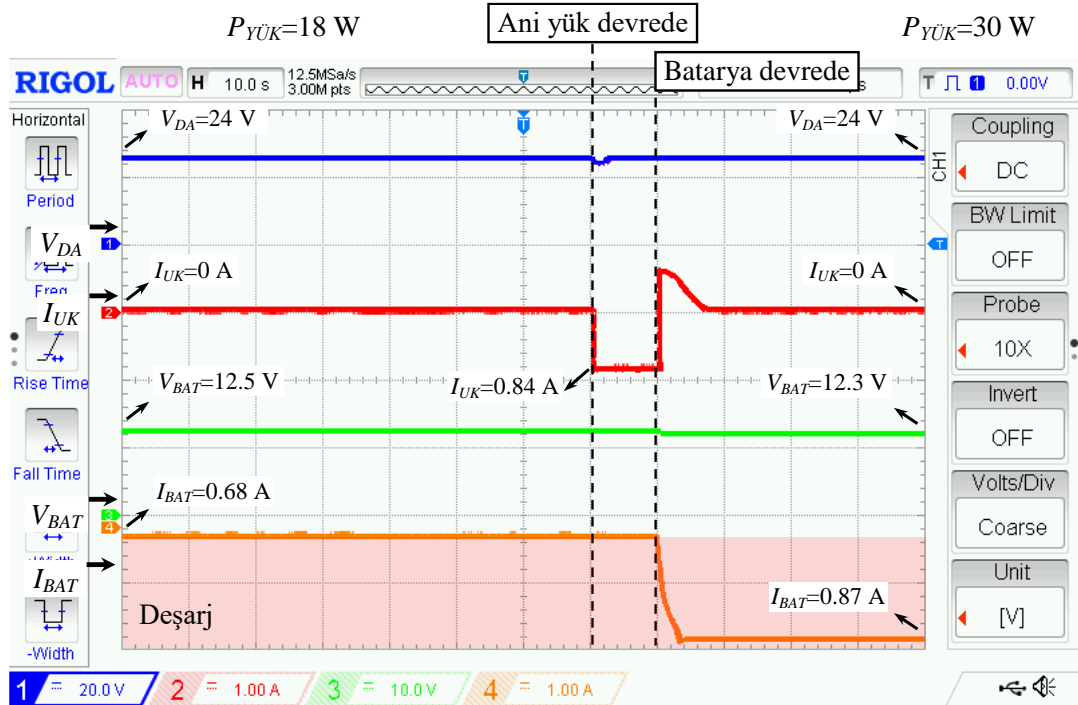


Şekil 5.19. Durum 5 ve Durum 6 için rüzgâr türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları.

Şekil 5.20'de Durum 5 ve Durum 6 için ani yük değişimi sırasında DA bara, batarya gurup gerilimi, ultrakapasitör, batarya gurup akım osiloskop ekran sonuçları verilmektedir. Bu durumda devreye aniden bir yük gurubu girmesiyle sistemin

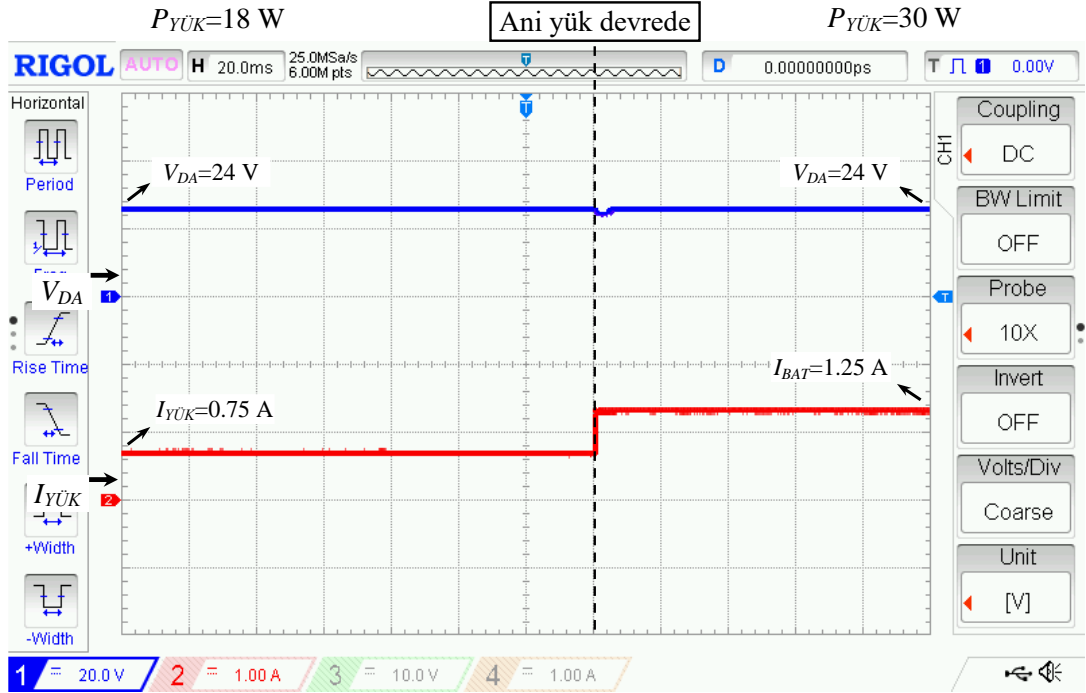
dinamik davranışı incelenmiştir. DA bara gerilimi 24 V'dir ve ani yük değişim sırasında dalgalanmanın olmadığı gözlenmektedir. Ultrakapasitör grup akımı normalde 0 A'dır, yükün devreye girdiği anda AEYA algılayarak ultrakapasitör gurubunu devreye almaktadır ve 0.84 A ile deşarj olmaktadır.

AEYA ani yük geçişinin hemen ardından batarya gurubunu devreye alarak talep gücün sürekliliğini sağlamaktadır. Bu ani yük geçiş süreci batarya gurubuna aktarıldıktan sonra ultrakapasitör gurubu deşarj olduğu gücü DA baradan geri alarak şarj olmakta ve ultrakapasitör akımı 0 A düşmektedir. Batarya gurubu başlangıçta 0.68 A ile deşarj olurken ani yük geçişinden sonra deşarj akımı 0.87 A olmaktadır. Batarya gurup gerilimi 12.5 V ile deşarj olurken ani yük artışından sonra 12.3 V gerilimde deşarj olmaya devam etmektedir. Durum 5'ten Durum 6'ya ani yük artış geçişi ile HEDS'in katkısı ayrıntılı olarak gözlenmektedir. Ultrakapasitör gurubu, ani yük geçişinde batarya gurubuna destek olmakta ve bataryanın derin deşarj olmasını engellemektedir. Hibrit sistemdeki DA bara ve yük dalgalanmalarının önüne geçilmektedir.



Şekil 5.20. Durum 5 ve Durum 6 için ani yük değişimi sırasında batarya, ultrakapasitör çıkış gerilim ve akımları.

Şekil 5.21’de Durum 5 ve Durum 6 için ani yük değişimi sırasında yük gerilim ve akım osiloskop sonuçları verilmektedir. Ultrakapasitör gurubu sayesinde DA bara geriliminde bir dalgalanma oluşmamaktadır. Yük gurubu ani yük geçişinde 0.75 A, 18 W’tan 1.25 A 30 W’a artmaktadır.

