

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN BATARYA-YAKIT HÜCRESİ HİBRİT
ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Baran KUL

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet Onur GÜLBAHÇE

OCAK 2026

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN BATARYA-YAKIT HÜCRESİ HİBRİT
ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Baran KUL
(504231054)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet Onur GÜLBAHÇE

OCAK 2026

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**DEVELOPMENT OF A BATTERY-FUEL CELL HYBRID ENERGY
MANAGEMENT SYSTEM FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES**



M.Sc. THESIS

**Baran KUL
(504231054)**

Department of Electrical Engineering

Electrical Engineering Programme

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Onur GÜLBAHÇE

JANUARY 2026

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504231054 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Baran KUL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN BATARYA-YAKIT HÜCRESİ HİBRİT ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Mehmet Onur GÜLBAHÇE**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Erkan ATMACA**
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Fatma Gül BAĞRIYANIK**.....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 2 Ocak 2026
Savunma Tarihi : 22 Ocak 2026





Aileme,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, yüksek lisans öğrenimim süresince edindiğim teorik bilgiler ile mühendislik bakış açısını bir araya getirerek; günümüz havacılık teknolojisinde kritik bir öneme sahip olan döner kanatlı insansız hava araçları için batarya ve yakıt hücresinden oluşan hibrit bir enerji sisteminin; güç dönüştürücüleri ve enerji yönetim sistemi ile birlikte tasarlanmasını, modellenmesini ve benzetim ortamında optimize edilmesini amaçlamaktadır.

Hibrit enerji kaynaklarının verimli kullanımı ve enerji yönetim stratejilerinin geliştirilmesi; özellikle sınırlı enerji kapasitesine sahip hava araçlarının uçuş sürelerinin uzatılması, operasyonel verimliliğin artırılması ve sürdürülebilir havacılık çözümleri açısından büyük önem taşımaktadır.

Tez çalışmam süresince bana rehberlik eden, bilgi ve deneyimiyle her aşamada yol gösteren, akademik vizyonumun gelişmesine katkı sağlayan değerli danışmanım Doç. Dr. Mehmet Onur Gülbahçe'ye teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca akademik yolculuğum boyunca bana destek olan tüm hocalarıma ve bölüm çalışanlarına da teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte sabırla yanımda olan, bana her zaman inanan ve manevi destekleriyle yolumu aydınlatan kıymetli aileme de gönülden teşekkür ederim.

Ocak 2026

Baran KUL
(Elektrik Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	3
1.3 Hipotez	4
2. YAKIT HÜCRESİ	7
2.1 Elektrokimyasal Reaksiyonlar	7
2.1.1 Anot yarı tepkimesi	7
2.1.2 Katot yarı tepkimesi	7
2.1.3 Toplam tepkime	8
2.1.4 Elektrokimyasal dinamik davranış	8
2.2 Yakıt Hücresi Matematiksel Modeli	9
2.2.1 Gerilim denklemleri	10
2.2.1.1 Nernst denklemi	10
2.2.1.2 Aktivasyon kayıpları	11
2.2.1.3 Konsantrasyon kayıpları	12
2.2.1.4 Ohmik kayıplar	12
2.2.2 Fiziksel denklemler	13
2.2.2.1 Kısmi basınçlar	13
2.2.2.2 Akıma bağlı gaz tüketimi modeli	14
2.2.2.3 Su buharı doygunluk basıncı modeli	15
2.3 MATLAB/Simulink Modeli	15
3. GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜ DEVRELERİ	17
3.1 Faz Kaydırmalı Yükseltici Dönüştürücü Devre Tasarımı ve Modeli	18
3.1.1 Yükseltici devre topolojisi	18
3.1.2 Tasarım	20
3.1.2.1 Doluluk oranı	21
3.1.2.2 Faz indüktörlerinin seçimi	21
3.1.2.3 Kapasitör seçimi	21
3.1.3 Kontrol	22
3.1.3.1 PI kontrol	23
3.1.3.2 Çift geri beslemeli kontrol	23
3.1.3.3 Kontrol katsayıları	24

3.2 4-Anahtarlı Çift Yönlü Yükselten-Alçaltan Devre.....	25
3.2.1 Çalışma modları	27
3.2.1.1 Deşarj yönünde çalışma	27
3.2.1.2 Şarj yönünde çalışma	27
3.2.2 Tasarım.....	28
3.2.2.1 Ortak indüktör seçimi.....	28
3.2.2.2 Kapasitörlerin seçimi.....	29
3.2.3 Kontrol	30
3.2.3.1 Deşarj modu kontrolü.....	30
3.2.3.2 Şarj modu kontrolü.....	31
4. ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ.....	33
4.1 Hibrit Enerji Sistemi Mimarileri	33
4.1.1 Pasif hibrit sistemler.....	33
4.1.2 Aktif hibrit sistemler	34
4.2 Enerji Yönetim Sistemi	36
4.2.1 Tasarım.....	39
4.2.1.1 Kontrol kuralları.....	41
4.2.1.2 Kontrolcü tasarımı.....	44
4.2.2 Optimizasyon	47
4.2.2.1 Genetik algoritma.....	50
4.2.2.2 Optimizasyon sonuçları.....	50
4.3 Model ve Benzetim.....	55
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	65

KISALTMALAR

CCM	: Sürekli Akım Modu
DA	: Doğru Akım
DCM	: Kesintili İletim Modu
DP	: Dinamik Programlama
ECMS	: Eşdeğer Tüketim Minimizasyonu Stratejisi
EMS	: Enerji Yönetim Sistemi
FLC	: Bulanık Manık Kontrolcüsü
GA	: Genetik Algoritma
İHA	: İnsansız Hava Aracı
MF	: Üyelik Fonksiyonu
MOSFET	: Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör
MPC	: Model Öngörülü Kontrol
PEMFC	: Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi
PID	: Oransal İntegral Türevsel
PWM	: Darbe Genişliği Modülasyonu
SoC	: Batarya Şarj Durumu



SEMBOLLER

C	: Kapasite
D	: Doluluk Oranı
f	: Frekans
I	: Akım
K	: Kazanç
L	: İndüktans
p	: Basınç
T	: Sıcaklık
V	: Gerilim



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Yakıt hücresi model parametreleri.	16
Çizelge 3.1 : Tasarım değerleri.....	22
Çizelge 3.2 : Tasarım değerleri.....	30
Çizelge 4.1 : Hibrit güç mimarilerinin karşılaştırması.	36
Çizelge 4.2 : Kontrol kuralları.	43
Çizelge 4.3 : Optimizasyon vektörü elemanları ve sınır değerleri.	51
Çizelge 4.4 : Üyelik fonksiyonlarının parametrik değerleri.	52
Çizelge 4.5 : Bulanık mantık kontrolcüsü optimize edilmiş değerleri.	54



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : PEM yakıt hücresi.	8
Şekil 2.2 : Yakıt hücresi akım-gerilim karakteristiği.....	13
Şekil 2.3 : PEM yakıt hücresi Simulink modeli.	16
Şekil 3.1 : Yükseltici devre topolojisi.....	18
Şekil 3.2 : Gerilim ve akım geri beslemeli kontrol modeli.	23
Şekil 3.3 : 5-fazlı devre Simulink modeli.	25
Şekil 3.4 : 4-anahtarlı yükselten-alçaltan devre topolojisi.....	26
Şekil 3.5 : Deşarj yönünde çalışma.	27
Şekil 3.6 : Şarj yönünde çalışma.	28
Şekil 3.7 : 4-anahtarlı çift yönlü yükselten-alçaltan devre modeli.	31
Şekil 4.1 : Pasif hibrit güç mimarisi.	34
Şekil 4.2 : Aktif hibrit güç mimarisi.	35
Şekil 4.3 : Yakıt hücresi ve bataryanın başlangıç davranışı.	41
Şekil 4.4 : Yakıt hücresi ve bataryanın ani yüklenme davranışı.....	41
Şekil 4.5 : Bulanık mantık diyagramı.	44
Şekil 4.6 : Talep girişi için üyelik fonksiyonları.	45
Şekil 4.7 : Batarya şarj durumu için üyelik fonksiyonları.	46
Şekil 4.8 : Yakıt hücresi çıkış referansı için üyelik fonksiyonları.....	47
Şekil 4.9 : EMS, kontrol mekanizması ve güç kaynaklarından oluşan model.	55
Şekil 4.10 : Uçuş yük profili altında kaynaklar arasındaki güç paylaşımı.	56
Şekil 4.11 : Yüksek SoC değerinde uçuş yük profili altında güç paylaşımı.....	57
Şekil 4.12 : Orta SoC değerinde uçuş yük profili altında güç paylaşımı.....	57
Şekil 4.13 : Düşük SoC değerinde uçuş yük profili altında güç paylaşımı.	58



İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN BATARYA-YAKIT HÜCRESİ HİBRİT ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