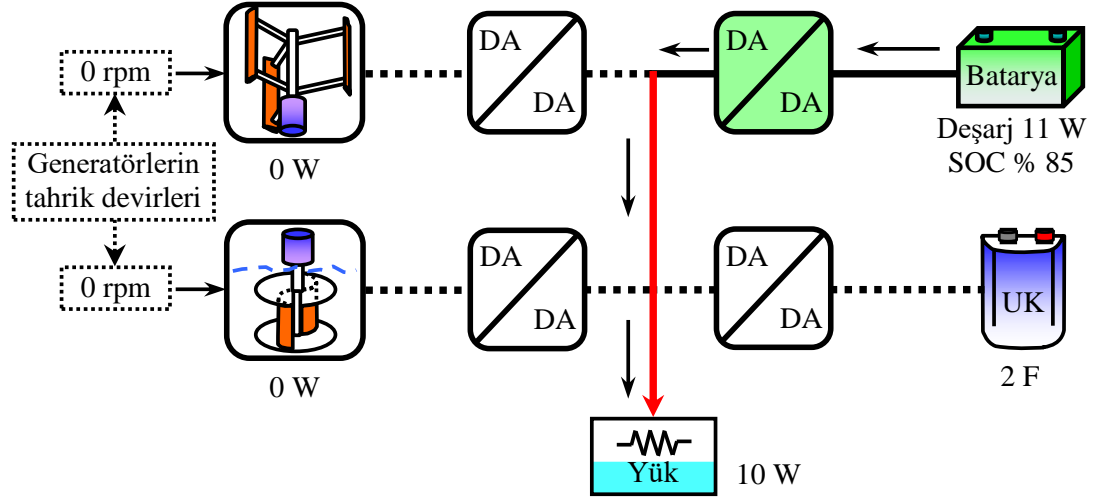


Şekil 5.21. Durum 5 ve Durum 6 için ani yük değişimi sırasında yük gerilim ve akımı.

5.1.5. Durum 7 ve Durum 8 için Deneysel Sonuçları

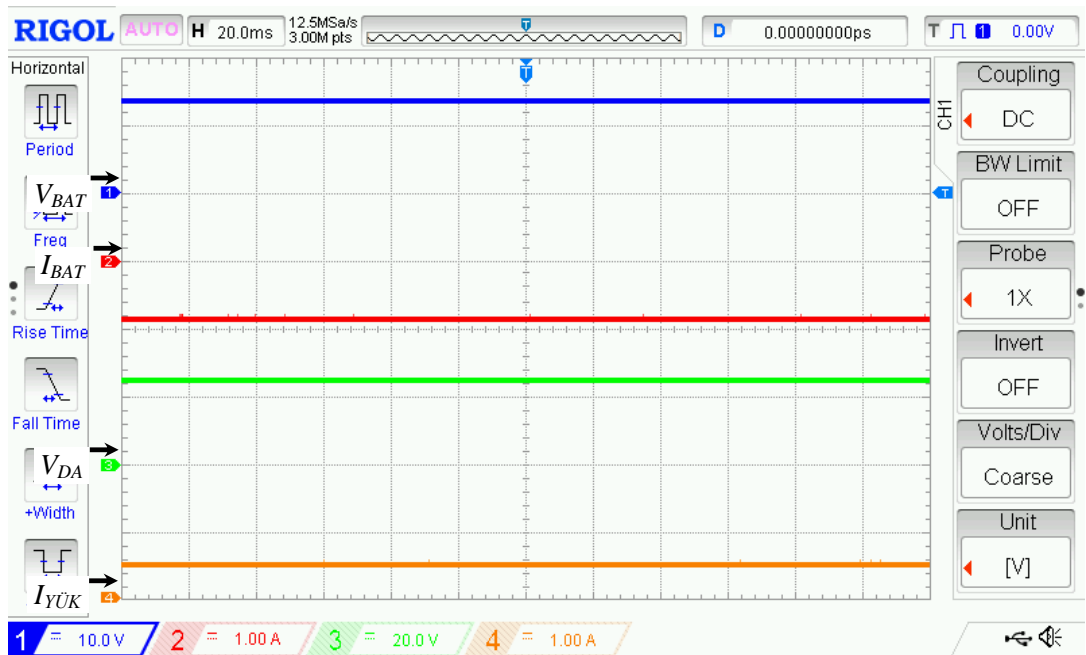
Durum 7 ve Durum 8’de rüzgâr türbin generatörü ve akıntı türbin generatöründen herhangi bir güç elde edilememektedir. Durum 7 ve Durum 8 arasındaki tek fark batarya gurubunun doluluk seviyesidir. Bu olası çalışma durumlarında batarya SOC değeri % 20’nin altına düştüğünde batarya gurubu pasif duruma getirilmekte ve çok fazla deşarj edilmesinin önüne geçilmektedir. Böylece batarya gurubunun çevrim ömrü arttırılabilmektedir. Generatörlere bağlı bulunan DA/DA yükseltici devreleri pasif durumdadır. Sisteme bağlı bulunan yük gurubu 10 W güç talep etmektedir. Bu durumda enerji depolama birimindeki batarya gurubu yükün talep etmiş olduğu gücü karşılamaktadır. 11 W ile deşarj olan batarya gurubunun doluluk durumu % 85

seviyesindedir. Şekil 5.22’de Durum 7 ve Durum 8 için deneysel sonuçların güç akış diyagramı verilmektedir.



Şekil 5.22. Durum 7 ve Durum 8 için deneysel sonuçların güç akış şeması.

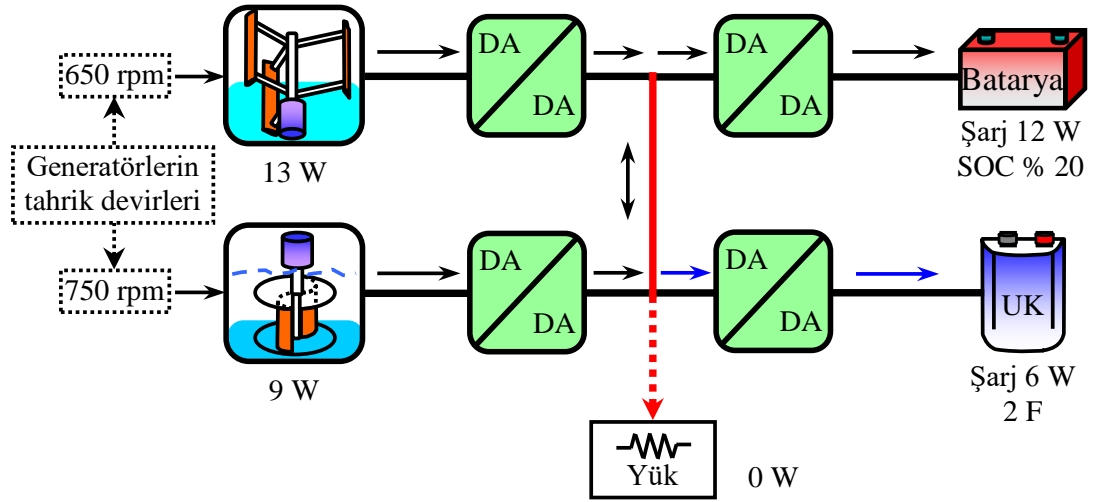
Şekil 5.23’de Durum 7 ve Durum 8 için sırasıyla batarya gerilimi ve akımı, DA bara gerilimi ve yük akımı verilmektedir. Batarya grup gerilimi 12.7 V, akımı 0.86 A ve deşarj gücü 11 W’tır. DA bara gerilimi 24 V’ta sabittir ve bu gerilim altında yük 0.41 A çekerek 10 W güç talep etmektedir.