İnsansız hava araçlarının özellikle multirotor konfigürasyonlarda kullanımının yaygınlaşması, uçuş süresi, görev menzili ve enerji verimliliği gibi başarımlarını kritik hale getirmiştir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan lityum batarya tabanlı enerji sistemleri, yüksek güç yoğunluğu ve hızlı dinamik yanıt avantajlarına sahip olmakla birlikte, sınırlı özgül enerji kapasiteleri nedeniyle uzun süreli uçuş görevlerinde yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda hidrojen yakıt hücreleri, yüksek özgül enerji ve uzun çalışma süreleri sunmaları nedeniyle İHA uygulamaları için önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Ancak yakıt hücrelerinin yavaş dinamikleri, ani yük değişimlerine karşı sınırlı tepkileri ve sistem yaşlanmasına duyarlılıkları, tek başına kullanımlarını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, yakıt hücrelerinin bataryalar ile birlikte hibrit bir yapı içerisinde kullanılması, her iki enerji kaynağının avantajlarını bir araya getiren etkili bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Bu tez çalışmasında, multirotor İHA'lar için hidrojen yakıt hücresi ve lityum bataryadan oluşan aktif hibrit bir güç sistemi tasarlanmış, MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve ayrıntılı olarak benzetimi yapılmıştır. Çalışmanın temel amacı; batarya destekli bir hibrit yapı ile yakıt hücresinin dinamik sınırlamalarını telafi eden, uçuş süresini uzatan ve enerji verimliliğini artıran bir güç sistemi ve buna ait enerji yönetim stratejisi geliştirmektir. Bu kapsamda yakıt hücresi, batarya, güç elektroniği dönüştürücüleri, enerji yönetim sistemi ve kontrol mekanizmaları bütünlük bir yapı içerisinde ele alınmıştır.

Tez kapsamında öncelikle proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücresinin matematiksel ve fiziksel modelleri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Yakıt hücresinin gerilim karakteristiği; tersinir gerilim, aktivasyon, ohmik ve konsantrasyon kayıpları dikkate alınarak modellenmiş; gaz dinamiği, kısmi basınçlar ve Faraday yasasına dayalı fiziksel denklemler kullanılarak sistemin elektrokimyasal davranışı temsil edilmiştir. Bu modelleme, yakıt hücresinin verimli çalışma bölgelerinin belirlenmesine ve enerji yönetim stratejisinin oluşturulmasına temel teşkil etmiştir.

Güç elektroniği katmanında, yakıt hücresinin 24 V seviyesindeki çıkış gerilimini 48 V doğru akım (DA) bara gerilimine yükseltmek amacıyla 5-fazlı faz kaydırmalı yükseltici (interleaved boost) dönüştürücü tasarlanmıştır. Çok fazlı yapı sayesinde giriş ve çıkış akım/gerilim dalgalanmaları azaltılmış, yüksek güç seviyelerinde daha verimli ve dengeli bir çalışma elde edilmiştir. Batarya tarafında ise hem şarj hem de deşarj işlemlerinin aynı donanım üzerinden gerçekleştirilebilmesi için 4-anahtarlı çift yönlü alçaltıcı-yükseltici (buck-boost) dönüştürücü kullanılmıştır. Her iki dönüştürücü için detaylı tasarım denklemleri verilmiş, indüktör ve kapasitör değerleri belirlenmiş ve kapalı çevrim gerilim-akım kontrol yapıları kompanzatörler kullanılarak modellenmiştir.

Enerji yönetim sistemi tasarımı kapsamında, hibrit enerji sistemlerinde kullanılan pasif ve aktif mimariler incelenmiş, bu çalışma için aktif mimarinin daha uygun olduğu gösterilmiştir. Ardından İHA uygulamalarında kullanılan farklı EMS yaklaşımları; kural tabanlı kontrol, frekans tabanlı yöntemler, eşdeğer yakıt tüketimi minimizasyonu (ECMS), model öngörülü kontrol (MPC) ve dinamik programlama açısından değerlendirilmiştir. Gerçek zamanlı uygulanabilirlik, hesaplama maliyeti, sistem güvenilirliği ve kontrol edilebilirlik kriterleri dikkate alındığında, bu çalışma kapsamında kural tabanlı bir enerji yönetim sisteminin tercih edilmesi uygun bulunmuştur.

Kural tabanlı EMS, yakıt hücresinin verimli çalışma ve mümkün olduğunca sabit güç seviyelerinde çalışmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Hidrojenin batarya enerjisine kıyasla daha maliyetli olması, yakıt hücresinin yaşlanma ve yıpranma etkileri ile bataryanın şarj durumu (SoC) kısıtları, kural setlerinin oluşturulmasında temel kriterler olarak ele alınmıştır. Talep edilen güç seviyesi ve batarya şarj durumu (SoC) bilgisine bağlı olarak yakıt hücresi çıkış gücü belirlenmiş, kalan güç ihtiyacı batarya tarafından karşılanmıştır. Ayrıca, sistemin ilk çalıştırma anı ve ani geçici rejimler için frekans tabanlı bir anahtarlama mekanizması kullanılarak bataryanın öncelikli olarak devreye alınması sağlanmıştır.

Kural tabanlı yapı, daha esnek ve yumuşak bir kontrol sağlamak amacıyla bulanık mantık kontrolcü ile gerçekleştirilmiştir. Talep gücü ve batarya şarj durumu (SoC) girişleri kullanılarak yakıt hücresi çıkış gücü bulanık mantık ile belirlenmiştir. Bulanık mantık kontrolcüsünün üyelik fonksiyonları ve eşik değerleri, hidrojen tüketimi ve görev sonu hedeflenen SoC değerinden sapmasını içeren çok kriterli bir maliyet fonksiyonu kullanılarak genetik algoritma (GA) ile optimize edilmiştir. Optimizasyon süreci çevrim dışı olarak yürütülmüş ve elde edilen en iyi parametre seti ile kontrolcü nihai haline getirilmiştir.

Geliştirilen bütünsel sistem modeli, uçuş sırasında talep edilecek zamana bağlı yük profilleri altında benzetimi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yüksek SoC ve yüksek güç taleplerinde batarya ağırlıklı bir güç paylaşımı gerçekleştirildiğini; SoC değerinin nominal aralığa yaklaşmasıyla birlikte yakıt hücresinin verimli ve sabit güç bölgelerinde devreye alındığını göstermiştir. Ani ve dalgalı yük taleplerinde bataryanın hızlı dinamik yanıtından faydalanılmış, böylece yakıt hücresinin gereksiz güç dalgalanmalarına maruz kalması önlenmiştir. Sonuç olarak, hidrojen tüketimi açısından maliyet etkin, yakıt hücresi ömrünü koruyan ve uçuş süresini artıran bir hibrit güç sistemi elde edilmiştir.

DEVELOPMENT OF A BATTERY-FUEL CELL HYBRID ENERGY MANAGEMENT SYSTEM FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

SUMMARY

The rapid proliferation of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in diverse sectors, ranging from surveillance and mapping to logistical transport, has underscored the critical need for advanced energy systems that offer both high energy density and robust dynamic response. While multirotor UAVs provide superior maneuverability and operational flexibility, their performance is fundamentally constrained by the energy capacity and reliability of their power sources. Current battery-based systems, though capable of meeting high power demands during transients, often fail to support long-endurance missions due to their inherent energy density limitations. In this context, Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) have emerged as a promising alternative, offering high specific energy density and environmental benefits. However, the primary challenge hindering their standalone application is the slow dynamic response of PEMFCs during rapid load fluctuations—such as those encountered during takeoff or aggressive maneuvers—which can lead to critical fluctuations in the DC bus voltage and threaten mission safety.

To address these limitations, this thesis proposes an active hybrid energy system that integrates the high energy density of PEMFCs with the high power density and rapid dynamic response of lithium batteries. The primary objective of the study is to develop a holistic engineering framework comprising a detailed mathematical model of the PEMFC, the design and modeling of appropriate DC-DC converters, and the implementation of an advanced Energy Management System (EMS). This system is intended to maintain stability and reliability under various dynamic flight conditions.

A central component of this research is the development of a comprehensive mathematical model of the PEMFC, capturing its electrochemical, thermodynamic, and physical behaviors. This non-linear model is based on the principle of subtracting activation, ohmic, and concentration losses from the ideal thermodynamic Nernst potential. The modeling process incorporates essential physical parameters, including the partial pressures of hydrogen and oxygen, temperature variations, and membrane hydration. Specifically, the Nernst equation is utilized to calculate the reversible open-circuit voltage as a function of operating conditions. Furthermore, electrochemical kinetics, such as activation losses and Faraday's Law for gas consumption, are modeled to ensure a realistic representation of the fuel cell's dynamic response. The model also accounts for critical factors like water vapor saturation pressure, which directly influences reactant partial pressures and overall cell efficiency.

In order to ensure compatibility at the system level and enable the effective implementation of energy management strategies, both sources were designed to operate at a nominal voltage level of 24 V. However, the common DC distribution bus supplying the propulsion system and onboard electronics of the unmanned aerial vehicle (UAV) was specified at 48 V. This voltage difference necessitated the use of

appropriately designed power electronic converters to interface each energy source with the DC bus. Accordingly, two different DC–DC converter topologies were developed. These converters not only provide voltage level matching but also enable controlled power flow and improved system stability.

PEM fuel cells are characterized by low output voltage, high current levels, and limited dynamic response capability. These characteristics make direct connection to a high-voltage DC bus unsuitable. Therefore, a boost-type DC–DC converter operating in continuous conduction mode (CCM) was selected to elevate the fuel cell voltage to the required DC bus level while minimizing current ripple.

To overcome the limitations of single-phase boost converters at high power levels, a five-phase interleaved boost topology was adopted. In this structure, multiple identical boost phases operate in parallel with evenly phase-shifted switching signals. This interleaving approach distributes the input current among the phases, significantly reducing current stress on individual semiconductor devices. In addition, phase-shifted operation results in partial cancellation of ripple components, leading to reduced input and output current ripple.

The converter was designed for a nominal voltage conversion from 24 V to 48 V, corresponding to a duty cycle of approximately 0.5. A switching frequency of 20 kHz was selected as a compromise between switching losses and passive component size. Operation in CCM was intentionally maintained to ensure smooth input current, which is critical for fuel cell durability.

Inductor values were determined based on strict current ripple limitations, targeting a ripple level of 1.5–2% of the nominal current. As a result, identical inductors with a value of 0.5 mH were selected for each phase. The DC bus voltage ripple was limited to below 1%, and an output capacitance of 2 mF was chosen to ensure sufficient energy buffering under dynamic load conditions.

To achieve stable and robust operation, a dual-loop closed-loop control architecture was implemented. The outer voltage loop regulates the DC bus voltage by comparing the measured voltage with a 48 V reference. The resulting error is processed by a proportional–integral (PI) controller, which generates a reference value for the total input current.

The inner control layer consists of individual current PI controllers for each phase. The total reference current is evenly distributed among the phases, and each phase current is regulated independently. This structure ensures accurate current sharing and prevents phase imbalance. Phase-shifted PWM signals with 72° separation are generated to maintain interleaved operation. The control gains were selected through simulation-based tuning, with the voltage loop bandwidth intentionally kept lower than that of the current loops to preserve hierarchical control behavior.

The lithium-ion battery serves as both an auxiliary power source and an energy storage element in the hybrid system. Therefore, bidirectional power flow between the battery and the DC bus is required. To meet this requirement, a four-switch bidirectional buck–boost converter topology was selected.

During battery discharge, the converter operates in boost mode, increasing the battery voltage from 24 V to the 48 V DC bus. Conversely, during battery charging, the converter operates in buck mode, reducing the DC bus voltage to a level suitable for battery charging. The four-switch topology enables seamless transitions between operating modes through appropriate switching control, eliminating the need for

additional mechanical switches or diode-based power paths and thereby improving efficiency.

The converter was designed to operate at a switching frequency of 100 kHz in order to reduce passive component size. A single shared inductor was employed for both operating modes, and its value was determined to ensure CCM operation under worst-case ripple conditions. Based on analytical calculations, an inductance of 0.4 mH was selected. Capacitor values were chosen to maintain voltage ripple below 1% on both the DC bus and battery sides.

Different control strategies were implemented for the two operating modes of the bidirectional converter. In discharge (boost) mode, the primary objective is to regulate the DC bus voltage under varying load conditions. A PI controller was therefore employed to eliminate steady-state error and ensure stable voltage regulation.

In charging (buck) mode, precise control of the battery charging voltage and suppression of transient current spikes are critical to battery health. For this reason, a proportional–integral–derivative (PID) controller was adopted to improve transient response and damping characteristics. The controller parameters were determined through iterative simulation to ensure smooth and stable charging behavior.

Hybrid energy systems are introduced as multi-source configurations designed to improve power continuity, efficiency, and system reliability, particularly under fluctuating load conditions. Fuel cell–battery hybrid systems are emphasized due to their complementary characteristics, wherein fuel cells provide high energy density and sustained power, while batteries offer high power density and rapid dynamic response. However, it is stressed that system performance is not solely dependent on the individual energy sources, but also on the adopted architectural topology and the applied energy management strategy. Accordingly, hybrid architectures are categorized into passive and active configurations.

Passive hybrid architectures are described as systems in which energy sources are directly connected to a common DC bus without the use of active power electronic interfaces. In such systems, power sharing is inherently determined by the internal resistances, voltage levels, and natural electrical characteristics of the sources. Although passive architectures offer advantages such as structural simplicity, low cost, reduced weight, and the absence of converter losses, they suffer from a critical lack of controllability. In particular, fuel cells are exposed to sudden load transients, which may accelerate degradation and compromise system stability. Moreover, DC bus voltage regulation is weak and highly dependent on load conditions, rendering passive architectures unsuitable for UAV applications that require precise voltage control and rapid transient handling.

Active hybrid architectures, by contrast, employ DC–DC power converters between energy sources and the DC bus, enabling decoupled voltage levels and actively controlled power flow. Among the various active configurations, fully active topologies—utilizing a unidirectional converter for the fuel cell and a bidirectional converter for the battery—are identified as providing the highest level of flexibility and controllability. In this structure, an EMS supervises power sharing by issuing reference commands to the converters based on real-time system states and load demands. The advantages of this architecture include stable DC bus voltage regulation, protection of the fuel cell against high-frequency load variations, extended battery lifetime through controlled charge–discharge cycles, and seamless integration of sources with different voltage levels. These benefits are achieved at the expense of

increased system complexity, weight, cost, and converter-related power losses. Nevertheless, for UAV missions requiring high reliability and precise power control, the fully active hybrid architecture is justified and therefore selected in this study.

The primary objectives of the EMS are defined as maintaining DC bus voltage stability, satisfying transient power demands, protecting the fuel cell from rapid dynamics, preserving battery SoC within safe limits, and maximizing overall system efficiency. Various EMS strategies reported in the literature are reviewed, including rule-based control, frequency-based methods, Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS), Model Predictive Control (MPC), and Dynamic Programming (DP).

Rule-based EMS is identified as a suitable approach for real-time UAV applications due to its low computational burden, transparency, and reliability. In this method, power sharing decisions are governed by predefined logical rules derived from engineering expertise and system constraints. While rule-based strategies do not guarantee global optimality, their robustness and real-time feasibility are considered more critical for safety-oriented UAV missions. Frequency-based EMS methods, which allocate low-frequency power components to the fuel cell and high-frequency components to the battery, are acknowledged for their natural protection of fuel cells but criticized for their sensitivity to filter design and inability to directly manage battery SoC. ECMS is discussed as a near-optimal approach that minimizes instantaneous equivalent fuel consumption; however, its dependency on equivalence factors and increased computational requirements limit its practicality for UAVs. Advanced optimization-based methods such as MPC and DP are recognized for their theoretical optimality but are deemed impractical due to high computational demands, model dependency, and lack of real-time feasibility.

Based on these considerations, a rule-based EMS supported by transient detection mechanisms is adopted. The selected EMS architecture prioritizes stable fuel cell operation at predefined power levels while assigning transient and peak power demands to the battery. Special attention is given to system start-up and sudden load increase scenarios, during which the fuel cell is temporarily decoupled from the DC bus to prevent voltage collapse. This hybrid EMS structure enhances DC bus voltage stability and ensures deterministic system behavior, which is essential for UAV flight safety.

The EMS decision-making framework is constructed using two primary inputs: demanded load power and battery SoC. Both variables are classified into three linguistic levels (low, medium, high), resulting in a comprehensive rule base that determines the fuel cell operating mode (minimum, nominal, or maximum power). This rule set ensures that the fuel cell operates within its optimal efficiency and durability range, while the battery functions as a buffer to absorb dynamic load variations. The resulting power balance is achieved by allocating the residual load demand to the battery.

To mitigate abrupt transitions inherent in conventional rule-based control, a fuzzy logic controller (FLC) is introduced. The FLC employs Mamdani-type inference with trapezoidal and triangular membership functions to achieve smooth and continuous control behavior. The controller inputs consist of demanded power and battery SoC, while the output corresponds to the fuel cell reference power. Membership function parameters are initially defined based on engineering judgment and system constraints, enabling gradual transitions between operating modes and reducing stress on system components.

Recognizing that manually tuned fuzzy parameters may not yield optimal system performance, an optimization framework is subsequently introduced. The EMS optimization problem is formulated as a nonlinear, multi-objective task aimed at minimizing hydrogen consumption while achieving a desired terminal battery SoC. Various optimization techniques are evaluated, including Particle Swarm Optimization, Simulated Annealing, deterministic methods, and Genetic Algorithms (GA). GA is ultimately selected due to its suitability for discontinuous, nonlinear parameter spaces and its ability to handle multiple performance objectives without requiring gradient information.