Şekil 5.23. Durum 7 ve Durum 8 için batarya, yük gerilim ve akımları.

5.1.6. Durum 9 için Deneysel Sonuçları

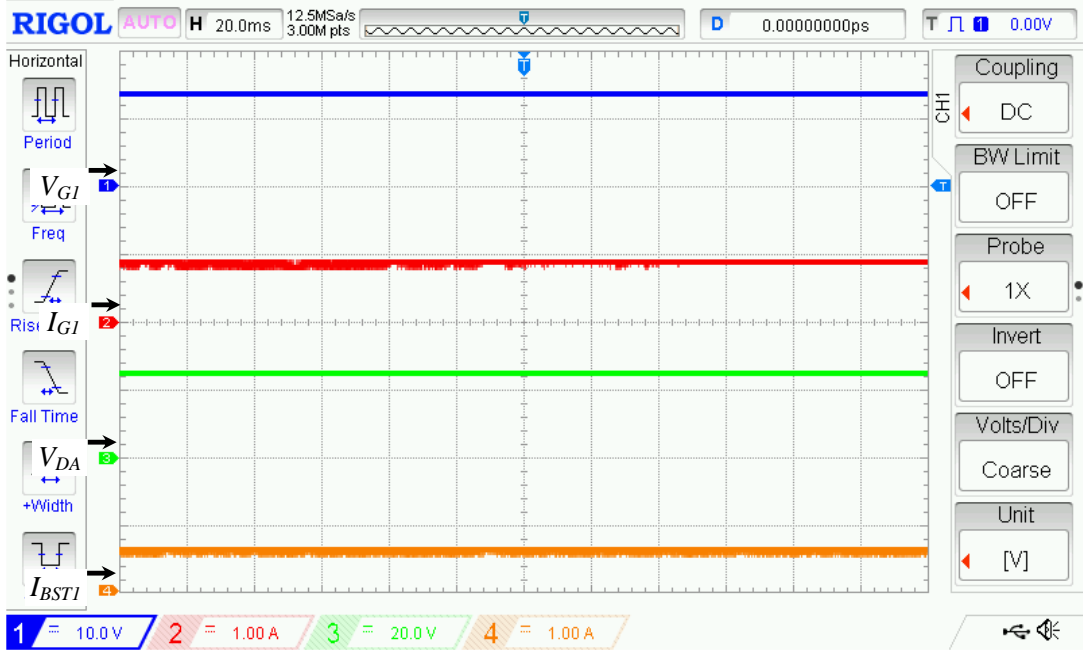
Şekil 5.24’de Durum 9 için deneysel sonuçların güç akış diyagramı verilmektedir. Bu durumda rüzgâr türbin generatörü 13 W ve akıntı türbin generatörü 9 W güç üretmektedir. Sistemde bulunan yük pasif durumdadır. HEDS’lerin doluluk durumu düşük olduğundan AEYA bu birimlerin şarj edilmesini sağlamaktadır. Batarya gurubu 12 W ile ultrakapasitör gurubu ise 6 W ile şarj edilmektedir.



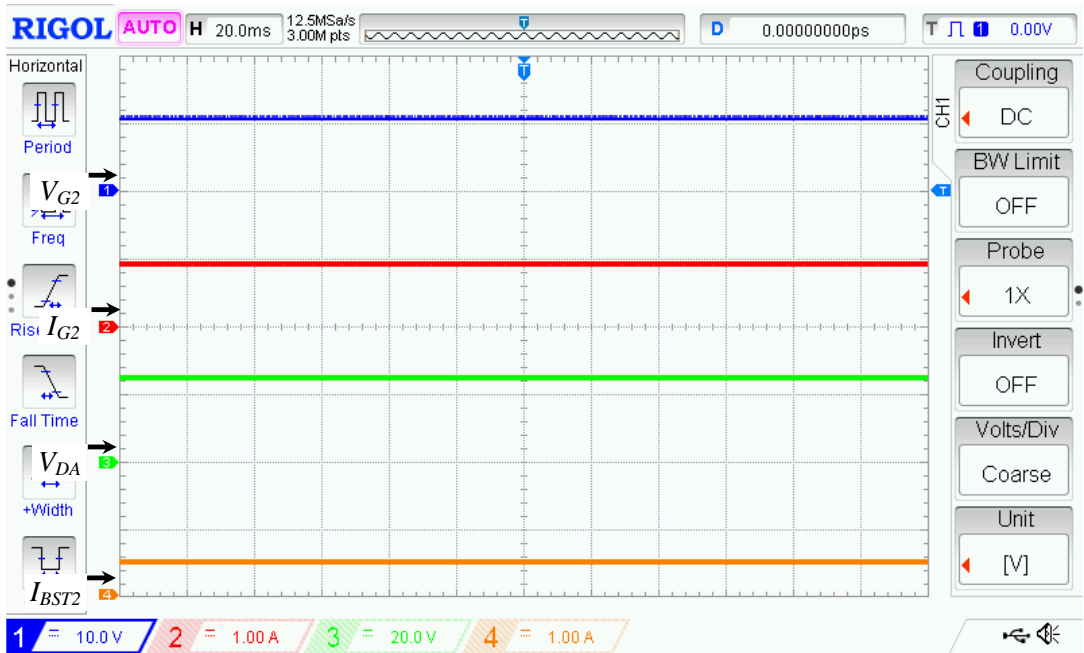
Şekil 5.24. Durum 9 için deneysel sonuçların güç akış şeması.