The GA-based optimization is performed offline in a MATLAB environment, targeting key fuzzy membership function parameters and fuel cell power thresholds. A weighted cost function combining total hydrogen consumption and deviation from target end-of-mission SoC is minimized. Optimization results demonstrate that the GA-refined EMS parameters significantly improve energy utilization efficiency while maintaining safe battery operation. The robustness and repeatability of the optimization outcomes further validate the effectiveness of the proposed approach.

In conclusion, this chapter presents a systematically developed hybrid fuel cell–battery power architecture and an optimized fuzzy logic–based EMS for UAV applications. By integrating rule-based decision logic, fuzzy control, and genetic algorithm optimization, the proposed system achieves a balanced trade-off between performance, reliability, and real-time feasibility. The final EMS design provides a scalable and extensible foundation for future enhancements, including adaptive and learning-based energy management strategies.



1. GİRİŞ

İnsansız hava araçları (İHA), keşif-gözetleme, haritalama, haberleşme ve yük taşıma gibi sivil ve askeri birçok uygulamada giderek daha kritik bir rol üstlenmektedir. Özellikle multirotor İHA'lar; dikey kalkış ve iniş yetenekleri, manevra kabiliyetleri ve dar alanlarda görev yapabilmeleri sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak bu platformların operasyonel başarımı, büyük ölçüde üzerinde taşınan enerji sistemlerinin kapasitesi, güvenilirliği ve dinamik yük değişimlerine verebildiği tepki ile sınırlanmaktadır. Mevcut batarya tabanlı enerji sistemleri, yüksek güç taleplerini kısa sürelerde karşılayabilmelerine rağmen, sınırlı enerji yoğunlukları nedeniyle uzun süreli görevlerde yetersiz kalmaktadır.

Bu bağlamda proton değişim membranlı (veya polimer elektrolit membranlı) yakıt hücreleri (PEMFC), yüksek özgül enerji yoğunlukları ve çevreci yapıları sayesinde İHA uygulamaları için güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte PEM yakıt hücrelerinin en önemli dezavantajı, ani yük değişimlerine karşı gösterdikleri yavaş dinamik tepkidir. Multirotor İHA'larda kalkış, ani manevralar ve yüksek güçlü faydalı yüklerin devreye girmesi gibi durumlarda ortaya çıkan hızlı güç talepleri, yakıt hücresinin tek başına güvenilir bir şekilde çalışmasını zorlaştırmakta ve DA bara geriliminde kritik dalgalanmalara yol açabilmektedir. Bu durum, görev güvenliği açısından ciddi bir risk oluşturmaktadır.

Bu sorunların aşılabilmesi için, yakıt hücrelerinin yüksek enerji yoğunluğu avantajını, bataryaların yüksek güç yoğunluğu ve hızlı dinamik tepkisiyle birleştiren hibrit enerji sistemleri yaygın olarak önerilmektedir. Ancak hibrit sistemlerde temel zorluk, farklı karakteristiklere sahip bu iki enerji kaynağının hangi koşullarda, ne oranda ve ne süreyle devrede olacağını belirleyen etkin bir enerji yönetim sisteminin (EMS) tasarlanmasıdır. Literatürde önerilen birçok kural tabanlı EMS yaklaşımı, önceden tanımlanmış eşik değerlerine dayalı olup, sistemin karmaşık ve doğrusal olmayan davranışlarını yeterince temsil edememektedir. Ayrıca bu yaklaşımların büyük bir kısmında kontrol parametreleri sezgisel olarak belirlenmekte, bu da sistem başarımını sınırlamaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin temel amacı; multirotor bir insansız hava aracı için tasarlanan proton değişim membranlı yakıt hücresi (PEMFC) güç sisteminin, elektriksel ve fiziksel davranışlarını kapsayacak şekilde ayrıntılı olarak modellenmesi, yakıt hücresi ve lityum polimer (Li-Po) veya lityum iyon (Li-ion) batarya için doğru akım (DA) dönüştürücülerinin tasarlanması, modellenmesi ve bu sistemin dinamik yük koşulları altında kararlı ve güvenilir çalışmasını sağlayacak gelişmiş bir enerji yönetim sisteminin geliştirilmesidir. Bu kapsamda çalışmada, hibrit güç sisteminin tüm alt bileşenlerini içeren bütüncül bir mühendislik yaklaşımı benimsenmektedir.

Tez kapsamında öncelikle PEM yakıt hücresinin elektrokimyasal, termodinamik ve elektriksel karakteristikleri dikkate alınarak ayrıntılı bir matematiksel modeli oluşturulmuştur. Bu model, yakıt hücresinin yük akımına bağlı gerilim değişimleri, iç kayıpları ve yavaş geçici tepkisini temsil edecek şekilde geliştirilmiş ve benzetim ortamında doğrulanmıştır. Yakıt hücresinin değişken ve düşük seviyeli çıkış geriliminin, İHA'larda yaygın olarak kullanılan 48 V DA bara seviyesine uyarlanabilmesi amacıyla, uygun bir DA-DA yükseltici dönüştürücü tasarlanmış ve kapalı çevrim gerilim kontrolü ile modellenmiştir. Böylece güç elektroniği katmanının, yakıt hücresi dinamikleri üzerindeki etkileri de sistem bütünlüğü içerisinde ele alınmıştır.

Bunun yanı sıra, yakıt hücresinin ani yük değişimlerine karşı yetersiz kalan dinamik tepkisini dengelemek amacıyla hibrit yapıya bir batarya sistemi entegre edilmiştir. Bataryanın hızlı güç sağlayabilme yeteneği, yakıt hücresinin yüksek enerji yoğunluğu ile birlikte değerlendirilerek, bu iki kaynağın farklı çalışma koşullarında nasıl koordine edileceği enerji yönetim sistemi aracılığıyla ele alınmıştır. Bu doğrultuda, hibrit sistemin doğrusal olmayan, belirsizlik içeren ve zamana bağlı değişken davranışlarını daha etkin bir şekilde temsil edebilmek amacıyla bulanık mantık tabanlı bir enerji yönetim sistemi tasarlanmıştır.

Önerilen enerji yönetim sistemi; yük talebi, DA bara gerilimi ve enerji kaynaklarının çalışma durumlarını eş zamanlı olarak değerlendirerek, yakıt hücresi ve batarya arasındaki güç paylaşımını gerçek zamanlı olarak belirlemektedir. Ancak bulanık mantık tabanlı bir EMS'nin başarımı, büyük ölçüde üyelik fonksiyonlarının, kural tabanının ve kontrol parametrelerinin uygun şekilde seçilmesine bağlıdır. Bu nedenle

tez kapsamında, geliştirilen EMS'nin başarımını iyileştirmek amacıyla genetik algoritma tabanlı bir optimizasyon yaklaşımı uygulanmıştır. Bu optimizasyon süreci ile bara gerilim sapmalarının minimize edilmesi, yakıt hücresinin geçici zorlanmalardan korunması ve batarya kullanımının daha dengeli hale getirilmesi hedeflenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

İnsansız Hava Araçları (İHA); askeri, ticari ve sivil alanlardaki artan uygulamalarıyla modern havacılığın önemli bir bileşeni haline gelmiştir. Ancak bu araçların operasyonel sürekliliği ve menzili, mevcut batarya teknolojilerinin enerji yoğunluğu kısıtlamaları nedeniyle sınırlanmaktadır. Bu bağlamda, proton değişim membranlı yakıt hücresi (PEMFC) teknolojisi, yüksek enerji yoğunluğu ve çevre dostu yapısıyla öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, yakıt hücrelerinin dinamik yük değişimlerine karşı gösterdiği yavaş tepki ve sistem entegrasyonundaki zorluklar, kapsamlı araştırmaları gerektirmektedir. Bu bölümde, yakıt hücresi dinamiklerinden güç elektroniği arayüzlerine ve gelişmiş enerji yönetim stratejilerine uzanan literatürdeki temel çalışmalar incelenmiştir.

Yakıt hücrelerinin ani yük değişimleri sırasındaki geçici hal davranışları, sistem kararlılığı açısından kritik bir araştırma konusudur. Yapılan deneysel çalışmalarda, birim PEM yakıt hücresinin ani yük artışlarına maruz kaldığında çıkış geriliminde ani düşüş davranışı sergilediği ve bu davranışın iki farklı zaman sabitine sahip olduğu; gaz difüzyonu kaynaklı yaklaşık 1 saniyelik hızlı bir gecikme ile membran hidrasyonu kaynaklı yaklaşık 10 saniyelik daha yavaş bir gecikmeden oluştuğu gözlemlenmiştir [1]. Benzer bir deneysel çalışmada, kW sınıfı ticari bir PEM yakıt hücresi üzerinde dinamik başarımlar incelenmiş, yük değişimleri sırasında çıkış geriliminin ani tepkiler verdiği, ancak akımın kapasitör etkisi nedeniyle daha yumuşak bir geçiş sergilediği ve sıcaklık tepkisinin termal atalet nedeniyle daha yavaş olduğu rapor edilmiştir [2]. Bu dinamiklerin altında yatan fiziksel süreçlerin anlaşılması amacıyla geliştirilen sayısal modeller, ani yük değişimlerinin hücre içerisinde su yönetimi sorunlarına ve yakıt açlığına yol açabileceğini, bu durumun ise uygun su yönetimi stratejileriyle membran iletkenliğinin korunarak minimize edilebileceğini ortaya koymuştur [3].

Yakıt hücrelerinin bu karmaşık dinamiklerini yönetmek ve kararlı bir enerji çıkışı sağlamak için sistem modellemesi ve güç koşullandırma üniteleri büyük önem

taşımaktadır. 5 kW'lık bir yakıt hücresi sisteminin dinamiklerini; reaktan akışı, membran direnci ve çift katman kapasitansını içerecek şekilde modelleyen çalışmalar, değişken DA çıkışın şebeke veya yük standartlarına uygun hale getirilmesi için PID denetleyicili güç dönüştürücülerin gerekliliğini vurgulamıştır [4]. Bu gereksinim doğrultusunda, özellikle İHA uygulamalarına yönelik kompakt güç üniteleri üzerine yapılan çalışmalarda, 1.2 kW'lık bir hidrojen yakıt pili sistemi MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve bir DA-DA yükseltici dönüştürücü ile entegre edilerek, kompanzatör yardımıyla yakıt pilinin çıkış geriliminin %0.25 gibi düşük bir hata oranıyla başarıyla regüle edilebildiği gösterilmiştir [5].

Küçük ölçekli PEM yakıt hücrelerinin ulaşım ve taşınabilir güç sistemlerindeki uygulama ilerlemeleri incelendiğinde, bu sistemlerin 1000 Wh/kg'a varan yüksek özgül enerjileri sayesinde lityum-iyon bataryalara kıyasla çok daha uzun operasyonel süreler sunduğu, ancak düşük özgül güçleri nedeniyle ani güç taleplerini karşılamak için bataryalarla hibritlenmesinin kaçınılmaz olduğu belirtilmiştir [6]. Bu hibrit yapıların verimliliği ise uygulanan enerji yönetim sistemlerine (EMS) doğrudan bağlıdır. Hidrojen yakıt hücresi ile çalışan İHA'lar için enerji yönetim teknolojilerini kapsayan güncel bir derleme çalışmasında, enerji yönetimi; yakıt pili kontrolü, hibrit enerji sistemi stratejileri ve uçuş görevi ile bütünleşik yönetim olmak üzere üç katmanlı bir çerçevede ele alınmış ve sistem verimliliğini artırmak için kural tabanlı yöntemlerin ötesinde optimize veya yapay zeka tabanlı stratejilerin geliştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır [7].

1.3 Hipotez

Bu tez çalışmasının temel hipotezi; yaklaşık ağırlığı 20-25 kg olan, 2000 W nominal ve 4 kW maksimum güç değerlerine sahip olarak tasarlanmış döner kanatlı bir insansız hava aracı için tasarlanan PEM yakıt hücresi – lityum iyon batarya hibrit güç sisteminde, yakıt hücresinin ayrıntılı matematiksel modellenmesi, uygun güç elektroniği arayüzleri ile desteklenmesi ve gelişmiş bir enerji yönetim sistemi kullanılması durumunda, sistemin dinamik yük koşulları altında daha kararlı, verimli ve güvenilir bir şekilde çalışabileceğidir.

Bu kapsamda, yakıt hücresinin elektrokimyasal ve fiziksel dinamiklerini temsil eden ayrıntılı bir model ile DA-DA yükseltici dönüştürücülerin kapalı çevrim kontrol altında çalıştırılmasının DA bara gerilim regülasyonunu iyileştireceği ve güç

sisteminin dinamik davranışını daha öngörülebilir hale getireceği hipotez edilmektedir. Özellikle yakıt hücresinin yavaş geçici tepkisinin, uygun şekilde tasarlanmış bir güç elektroniği katmanı ve hibrit yapı sayesinde sistem başarımı üzerinde oluşturduğu olumsuz etkilerin azaltılabileceği öngörülmektedir.

Buna ek olarak, klasik kural tabanlı enerji yönetim sistemlerine kıyasla, bulanık mantık tabanlı bir enerji yönetim sisteminin; hibrit güç sisteminin doğrusal olmayan, belirsizlik içeren ve zamana bağlı değişen dinamiklerini daha etkin bir şekilde temsil edebileceği hipotez edilmektedir. Bu yaklaşımın, yakıt hücresi ve batarya arasındaki güç paylaşımını daha yumuşak ve uyumlu hale getirerek DA bara gerilim saptamalarını azaltacağı ve ani yük değişimlerine karşı sistemin dayanıklılığını artıracığı varsayılmaktadır.

Ayrıca, bulanık mantık tabanlı enerji yönetim sisteminin başarımının, üyelik fonksiyonları ve kontrol parametrelerinin genetik algoritma (GA) tabanlı bir optimizasyon yöntemi ile ayarlanması durumunda daha da iyileştirilebileceği hipotez edilmektedir. Bu optimizasyon süreci sayesinde, bara gerilim dalgalanmalarının minimize edileceği, yakıt hücresinin geçici zorlanmalara daha az maruz kalacağı ve bataryanın daha dengeli bir şekilde kullanılacağı öngörülmektedir. Böylece hibrit sistemin genel verimliliğinin artacağı ve yakıt hücresinin kullanım ömrünün uzatılabileceği varsayılmaktadır.



2. YAKIT HÜCRESİ

Proton değişim membranlı yakıt hücreleri (PEMFC), hidrojen ve oksijenin elektrokimyasal reaksiyonu yoluyla kimyasal enerjiyi doğrudan elektriksel enerjiye dönüştüren, yüksek güç yoğunluğuna ve düşük çalışma sıcaklığına sahip cihazlardır. Özellikle insansız hava araçları gibi küçük ölçekli uygulamalarda yüksek özgül enerji potansiyeli sunmaktadır [8]. Bir PEMFC sisteminin temel çalışma prensibi; anot ve katot elektrotları arasındaki proton iletkenliği ve elektronların dış devre üzerinden akışı esasına dayanır [4].

2.1 Elektrokimyasal Reaksiyonlar

Proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücrelerinin kalbinde; hidrojenin yakıt, oksijenin ise oksitleyici olarak kullanıldığı indirgenme-yükseltgenme tepkimeleri yer alır. Sistemin enerji dönüşümü, elektrolit görevi gören polimer bir membran tarafından ayrılan iki elektrot yüzeyinde gerçekleşir. Tepkime süreci bu anot ve katot kısımlarında peş peşe yarı tepkimeler olarak gerçekleşir.

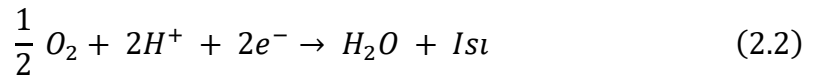
2.1.1 Anot yarı tepkimesi

Saf hidrojen gazı (H_2) anot kısmına beslenir ve katalizör tabakasında protonlara (H^+) ve elektronlara (e^-) ayırır. Bu süreç hidrojen oksidasyon reaksiyonu olarak adlandırılır. Bu yarı tepkime denklem 2.1'de gösterilmektedir.



2.1.2 Katot yarı tepkimesi

Membranın içinden geçen protonlar ve dış devreden gelen elektronlar, katotta oksijen (O_2) ile birleşerek su oluşturur. Bu süreç oksijen indirgeme reaksiyonu olarak bilinir ve ısı açığa çıkarır. Bu yarı tepkime denklem 2.2'de gösterilmektedir.

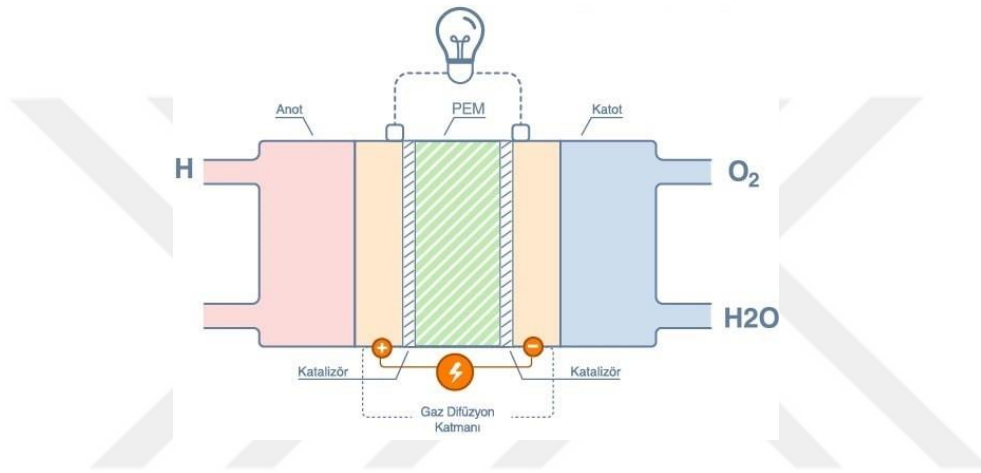


2.1.3 Toplam tepkime

Hücresinin genel tepkimesi, su, ısı ve elektrik enerjisi üretimi ile sonuçlanır. Toplam tepkime denklem 2.3’de gösterilmektedir.