Şekil 5.25’de Durum 9 için rüzgâr türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları verilmektedir. Rüzgâr türbin generatör çıkışı gerilimi 13 V, akımı 1 A ve elde edilen güç 13 W’tır. DA/DA yükseltici devre çıkış gerilimi 24 V, akımı 0.5 A’dır. Rüzgâr türbin generatöründen sisteme DA/DA yükseltici kayıplarından sonra toplamda 12 W enerji aktarılmaktadır. Şekil 5.26’da Durum 9 için akıntı türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları verilmektedir. Akıntı türbin generatör çıkış gerilimi 10 V, akımı 0.9 A ve gücü 9 W’tır. DA/DA yükseltici devre çıkış akımı 0.33 A ve 8 W olarak DA baraya gücü aktarmaktadır. Şekil 5.27’de Durum 9 için sırasıyla batarya gurup gerilimi, akımı ve ultrakapasitör gerilim, akım osiloskop ekran görüntüsü verilmektedir. Bu durumda batarya gurubu 11 V gerilim, 1.1 A akım ve 12 W güç ile şarj edilmektedir. Aynı şekilde ultrakapasitör gurubu da şarj edilmektedir. Ultrakapasitör şarj gerilimi 5.6 V, akımı 1.07 A ve gücü 6 W’tır. Çizelge 5.1’de tez çalışması kapsamında dokuz olası çalışma durumlarının deneysel

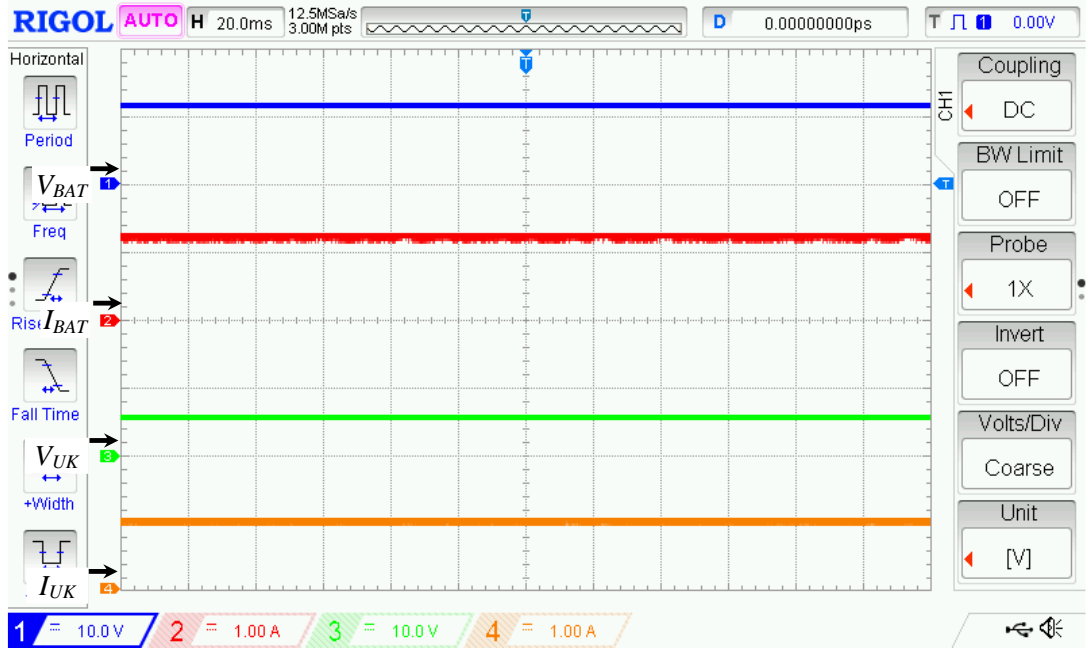
güç sonuçları verilmektedir. Dokuz olası çalışma durumunda rüzgâr türbini, akıntı türbini, batarya gurubu, ultrakapasitör gurubu ve yükün çalışma durumu o durumdaki güç değerleri ayrıntılı olarak incelenmektedir.



Şekil 5.25. Durum 9 için rüzgâr türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları.



Şekil 5.26. Durum 9 için akıntı türbin generatör, DA/DA yükseltici çıkış gerilim ve akımları.



Şekil 5.27. Durum 9 için batarya, ultrakapasitör gerilim ve akımları.

Çizelge 5.1. HGÜS ve HEDS olası çalışma durumlarındaki güç değerleri.

Durumlar	Rüzgâr türbin durumu	Akıntı türbin durumu	Batarya gurup durumu	Ultrakapasitör gurup durumu	Yük gurup durumu
Durum 1	16 W	8 W	Pasif SOC % 20	Pasif 2 F	22.5 W
Durum 2	20.8 W	6 W	Pasif SOC % 90	Pasif 2 F	25 W
Durum 3	16 W	8 W	Şarj SOC % 30	Şarj 5.1 W	5 W
Durum 4	7 W	2 W	Pasif SOC % 80	Pasif 2 F	8 W
Durum 5	11 W	0 W	Deşarj SOC % 70	Pasif 2 F	18 W
Durum 6	11 W	0 W	Deşarj SOC % 70	Deşarj 11 W	30 W
Durum 7	0 W	0 W	Deşarj SOC % 85	Pasif 2 F	10 W
Durum 8	0 W	0 W	Deşarj SOC % 85	Pasif 2 F	10 W
Durum 9	13 W	9 W	Şarj SOC % 20	Şarj 6 W	0 W

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Tez çalışmasında açık deniz rüzgâr ve yüzeysel akıntı enerjisi birlihte kullanılarak hibrit bir güç üretim platformu gerçekleştirilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının birlikte kullanılması ile hibrit bir yapı oluşturulmuştur. Yenilenebilir enerji kaynaklarının doğası gereği güç karakteristikleri kesintili ve karasızdır. Bu çıkış karakteritiğini ortadan kaldırmak için enerji depolama birimleri kullanılmaktadır. Tez çalışmasında enerji depolama biriminde batarya ve ultrakapasitör birlikte kullanılmıştır. Batarya uzun süreli enerji ihtiyacını karşılarken, ultrakapasitör anlık güç ihtiyacını karşılamaktadır. Tez çalışmasında hibrit güç üretim sistemi ve hibrit enerji depolama birimi entegrasyonu sağlanmıştır. Bu hibrit sistemlerin kontrolü için tez çalışmasının özgün noktası olan akıllı enerji yönetim algoritması geliştirilmiştir. Bu akıllı enerji yönetim algoritması sistemin olası çalışma durumlarını anlık olarak izleyerek optimum güç kontrolü sağlamaktadır. Sistem dinamik davranışını gözlemlemek için dokuz adet olası çalışma durumu çıkartılmıştır.

Tez çalışması kapsamında önerilen sistem için bütün birimlerin parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar yapıldıktan sonra MATLAB/Simulink ara yüzünde her bir sistem parçasının simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Gerekli ayarlamalar ve hesaplamalar sonucunda simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Öngörülen dokuz adet olası çalışma modu ele alınarak kendi aralarındaki geçişler dâhil bütün sonuçlar gözlenmiştir. Yenilenebilir enerji kaynağı olan HGÜS yapısında enerjinin depolanarak birincil yüklerin beslenmesini sağlar ve böylelikle kaliteli bir enerji aktarımı gerçekleştirilmektedir. Hibrit enerji depolama birimleri olan, batarya ve ultrakapasitör gurubunu birlikte kullanılmaktadır. Ani yük değişimlerinde ultrakapasitör gurubu devreye alınarak, batarya gurubunun ani yüklenme durumlarında derin deşarj olmasının önüne geçilmiştir. Böylece batarya gurubunun daha uzun ömürlü ve sağlıklı çalışması öngörülmektedir.

Önerilen sistemi oluşturan birimlerin gerçekleştirilmesi sırasında kanatların tasarımı ve üretimi, yüzer platformun üretimi, kontrol ve güç kartlarının tasarlanması, akıllı enerji yönetim algoritmasının yazılması, HGÜS ile HEDS birbirine entegrasyonu işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında önerilen sistemin üretimi için tasarım parametreleri hesaplanmıştır. Açık deniz rüzgâr kanat çeşidi olarak dikey H tipi darrieneus, yüzeysel akıntı enerjisinde ise yine dikey tip savonius kanat tipi kullanılmıştır. Darrieus ve Savonius türbin ölçüleri belirlenmiştir. Hesaplamalar yapıldıktan sonra sistem prototipi için Autodesk Fusion 360 çizim programıyla sistemin üç boyutlu olarak tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çizim programıyla tasarımı tamamlanan sistemin prototip sistem haline getirilmesi için Zortax M200 3D yazıcı modeli kullanılarak çıktısı alınmıştır. 3D yazıcının çok hassas tasarımları dahi çıktı alabilmesi sayesinde özgün bir türbin sistem tasarımı üretilmiştir. Türbin parçalarının montajı gerçekleştirilmiştir ve sistemde bulunan türbinlerin dönmesi için rulmanlar yerleştirilmiştir. Daha sonra sistem toplanarak boyanmıştır böylece prototip türbin üretimi tamamlanmıştır.

Deneysel çalışmalarda sabit mıknatıslı doğru akım generatörleri kullanılmıştır. Generatörler açık deniz rüzgâr türbinlerine 1/60 ve yüzeysel akıntı türbinlerine 1/10 dönüştürme oranlı redüktörler aracılığıyla bağlanmıştır. Açık deniz rüzgâr generatörü 20 W, yüzeysel akıntı enerjisi 10 W güç üretmektedir. Enerji depolama birimleri olan; batarya grubunda toplamda üç hücreli 11.1 V 1050 mAh kapasiteye sahip lityum iyon batarya, ultrakapasitör grubunda beş adet 13.5 V 2 F kapasiteye sahip Maxwell marka ultrakapasitör kullanılmıştır. Generatör ve enerji depolama birimleri tek bir DA barada 24 V olacak şekilde bağlanmıştır. Generatör birimlerinde dönüştürücü topolojisi olarak DA/DA yükseltici tip, batarya ve ultrakapasitör birimlerinde DA/DA çift yönlü dönüştürücü kullanılmıştır. Tezde önerilen sistem için özgün olarak akıllı enerji yönetim algoritması geliştirilmiştir. Sistemde bulunan bütün akım ve gerilimleri okuyup güçleri hesaplayacak oluşacak durumlara bağlı olarak birimlerin kontrolünü gerçekleştirmektedir. Burada akıllı enerji yönetim algoritması vermiş olduğu kararlarla sistemde bulunan birimlerin doğru, hızlı ve kararlı bir şekilde çalışmasına sağlamaktadır. Sistemde yük gurubu değişik güç

değerlerinde ve farklı zamanlarda devreye girerek dinamik bir yük karakteristiği elde edilmiştir. Bütün bu bağımsız durumlar altında sistemin bütün dinamik davranışları incelemek için bütün veriler kayıt altına alınmıştır.

Tez çalışması kapsamında sistemde bulunan güç devrelerinin tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Tezin özgün değerini oluşturan AEYA mikrodenetleyiciye yazılarak sistemler arasında kontrolü sağlanmıştır. Dokuz olası çalışma durumu belirlenerek rüzgâr türbin generatörü, akıntı türbin generatörü, batarya gurubu, ultrakapasitör gurubu ve yükler her durum için ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Devrelerin çalışma durumları osiloskop ile ayrıntılı olarak incelenmiş ve ekran görüntü sonuçları verilmiştir. Sistemin dinamik davranışını analiz etmek için geçiş durumları oluşturulmuştur. Bu durum geçişlerinde tez çalışmasında önemi vurgulanan HEDS'in katkısı deneysel sonuçlar ile gösterilmiştir. HEDS'de batarya ve ultrakapasitör gurubunun birlikte kullanılmasıyla ani yük geçiş durumlarında ultrakapasitör gurubu hızlı bir şekilde devreye girdiği ve batarya gurubunun derin deşarj olmasını önlediği gösterilmiştir. Bu özelliği ile ultrakapasitör, aşırı akım çeken yüklerin devreye girmesi ile yaşanan gerilim düşümlerinin de ortadan kaldırılmasında etkili olmaktadır. Aşırı yüklenme durumunda ultrakapasitörü devreye alarak bataryanın çevrim ömrünü uzatmaktadır. Akıllı enerji algoritması açık deniz rüzgâr ve yüzeysel akıntı enerjisindeki dalgalanmayı düzelterek batarya ve ultra-kapasitör gurubunun dalgalanma olmadan güç kalitesini artıracak şekilde kontrol edilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada öne çıkan en önemli noktalardan biride, anlık güç giriş çıkışında ultrakapasitör gurubunu devreye alarak sistemin daha hızlı cevap vermesini ve batarya ömrünün uzatılmasını sağlamaktır.

Deneysel çalışma sonuçlarında olası dokuz durum analiz edilmiştir. Bu durumlar kendi aralarında karşılaştırma yapmak için değil hibrit sistemin çalışması boyunca karşılaşacağı olası durumlar öngörülerek senoryalar analiz edilmiştir. Durum 1'de açık deniz rüzgâr türbininden 15 W, yüzeysel akıntı türbininden 7.5 W güç üretilmektedir. Yük gurubunun gücü 22.5 W'tır ve batarya gurubu pasif durumdadır. Durum 2'de açık deniz rüzgâr türbininden 20 W, yüzeysel akıntı türbininden 5 W güç elde edilmektedir. Batarya gurubunun SOC değeri yüksek olduğundan pasif durumdadır. Yük gurubu 25 W'tır ve HGÜS tarafından enerjisi karşılanmaktadır.

Durum 3’de ise açık deniz rüzgâr türbininden 15 W, yüzeysel akıntı türbininden 7.5 W güç üretildiği durumda yük gurubu 5 W güç talep etmektedir. Batarya gurubunun SOC değeri düşük olduğundan 12 W ile şarj olmaktadır. Durum 4’de açık deniz rüzgâr türbininden 6.6 W, yüzeysel akıntı türbininden 1.7 W güç üretilirken yük gurubu 9.3 W güç çekmektedir. Batarya gurubunun SOC değeri yüksek olduğundan pasif durumdadır. Durum 5 ve Durum 6 arasında sadece batarya doluluk durum farkı vardır. Bu durumda açık deniz rüzgâr türbini 15 W, yüzeysel akıntı türbini 0 W güç üretilmektedir. Yük gurubu 18 W’tan 30 W’a çıkmaktadır ve ultrakapasitör gurubu batarya gurubuna destek olmaktadır. Durum 7 ve Durum 8 arasında yalnızca batarya doluluk durumu farkı bulunmaktadır. Bu iki durumda açık deniz rüzgâr türbini ve yüzeysel akıntı türbininin pasif olduğu durum incelenmiştir. Yük gurubu 10 W güç talep etmektedir ve bu güç batarya gurubu tarafından karşılanmaktadır. Durum 9’da açık deniz rüzgâr türbininden 5 W, yüzeysel akıntı türbininden 4 W güç üretilmektedir. Yük gurubu güç talep etmemektedir ve üretilen bütün güç enerji depolama birimine aktarılmaktadır.