Bu tepkimelerin gerçekleşmesi Şekil 2.1’de PEM tipi bir yakıt hücresinin yapısında görüldüğü üzere membran etrafında gerçekleşir. Hidrojen ve oksijen kullanılan yakıt hücresinde su buharı çıkışı verilir.



Şekil 2.1 : PEM yakıt hücresi [9].

2.1.4 Elektrokimyasal dinamik davranış

Anot ve katot yarı hücrelerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar, yakıt hücresinin yalnızca kararlı hal başarımını değil, aynı zamanda zamana bağlı dinamik tepkisini de belirlemektedir. Bu dinamik karakteristik, temelde elektrot yüzeylerinde gerçekleşen yük transfer reaksiyonlarının sonlu hızlara sahip olmasından kaynaklanır. Anot tarafında hidrojenin katalizör yüzeyinde emilimi, moleküler bağların kırılması ve proton–elektron ayrışması; katot tarafında ise oksijenin indirgenmesi ve su oluşumu, belirli kinetik sınırlamalar altında gerçekleşir. Bu nedenle yarı reaksiyonlar, akım yoğunluğundaki ani değişimlere anında uyum sağlayamaz ve geçici potansiyel sapmaları ortaya çıkar [10].

Dinamik davranışın temel belirleyicilerinden biri, elektrot–elektrolit arayüzünde oluşan elektro-kimyasal çift tabaka yapısıdır. Anot ve katot yüzeylerinde yük taşıyıcılarının yeniden dağılımı, potansiyelin zamana bağlı olarak evrilmesine neden olur. Akım talebinde ani bir artış meydana geldiğinde, reaksiyon hızının artabilmesi

için elektrot yüzeyindeki aşırı potansiyelin yükselmesi gerekir. Bu aşırı potansiyel artışı, belirli bir zaman gecikmesiyle gerçekleşir. Dolayısıyla anot ve katot potansiyelleri, uygulanan akımı takip eden dinamik değişimler sergiler.

Özellikle katot tarafındaki oksijen indirgenme reaksiyonu, kinetik olarak daha yavaş olması nedeniyle yakıt hücresinin dinamik cevabında baskın rol oynar. Katot reaksiyonunun çok adımlı mekanizması, elektron transferi ve ara türlerin oluşumu gibi süreçler içerdiğinden, potansiyel değişimlerine karşı daha yüksek bir zaman sabiti gösterir. Bu durum, yük değişimleri sırasında katot aşırı potansiyelinin anoda kıyasla daha belirgin ve uzun süreli dalgalanmalar göstermesine yol açar. Sonuç olarak hücre geriliminin dinamik tepkisi, büyük ölçüde katot yarı reaksiyonunun kinetik sınırlamaları tarafından şekillendirilir [4].

Anot tarafında ise hidrojen oksidasyon reaksiyonu daha hızlı kinetiğe sahip olmakla birlikte, hidrojenin katalizör yüzeyine bağlanması ve ayrışması yine de zamana bağlı bir süreçtir. Yük akımındaki hızlı artışlar sırasında, anot potansiyelinde kısa süreli geçici değişimler gözlemlenir. Bu geçici davranışlar, proton üretim hızının ve elektron akısının yeni çalışma noktasına ulaşmasıyla birlikte sönümlenir. Dolayısıyla anot dinamikleri genellikle daha kısa zaman ölçeklerinde etkili olurken, katot dinamikleri hücrenin genel geçici cevabını belirleyen ana unsur haline gelir [10].

Sonuç olarak, anot ve katot yarı reaksiyonlarının dinamik karakteristiği, elektrokimyasal kinetiklerin doğrudan bir yansımasıdır. Reaksiyon hızlarının sonlu olması, elektrot yüzeylerindeki yük birikimi ve aşırı potansiyelin zamana bağlı evrimi, yakıt hücresinin ani akım değişimlerine sınırlı bir hızda yanıt vermesine neden olur. Bu bağlamda yakıt hücresinin dinamik başarımı, yarı hücre reaksiyonlarının kinetik özellikleri dikkate alınmadan tam olarak açıklanamaz ve bu süreçler özellikle değişken yük altında çalışan sistemler için kritik bir belirleyici unsur olarak öne çıkar.

2.2 Yakıt Hücresi Matematiksel Modeli

PEM yakıt hücresi sistemlerinin dinamik yük koşulları altındaki davranışlarını doğru bir şekilde analiz edebilmek ve etkin bir enerji yönetim stratejisi geliştirebilmek için, sistemin fiziğine uygun, kapsamlı bir matematiksel modelin oluşturulması büyük önem taşımaktadır. Yakıt hücreleri; elektrokimyasal reaksiyonlar, kütle transferi ve termodinamik süreçlerin eş zamanlı gerçekleştiği, son derece doğrusal olmayan ve çok

parametrelili karmaşık sistemlerdir. Bu bölümde geliştirilen model, yakıt hücresinin ideal termodinamik potansiyelini ifade eden Nernst geriliminden, çalışma sırasında meydana gelen aktivasyon, ohmik ve konsantrasyon kaynaklı gerilim kayıplarının çıkarılması prensibine dayanmaktadır. Modelin gerçekçi bir şekilde kurgulanması, sadece elektriksel denklemlerin değil, aynı zamanda hidrojen ve oksijen gazların kısmi basınçları, sıcaklık değişimleri ve membran nemliliği gibi fiziksel parametrelerin de sisteme entegre edilmesini gerektirir. Takip eden alt başlıklarda, yakıt hücresinin çıkış gerilimini belirleyen elektrokimyasal eşitlikler ve bu eşitliklere girdi sağlayan gaz dinamiği denklemleri detaylı olarak sunulacaktır.

2.2.1 Gerilim denklemleri

Bir PEM yakıt hücresinin elektriksel çıkış gerilimi, ideal koşullar altında elde edilebilecek teorik gerilim değerinden çeşitli fiziksel ve elektrokimyasal kayıplar nedeniyle daha düşüktür. Bu nedenle, gerçek bir yakıt hücresinin uç geriliminin doğru biçimde modellenebilmesi için, ideal açık devre gerilimi ile hücre içerisinde meydana gelen kayıpların ayrı ayrı tanımlanması ve matematiksel olarak ifade edilmesi gerekmektedir. PEM yakıt hücrelerinde bu gerilim kayıpları genel olarak aktivasyon kaybı, ohmik kayıp ve konsantrasyon (kütle taşınımı) kaybı olmak üzere üç ana başlık altında incelenmektedir [4, 10].

Bu bağlamda, tek bir yakıt hücresinin çıkış gerilimini ifade eden temel matematiksel model denklem 2.4'te sunulmuştur:

$$V_{cell} = E - (V_{act} + V_{ohm} + V_{conc}) \quad (2.4)$$

Burada E , hücrenin ideal (tersinir) açık devre gerilimini; V_{act} , elektrot yüzeylerinde elektrokimyasal reaksiyonların başlatılması için gerekli aktivasyon gerilim kaybını; V_{ohm} , iyon ve elektron taşınımına karşı oluşan direnç kaynaklı ohmik gerilim kaybını; V_{conc} ise yüksek akım yoğunluklarında reaktiflerin elektrot yüzeyine taşınmasındaki sınırlamalardan kaynaklanan konsantrasyon gerilim kaybını temsil etmektedir. Aşağıdaki alt bölümlerde bu terimlerin her biri ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır.

2.2.1.1 Nernst denklemi

Yakıt hücresinin ideal gerilimi, hidrojen ve oksijen arasındaki elektrokimyasal reaksiyonun serbest enerji değişimine bağlı olarak tanımlanan tersinir gerilimdir. Standart koşullar (25 °C sıcaklık ve 1 atm basınç) altında bu değer, PEM yakıt

hücreleri için yaklaşık olarak 1.229 V civarındadır. Ancak, gerçek çalışma koşullarında sıcaklık ve gaz kısmi basınçları sürekli olarak değişmektedir. Bu nedenle, ideal hücre geriliminin hesaplanmasında Nernst denklemi kullanılmaktadır [4, 10].

Nernst denklemi, yakıt hücresinin ideal geriliminin sıcaklık ve reaktif gazların kısmi basınçlarına bağlı olarak nasıl değiştiğini ifade eder. Modelde kullanılan genelleştirilmiş Nernst eşitliği denklem 2.5'te verilmiştir:

$$E = E_0 - 0.85 \cdot 10^{-3}(T - 298.15) + \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} \right) \quad (2.5)$$

Bu ifadede E_0 , standart koşullardaki teorik tersinir gerilimi, R evrensel gaz sabitini, T hücre çalışma sıcaklığını (K), F Faraday sabitini, z elektrokimyasal reaksiyonda transfer edilen elektron sayısını temsil etmektedir. Ek olarak p_{H_2} , p_{O_2} ve p_{H_2O} değişkenleri sırasıyla hidrojen, oksijen ve suyun kısmi basınçlarını ifade etmek için kullanılmaktadır.