Sonuç olarak, bu tez ile HGÜS ve HEDS entegrasyonu sağlanmış, geliştirilen özgün algoritmalarla ayrıntılı olarak incelenmiş simülasyon ve deneysel sonuçlar ile katkısı gösterilmiştir. Tez çalışmasında geliştirilen akıllı enerji yönetim algortiması ile hibrit sistemlerin birlikte kullanımı ile ilgili literatüre yenilik getirilmiştir. Tezde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile ülkemiz şartlarında ve ticari olarak üretilmesi için gerekli olabilecek bilgi, beceri ve deneysel uygulama altyapısı oluşturulmuştur.

Tez çalışma kapsamında Darrieus ve Savonius kanat çaplarının artması sonucunda elde edilecek enerji miktarının arttığı tespit edilmiştir. Kanat çap ve yükseklik ölçüleri artırılarak kW mertebesinde güç üretilebilir. Bu durumda akıllı enerji yönetim algoritması yeni sisteme göre optimize edilmelidir. Böylece sistemde bulunan güç devrelerinin geçiş durumlarında yüksek verimli çalışma sağlanabilir.

KAYNAKLAR

1. Borg, M., Wang, K., Collu, M., and Moan, T., “A Comparison of Two Coupled Model of Dynamics for Offshore Floating Vertical Axis Wind Turbines (VAWT)”, *33rd International Conference on Ocean Proceedings of the ASME*, California, 1-10 (2014).
2. Borga, M., and Collua, M., “A Comparison on The Dynamics of a Floating Vertical Axis Wind Turbine on Three Different Floating Support Structures”, *Energy Procedia*, 53 (1): 268-279 (2014).
3. Bertram, V., “Advanced CFD Analyses for Offshore Wind Power Installations”, *International Conference on Oceans*, Genoa, 1-5 (2015).
4. Hand, B., Cashman, A., and Kelly, G., “An Aerodynamic Modelling Methodology for an Offshore Floating Vertical Axis Wind Turbine”, *International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, Glasgow, 273-277 (2015).
5. Jin, X., Zhao, G., Gao, K., and Ju, W., “Darrieus Vertical Axis Wind Turbine: Basic Research Methods”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42 (1): 212-225 (2015).
6. Shahariar, G. M., and Hasan, M. R., “Design & Construction of a Vertical Axis Wind Turbine”, *9th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, Bangladesh, 326-329 (2014).
7. Akbar, M. A., and Mustafa, V., “A new Approach for Optimization of Vertical Axis Wind Turbines”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 153 (1): 34-45 (2016).
8. Quallen, S., Xing, T., Carrica, P., Li, Y., and Xu, J., “CFD Simulation of a Floating Offshore Wind Turbine System Using a Quasi-static Crowfoot Mooring-Line Model”, *The International Society of Offshore and Polar Engineers*, 1 (3): 143–152 (2014).
9. Korprasertsak, N., and Leephakpreeda, T., “Analysis and Optimal Design of Wind Boosters for Vertical Axis Wind Turbines at Low Wind Speed”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 159 (1): 9-18 (2016).
10. Zamani, M., Nazari, S., Moshizi, S. A., and Maghrebi, M. J., “Three Dimensional Simulation of J-shaped Darrieus Vertical Axis Wind Turbine”, *Energy*, 116 (1): 1243-1255 (2016).

11. Lain, S., Quintero, B., Trujillo, D., and Ulianov, Y., "Simulation of Vertical Axis Water Turbines", *IEEE International Symposium on Alternative Energies and Energy Quality (SIFAE)*, Colombia, 1-6 (2013).
12. Tchakoua, R., Ouhrouche, M., Andy, T., Wamkeue, R., and Hasnaoui, F., "Basis of Theoretical Formulations for New Approach for Modelling Darrieus-Type Vertical Axis Wind Turbine Rotors using Electrical Equivalent Circuit Analogy", *3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Morocco, 1-7 (2015).
13. Tchakoua, R., Ouhrouche, M., Andy, T., Wamkeue, R., and Hasnaoui, F., "Development of Equivalent Electric Circuit Model for Darrieus-Type Vertical Axis Wind Turbine Rotor using Mechanic-Electric Analogy Approach", *3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Morocco, 41-48 (2015).
14. Lee, Y., and Lim, H., "Numerical Study of the Aerodynamic Performance of a 500 W Darrieus-Type Vertical Axis Wind Turbine", *Renewable Energy*, 83 (1): 407-415 (2015).
15. Dai, H., Yang, Z., and Song, L., "Mathematical Modeling for H - Type Vertical Axis Wind Turbine", *IEEE 11th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, Banff, 695-700 (2014).
16. Kou, W., Shi, X., Yuan, B., and Fan, L., "Modeling Analysis and Experimental Research on a Combined-Type Vertical Axis Wind Turbine", *International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*, Bali, 1537-1541 (2011).
17. Urbina, R., Peterson, M. L., Bates, P. M., and Kimball, R. W., "Modeling and Validation of a Cross Flow Turbine using Free Vortex Models and an improved 2D Lift Model", *International Conference on Oceans*, Seattle, 1-7 (2010).
18. Jain, P., and Abhishek, A., "Performance Prediction and Fundamental Understanding of Small Scale Vertical Axis Wind Turbine with Variable Amplitude Blade Pitching", *Renewable Energy*, 97 (1): 97-113 (2016).
19. Zhang, L., Zhang, S., Wang, K., Liu, X., and Liang, Y., "Study on Synchronous Variable-Pitch Vertical Axis Wind Turbine", *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Xiamen, 1-5 (2011).
20. Scungio, M., Arpino, F., Focanti, V., Profili, M., and Rotondi, M., "Wind Tunnel Testing of Scaled Models of a newly Developed Darrieus-Style Vertical Axis Wind Turbine with Auxiliary Straight Blades", *Energy Conversion and Management*, 130 (1): 60-70 (2016).
21. Borg, M., Shires, A., and Collu, M., "Offshore floating vertical axis wind turbines, dynamics modeling state of the art. Part I: Aerodynamics", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39 (1): 1214-1225 (2014).

22. Borg, M., Collu, M., and Kolios, A., “Offshore floating vertical axis wind turbines, dynamics modeling state of the art. Part II: Mooring line and structural dynamics”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39 (1): 1226-1234 (2014).
23. Borg, M., and Collu, M., “Offshore floating vertical axis wind turbines, dynamics modeling state of the art. Part III: Hydrodynamics and coupled modeling approaches”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46 (1): 296-310 (2015).
24. Paulsen, U. S., Madsen, H. A., Hattel, J. H., Baranc, I., and Nielsen, P. H., “Design Optimization of a 5 MW Floating Offshore Vertical-Axis Wind Turbine”, *Energy Procedia*, 35 (1): 22-32 (2013).
25. Minami, Y., Nimura, T., Sasaki, N., Murayama, H., Uzawa, K., and Wada, H., “Development of Tidal and Ocean Current Power Plant Using Elastic Turbine”, *IEEE Symposium on Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (SSC)*, Tokyo, 1-6 (2011).
26. Triviino, P. G., Ramirez, L. M., Mena, A. J., Iborra, F., Vazquez, C. A., and Jurado, F., “Optimized Operation Combining Costs, Efficiency and Lifetime of a Hybrid Renewable Energy System with Energy Storage by Battery and Hydrogen in Grid-Connected Applications”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (1): 23132-23144 (2016).
27. Amrouche, S. O., Rekioua, D., Rekioua, T., and Bacha, S., “Overview of Energy Storage in Renewable Energy Systems”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (1): 20914-20927 (2016).
28. Amy, T., Kong, H., Auger, D., Offer, G., and Longo, S., “Regularized MPC for Power Management of Hybrid Energy Storage Systems with Applications in Electric Vehicles”, *ScienceDirect IFAC Papers OnLine*, 49 (11): 265-270 (2016).
29. Song, Z., Hou, J., Hofmann, H., Li, J., and Ouyang, M., “Sliding-Mode and Lyapunov Function-Based Control for Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System Used in Electric Vehicles”, *Energy*, 122 (1): 601-612 (2017).
30. Lee, S., and Kim, J., “Implementation Methodology of Powertrain for Series-Hybrid Military Vehicles Applications Equipped with Hybrid Energy Storage”, *Energy*, 120 (1): 229-240 (2017).
31. Chong, L. W., Wong, Y. W., Rajkumar, R. K., and Isa, D., “An optimal control strategy for standalone PV system with Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System”, *Journal of Power Sources*, 331 (1): 553-565 (2016).
32. Chong, L. W., Wong, Y. W., Rajkumar, R. K., and Isa, D., “Modelling and Simulation of Standalone PV Systems with Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for a Rural Household”, *Energy Procedia*, 107 (1): 232-236 (2017).

33. Hemmati, R., and Saboori, H., "Emergence of Hybrid Energy Storage Systems in Renewable Energy and Transport Applications - A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65 (1): 11-23 (2016).
34. Khalid, M., Savkin, A., and Agelidis, V., "A Method for Minimizing Energy Cost in a Microgrid With Hybrid Renewable Power Generation Using Controlled Battery Energy Storage", *Proceedings of the 35th Chinese Control Conference*, Chengdu, 8596-8600 (2016).
35. Sjolte, J., Tjensvoll, G., and Molinas, M., "All-Electric Wave Energy Converter Array with Energy Storage and Reactive Power Compensation for Improved Power Quality", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Maryland, 954-961 (2012).
36. Pahlevani, M., Eren, S., Guerrero, J. M., and Jain, P., "A Hybrid Estimator for Active/Reactive Power Control of Single-Phase Distributed Generation Systems with Energy Storage", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(4): 2919-2936 (2016).
37. Li, X., Hui, D., and Lai, X., "Battery Energy Storage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4 (2): 464-473 (2013).
38. Shen, D., Izadian, A., and Liao, P., "A Hybrid Wind-Solar-Storage Energy Generation System Configuration and Control", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Pittsburgh, 436-442 (2014).
39. Askarzadeh, A., "Electrical Power Generation by an Optimized Autonomous PV/Wind/Tidal/Battery System", *The Institution of Engineering and Technology Renewable Power Generation*, 11 (1): 152-164 (2016).
40. Atia, R., and Yamada, N., "Sizing and Analysis of Renewable Energy and Battery Systems in Residential Microgrids", *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7 (3): 1204-1213 (2016).
41. Bocklisch, T., and Lindner, J., "Technical and Economic Investigation and Comparison of Photovoltaic-Wind Energy-Hybrid Systems with Battery and Heat Storage Path", *Energy Procedia*, 99 (1): 350-359 (2016).
42. Fang, H., Lin, S., Chu, H., Jia, T., and Liu, Y., "Coordinated and Stable Control of a Hybrid Energy Storage System for Wave Generation System", *12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, Guilin, 1986-1991 (2016).
43. Luo, F., Meng, K., Dong, Z. Y., Zheng, Y., Chen, Y., and Wong, K. P., "Coordinated Operational Planning for Wind Farm With Battery Energy Storage System", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6 (1): 253-262 (2015).

44. Wang, S., Tang, Y., Shi, Gong, K., Liu, Y., Ren, L., and Li, J., “Design and Advanced Control Strategies of a Hybrid Energy Storage System for the Grid Integration of Wind Power Generations”, *The Institution of Engineering and Technology Renewable Power Generation*, 9 (2): 89-98 (2015).
45. Wang, L., Li, C., Chen, Y., Kao, Y., and Wang, S. W., “Analysis of a Hybrid Offshore Wind and Tidal Farm Connected to a Power Grid Using a Flywheel Energy Storage System”, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Montreal, 1-8 (2011).
46. Shirai, Y., Minamoto, S., Yonemura, K., and Rahman, M. L., “Output Power Control of Hybrid Off-Shore-Wind and Tidal Turbine Generation System with Battery Storage System”, *19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Tokyo, 1-6 (2016).
47. Ahmad, S., Uddin, M. J., Nisu, I. H., Ahsan, M., Rahman, I., and Samrat, N. H., “Modeling of Grid Connected Battery Storage Wave Energy and PV Hybrid Renewable Power Generation”, *International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*, Bazar, 375-380 (2017).
48. Zhou, T., and Sun, W., “Optimization of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage Station in Wind/Solar Generation System”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5 (2): 408-415 (2014).
49. Dong, B., Li, Y., and Zheng Z., “Composite Converter of Hybrid Storage in Distributed Renewable Energy Generation System”, *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Beijing, 1-4 (2011).
50. Wang, L., Jan, S. R., Li, C. N., Li, H. W., Huang, Y. H., Chen, Y. T., and Wang, S. W., “Study of a Hybrid Offshore Wind and Seashore Wave Farm Connected to a Large Power Grid through a Flywheel Energy Storage System”, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, 1-7 (2011).
51. Olatomiwa, L., Mekhilef, S., Ismail, M. S., and Moghavvemi, M., “Energy Management Strategies in Hybrid Renewable Energy Systems: A Review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62 (1): 821-835 (2016).
52. Piphitpattanaprap, N., and Banjerdpongchai, D., “Energy Management System of Hybrid Power Generation with Battery Energy Storage and Application to MHS Smart Grid Project”, *54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, Japan, 22-927 (2015).
53. Housseini, B., Okou, F., and Beguenane, R., “Nonlinear Adaptive Control of On-grid/Off-grid Wind Energy Battery-Storage System”, *Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, 1-8 (2017).