Bu reaksiyonlar göz önüne alındığında elektron transfer sayısı, $z = 2$ olarak alınmaktadır. Nernst denklemi, yakıt hücresinin açık devre geriliminin çalışma koşullarına bağlı olarak modellenmesini sağlamak ve tüm gerilim kayıplarının referans aldığı ideal gerilim seviyesini tanımlamaktadır.

2.2.1.2 Aktivasyon kayıpları

Aktivasyon gerilim kaybı, elektrot yüzeylerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonların başlaması için aşılması gereken enerji bariyerinden kaynaklanmaktadır. Bu kayıp, özellikle düşük akım yoğunluklarında baskın olup, hücre başarımını doğrudan etkileyen temel faktörlerden biridir. Reaksiyon kinetiği, katalizör aktivitesi, sıcaklık ve reaktif konsantrasyonları bu kaybın büyüklüğünü belirleyen ana parametrelerdir [10-14].

PEM yakıt hücreleri için aktivasyon gerilim kaybı, deneysel verilerden türetilmiş yarı-empirik bir ifade ile denklem 2.6'da gösterilen şekilde modellenebilir:

$$V_{act} = 0.9514 - 0.00312 \cdot T + 0.000187 \cdot T \cdot \ln(i) - 7.4 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot \ln(c_{O_2}) \quad (2.6)$$

Bu denklemde i akım yoğunluğunu, c_{O_2} katot tarafındaki oksijen konsantrasyonunu, T hücre sıcaklığını ifade etmektedir. Bu denklem, Tafel kinetiğine dayanmakta olup, akım yoğunluğu arttıktan sonra logaritmik olarak artan bir gerilim kaybını temsil eder.

Özellikle başlatma anlarında ve yük değişimlerinde bu bölge sistemin dinamik tepkisini belirleyen önemli bir faktördür. Dolayısıyla, aktivasyon kaybı düşük yük koşullarında baskınken, yüksek akım yoğunluklarında diğer kayıplar ön plana çıkmaktadır.

2.2.1.3 Konsantrasyon kayıpları

Konsantrasyon gerilim kaybı, yüksek akım yoğunluklarında reaktif gazların elektrot yüzeyine yeterince hızlı taşınamaması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu durum, özellikle katot tarafında oksijen difüzyonunun sınırlanmasıyla ilişkilidir ve hücre geriliminde ani düşüşlere neden olur. Elektrik mühendisliği literatüründe bu tür kayıplar genellikle kütle taşınımı kayıpları olarak adlandırılmaktadır [10-15].

Bu kayıp, deneysel olarak denklem 2.7'deki üstel formda modellenenabilir:

$$V_{conc} = (1.1 \cdot 10^{-4} - 1.2 \cdot 10^{-6}(T - 273)) \cdot \exp(8 \cdot 10^{-3} \cdot i) \quad (2.7)$$

Bu denklem, akım yoğunluğunun artmasıyla konsantrasyon kaybının üstel olarak büyüdüğünü açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle nominal çalışma akımının üzerindeki bölgelerde, hücre gerilimini sınırlayan temel etken bu kayıp türüdür.

2.2.1.4 Ohmik kayıplar

Ohmik gerilim kaybı, yakıt hücresinin iç yapısında bulunan elektriksel ve iyonik dirençlerden kaynaklanmaktadır. Bu kayıp; elektrotlar, bipolar plakalar ve özellikle proton değişim membranı (PEM) içerisindeki iyon iletim direncini kapsamaktadır [10-15]. Ohmik kayıp, akım yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Denklem 2.8'deki gibi ifade edilebilir:

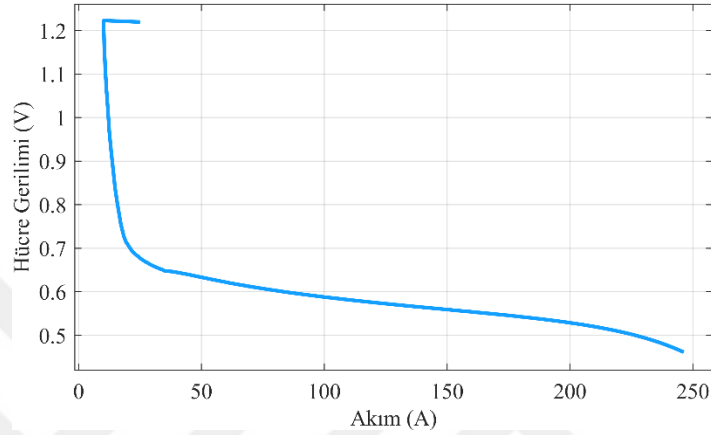
$$V_{ohm} = i \cdot R_{mem} \quad (2.8)$$

Burada R_{mem} , membranın toplam ohmik direncini temsil etmektedir. Membran direnci ise membran kalınlığı ve proton iletkenliğinin oranına eşittir. Bu ilişki kullanılarak denklem 2.9'daki şekilde hesaplanır:

$$R_{mem} = \frac{t_{mem}}{\sigma_{mem}} \quad (2.9)$$

Bu ifadede t_{mem} membran kalınlığını, σ_{mem} membranın proton iletkenliğini göstermektedir. Membran nem içeriği ve sıcaklık, iletkenlik üzerinde doğrudan etkili

olduğundan, ohmik kayıp çalışma koşullarına oldukça duyarlıdır. Sonuç olarak, yukarıda tanımlanan denklemler bir araya getirildiğinde, yakıt hücresinin statik ve dinamik koşullar altındaki elektriksel karakteristiği (V-I eğrisi) elde edilir [16, 17]. Kayıplarla oluşan bu tipik eğri Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Model; aktivasyon, ohmik ve konsantrasyon bölgelerindeki kayıpların benzetimini yaparak, İHA güç sisteminin tasarımı için gerekli olan hassas gerilim profilini sağlar [18].



Şekil 2.2 : Yakıt hücresi akım-gerilim karakteristiği.

2.2.2 Fiziksel denklemler

Bir PEM yakıt hücresinin matematiksel olarak doğru biçimde modellenebilmesi yalnızca elektriksel gerilim denklemlerinin tanımlanmasıyla sınırlı değildir. Hücrenin başarımı; hidrojen ve oksijen gazlarının beslenme koşulları, kısmi basınçları, akış hızları, tüketim oranları ve hücre içerisinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlarla doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, PEM yakıt hücresinin fiziksel modeli; gaz dinamiği, termodinamik ilişkiler ve Faraday elektroliz yasasına dayalı elektrokimyasal denklemler birlikte ele alınarak oluşturulmalıdır [8]. Yakıt hücresine giren reaktif gazların akış hızlarından yola çıkılarak kısmi basınçlarının hesaplanması, gaz tüketimi ile elektriksel akım arasındaki ilişki kurulmalıdır. Su buharı doygunluğunun da model oluşturulurken dikkate alınması gerekmektedir.

2.2.2.1 Kısmi basınçlar

Yakıt hücresi kanallarındaki gazların termodinamik davranışı, literatürde yaygın olarak kabul gören İdeal Gaz Yasası prensiplerine göre modellenmiştir. Bu yasa, gazların hacimsel akış oranları ile kısmi basınçları arasındaki ilişkiyi kurarak, elektrokimyasal başarımlar üzerinde kritik bir etkiye sahip olan reaktan basınçlarının

hesaplanmasına olanak tanır [8]. Basınç, hacim, mol sayısı ve sıcaklık arasındaki temel ilişki denklem 2.10'da sunulmuştur:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2.10)$$

Burada P gazın mutlak basıncını, V gaz hacmini, n mol sayısını, R evrensel gaz sabitini, T mutlak sıcaklığı (K) temsil etmektedir. Modelde, ölçülen veya kontrol edilen hidrojen ve oksijen giriş akış hızlarına bu yasa uygulanarak, anot ve katot tarafındaki efektif kısmi basınçlar türetilmektedir. Elde edilen bu basınç değerleri, daha sonra Nernst denkleminde kullanılarak yakıt hücresinin teorik açık devre geriliminin dinamik olarak güncellenmesini sağlar. Bu yaklaşım, gaz besleme koşullarındaki değişimlerin hücre başarımına olan etkisinin doğru bir şekilde modellenmiş olmasına olanak tanır.

2.2.2.2 Akıma bağlı gaz tüketimi modeli

Yakıt hücresinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar ile hücrenin ürettiği elektrik akımı arasındaki temel ilişki Faraday'ın Elektroliz Yasası ile tanımlanmaktadır. Bu yasa, kimyasal tepkime miktarının, sistemden geçen elektrik yükü ile doğru orantılı olduğunu ifade eder. Bu bağlamda, belirli bir akım değeri için tüketilen hidrojen ve oksijen miktarları doğrudan hesaplanabilir [8].