54. Housseini, B., Okou, F., and Beguenane, R., “Energy Management Strategy of On-grid/Off-grid Wind Energy Battery-Storage System”, *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, London, 1-6 (2017).
55. Anwar, M. B., Moursi, M. S., and Xiao, W., “Novel Power Smoothing and Generation Scheduling Strategies for a Hybrid Wind and Marine Current Turbine System”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 32 (2): 1315-1326 (2017).
56. Shen, J., and Khaligh, A., “A Supervisory Energy Management Control Strategy in a Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1 (3): 223-231 (2015).
57. Cortes, R., Cadaval, E., Clemente, C., Gonzalez, F., and Romera, E., “Energy Management Strategy to Coordinate Batteries and Ultracapacitors of a Hybrid Energy Storage System in a Residential Prosumer Installation”, *International Young Engineers Forum (YEF-ECE)*, Costa da Caparica, 30-35 (2017).
58. Angerer, C., Krapf, S., Wassiliadis, N., and Lienkamp, M., “Reduction of Aging-Effects by Supporting a Conventional Battery Pack with Ultracapacitors”, *Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Carlo, 1-12 (2017).
59. Li, J., Yang, Q., Robinson, F., Liang, F., Zhang, M., and Yuan, W., “Design and Test of a New Droop Control Algorithm for a SMES/Battery Hybrid Energy Storage System”, *Energy*, 118 (1): 1110-1122 (2017).
60. Aktas, A., Erhan, E., Ozdemir, S., and Ozdemir, E., “Experimental Investigation of a New Smart Energy Management Algorithm for a Hybrid Energy Storage System in Smart Grid Applications”, *Electric Power Systems Research*, 144 (1): 185-196 (2017).
61. Krishna, K. S., and Kumar, K. S., “A Review on Hybrid Renewable Energy Systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52(1): 907-916 (2015).
62. Gee, A. M., Robinson, F., and Yuan, W., “A Superconducting Magnetic Energy Storage-Emulator/Battery Supported Dynamic Voltage Restorer”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 32 (1): 55-64 (2017).
63. Jing, W., Lai, C. H., Wong, S. H., and Wong, M. L., “Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Standalone DC Microgrids: A Review”, *The Institution of Engineering and Technology Renewable Power Generation*, 11 (4): 461-469 (2017).
64. Farhadi, M., and Mohammed, O., “Energy Storage Technologies for High-Power Applications”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52 (3): 1953-1961 (2016).

65. Bocklisch, T., “Hybrid Energy Storage Approach for Renewable Energy Applications”, *Journal of Energy Storage*, 8 (1): 311-319 (2016).
66. Chong, L. W., Wong, Y. W., Rajkumar, R. K., and Isa, D., “Hybrid Energy Storage Systems and Control Strategies for Stand-alone Renewable Energy Power Systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66 (1): 174-189 (2016).
67. Segundo, H. B. S., “Energy storage systems integration PV power plants”, PhD Thesis, *University of Polytechnic Catalunya Department of Electrical Engineering*, Spain, 35-75 (2011).
68. Masson, G., Latour, M., Rekinge, M., Theologitis, T., and Papoutsis, M., Global market outlook for photovoltaics 2013-2017, *European Photovoltaic Industry Association (EPIA Report)*, Germany, 12-48 (2012).
69. Farret, F. A., and Simoes, M. G., “Integration of alternative sources of energy”, Editors, *Dr. Felix A. and Farret B.E*, New Jersey, 156-274 (2006).
70. Aktaş, A., and Kırçiçek, Y., “A novel optimal energy management strategy for offshore wind/marine current/battery/ultracapacitor hybrid renewable energy system”, *Energy*, 200 (1): 1-15 (2020).
71. Salleh, M. B., Kamaruddin, N. M., and Mohamed-Kassim, Z., “Savonius hydrokinetic turbines for a sustainable river-based energy extraction: A review of the technology and potential applications in Malaysia, Sustain”, *Energy Technol. Assessments.*, 36(1): 543-554 (2019).
72. Wu, D., Tang, F., Dragicevic, T., Vasquez, J. C., and Guerrero, J. M., “A control architecture to coordinate renewable energy sources and energy storage systems in islanded microgrids”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6 (3): 1156-1166 (2015).
73. Wu, D., Tang, F., Dragicevic, T., Vasquez, J. C., and Guerrero, J. M., “Autonomous active power control for islanded AC microgrids with photovoltaic generation and energy storage system”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29 (4): 882-892 (2014).
74. Fu, Z., Zhu, L., Tao, F., Si, P., and Sun, L., “Optimization based energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle considering fuel economy and fuel cell lifespan”, *Int. J. Hydrogen Energy*, 45 (1): 8875-8886 (2020).
75. John, B., Thomas, R. N., and Varghese, J., “Integration of hydrokinetic turbine-PV-battery standalone system for tropical climate condition”, *Renew. Energy.*, 149 (1): 361-373 (2020).

76. Saini, G., and Saini, R. P., “A computational investigation to analyze the effects of different rotor parameters on hybrid hydrokinetic turbine performance”, *Ocean Eng.*, 199 (1): 107-116 (2020).
77. Tang, G., and Wang, J., “A comparative study of energy performance of hydrostatic seafloor sediment samplers and a new high-efficiency sampler”, *Appl. Ocean Res.*, 83 (1): 1-8 (2019).
78. Khan, M. J., Bhuyan, G., Iqbal, M. T., and Quaiocoe, J. E., “Hydrokinetic Energy Conversion Systems and Assessment of Horizontal and Vertical Axis Turbines for River and Tidal Applications: A technology Status Review”, *Applied Energy*, 86 (1): 1823-1835 (2009).
79. Vermaak, H. J., Kusakana, K., and Koko, S. P., “Status of Micro-Hydrokinetic River Technology in Rural Applications: A Review of Literature”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29 (1): 625-633 (2009).
80. Ladokun, L. L., Ajao, K. R., and Sule, B. F., “Hydrokinetic Energy Conversion Systems: Prospects and Challenges in Nigerian Hydrological Setting”, *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)*, 32 (3): 538-549 (2013).
81. Alam, J., and Iqbal, M. T., “Design and Development of Hybrid Vertical Axis Turbine”, *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Edmonton, 1178-1183 (2009).
82. Bui, D. M., and Melis, W. J., “Energy Gathering by Micro Turbines for Low Voltage Appliances”, *World Congress on Sustainable Technologies (WCST)*, London, 21-26 (2012).
83. Guney, M. S., “Evaluation and measures to increase performance coefficient of hydrokinetic turbines”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (1): 3669-3675 (2011).
84. Vermaak, H. J. and Kusakana, K. “Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29 (1): 625-633 (2014).
85. Islam, M., Ting, D. S. K., and Fartaj, A., “Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (4): 1087-1109 (2008).
86. Şamdan, O., “Darrieus tipi rüzgâr türbini tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 18-43 (2016).
87. Altan, B. D., “Perdeleme yöntemi ile savonius rüzgâr çarkının performansının incelenmesi” Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 12-29 (2006).

88. Bodur, H., “Güç Elektroniği Temel Analiz ve Sayısal Uygulamalar”, Editör, *Hacı Bodur*, İstanbul, 50-200 (2010).

ÖZGEÇMİŞ

Yağmur KIRÇIÇEK 1991 yılında Gaziantep'te doğdu; ilk orta ve lise öğrenimini Kocaeli'nde tamamladı. Kocaeli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nden 2013 yılında mezun oldu. 2013-2016 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. Haziran 2018 - Haziran 2020 yılları arasında Dr. Öğr. Üyesi Ahmet AKTAŞ yürütücülüğündeki 117E767 nolu, "Açık deniz rüzgâr ve akıntı enerjisinden oluşan hibrit güç üretim sistemine batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji depolama sisteminin entegre edilerek hibrit sistemlerin akıllı enerji yönetimi" başlıklı TÜBİTAK 1001 araştırma projesinde tam zamanlı doktora bursiyeri olarak görev almıştır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü / KARABÜK
Tel : (538) 560 55 68
E-posta : yagmurkircicek@hotmail.com