Dinamik yük koşullarında, yakıt hücresinden çekilen akıma bağlı olarak tüketilen gazların molar akış hızı denklem (2.11) ile modellenmiştir:

$$n_{gaz} = \frac{I}{zF} \quad (2.11)$$

Bu denklemde n_{gaz} tüketilen gazın molar akış hızını (mol/s), I hücreden geçen toplam elektrik akımını (A), z gaz molekülü başına transfer edilen elektron sayısını, F Faraday sabitini temsil etmektedir. PEM yakıt hücresinde anot ve katot reaksiyonları dikkate alındığında;

- Hidrojen için anot tarafında her bir hidrojen molekülü başına iki elektron açığa çıkmakta ($z=2$),
- Oksijen için katot tarafında bir oksijen molekülü başına dört elektron transfer edilmektedir ($z=4$).

Bu bilgiler kullanılarak, belirli bir akım seviyesinde hidrojen ve oksijenin ne kadar tüketileceği doğrudan hesaplanabilir. Elde edilen molar tüketim değerleri, ideal gaz yasası ile birleştirilerek belirli sıcaklık ve basınç altında gerekli hacimsel gaz debileri hesaplanabilir. Böylece, yakıt hücresinin talep ettiği güç ile reaktif gaz besleme sistemi arasında fiziksel olarak tutarlı bir bağ kurulmuş olur.

2.2.2.3 Su buharı doygunluk basıncı modeli

PEM yakıt hücrelerinde su, hem reaksiyon ürünü hem de membran iletkenliğini doğrudan etkileyen kritik bir bileşendir. Gaz kanallarında ve elektrot yüzeylerinde oluşan su buharı, gazların efektif kısmi basınçlarını düşürerek hücre başarımını sınırlayabilir. Bu nedenle, modelleme aşamasında su buharının doygunluk basıncının dikkate alınması gerekmektedir.

Su buharının doygunluk basıncı, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak deneysel verilere dayalı denklem 2.12'deki ifade ile hesaplanabilir [8]:

$$\log_{10} P_{H_2O,sat} = -2.18 + 2.95 \cdot 10^{-2} T_c - 9.18 \cdot 10^{-5} \cdot T_c^2 + 1.44 \cdot 10^{-7} \cdot T_c^3 \quad (2.12)$$

Burada $P_{H_2O,sat}$ su buharının doygunluk basıncını, T_c ise santigrat cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir. Sıcaklık birim dönüşümü ise denklem 2.13'de gösterildiği şekilde yapılır:

$$T_c = T - 273.15 \quad (2.13)$$

Bu modelleme yaklaşımı, akış hızlarının ve kısmi basınçların kullanım faktörleri ile adapte edilerek matematiksel olarak ifade edilmesini sağlar. Termodinamik ve elektrokimyasal prensiplerin bu ardışık uygulaması, PEM yakıt hücresi başarımının, özellikle güç çıkışı açısından, öngörülebilir bir çerçevede analiz edilmesine olanak tanır.

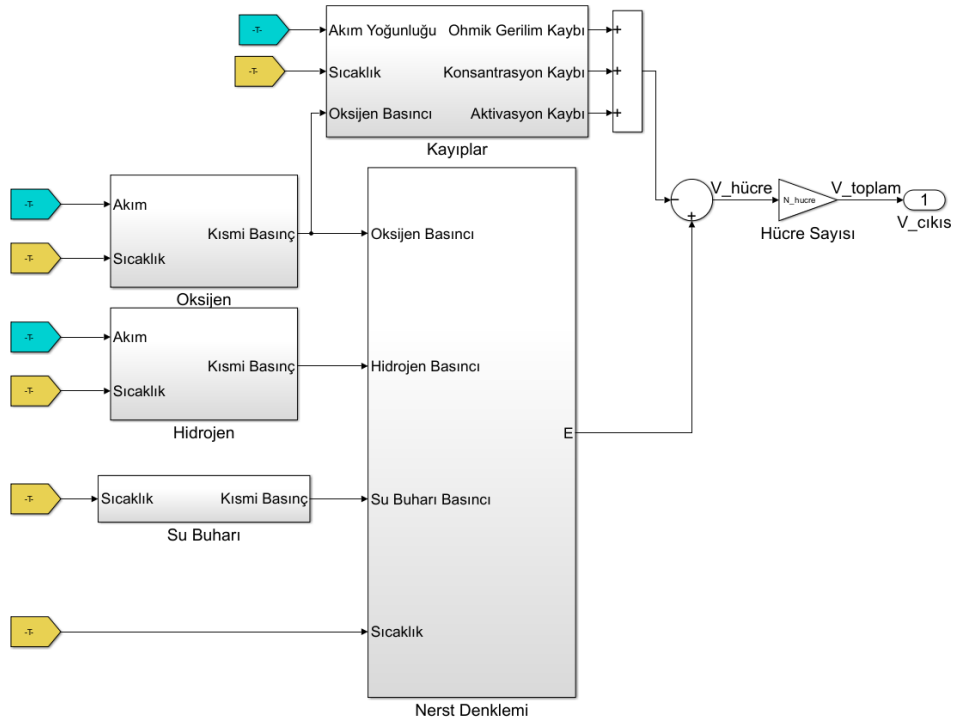
2.3 MATLAB/Simulink Modeli

İHA güç sistemi için maksimum gücü 4 kW olan ve nominal gücü 2200 W olan bir PEM yakıt hücresi için parametreler seçilip model oluşturulmuştur. Geliştirilen matematiksel modelde kullanılan ve yakıt hücresi yığınının fiziksel özelliklerini temsil eden temel parametreler Çizelge 2.1'de listelenmiştir.

Çizelge 2.1 : Yakıt hücresi model parametreleri.

Sembol	Değer	Açıklama
R	0.08206	Evrensel gaz sabiti
F	96485 C/mol	Faraday sabiti
E ₀	1.229 V	25°C'de standart hücre potansiyeli
A _{hücre}	0.232 m ²	Hücre aktif alanı
N _{hücre}	40	Yakıt hücresi sayısı
P _H	0.99	Hidrojen saflığı (0–1)
v _a	0.0159 m ³	Anot hacmi
t _m	0.0175 cm	Membran kalınlığı
T	353 K	Çalışma sıcaklığı
p _{ortam}	1 atm	Ortam basıncı
P _O	0.21	Oksijen saflığı (mol kesri)
v _k	0.0025 m ³	Katot hacmi

Bu parametreler ve yukarıda açıklanan denklemler temel alınarak oluşturulan modelin MATLAB/Simulink ortamındaki blok diyagram uygulaması ise Şekil 2.3'de gösterilmektedir. Benzetim modeli, bu fiziksel ve elektrokimyasal alt blokların entegrasyonu ile yakıt hücresinin dinamik davranışının benzetimini bütüncül bir şekilde yapmaktadır.



Şekil 2.3 : PEM yakıt hücresi Simulink modeli.

3. GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜ DEVRELERİ

Bu çalışmada ele alınan hibrit enerji sistemi mimarisinde, yakıt hücresi ve batarya farklı karakteristiklere sahip iki ayrı enerji kaynağı olarak tanımlanmıştır. Sistem bütünlüğünün sağlanabilmesi ve enerji yönetim stratejilerinin etkin biçimde uygulanabilmesi amacıyla, her iki enerji kaynağının nominal çıkış gerilimi 24 V olarak seçilmiştir. Buna karşılık, insansız hava aracı güç dağıtım altyapısında yüklerin ve tahrik sistemlerinin beslendiği ortak DA bara gerilimi 48 V olarak belirlenmiştir. Bu gerilim seviyeleri arasındaki uyumsuzluk, enerji kaynakları ile DA bara arasında uygun güç elektroniği dönüştürücülerinin tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır.

Bu kapsamda, enerji kaynaklarının DA baraya verimli, güvenli ve kontrol edilebilir biçimde bağlanabilmesi için iki farklı güç elektroniği ara yüzü geliştirilmiştir. İlk olarak, çıkış karakteristiği yavaş dinamiklere sahip olan yakıt hücresinin 48 V DA baraya entegrasyonu amacıyla, yüksek güç seviyelerinde akım dalgalanmasını azaltan ve yük paylaşımında avantaj sağlayan beş fazlı bir yükseltici DA-DA dönüştürücü tasarlanmıştır. Çok fazlı yapı sayesinde giriş akımı dağıtılarak güç kayıpları ve devre elemanlarının büyüklükleri azaltılırken, çıkış gerilim dalgalanmaları da etkin biçimde bastırılmaktadır.

İkinci olarak, sistemde hem enerji sağlayıcı hem de enerji depolayıcı rol üstlenen bataryanın DA baraya bağlantısı için çift yönlü çalışabilen, dört anahtarlı yükseltici-alçaltıcı dönüştürücü yapısı tercih edilmiştir. Bu dönüştürücü, bataryanın gerektiğinde DA barayı beslemesine veya fazla enerjinin bataryada depolanmasına olanak tanıyarak hibrit sistemin enerji yönetim esnekliğini artırmaktadır. Böylece, yakıt hücresi ve batarya arasındaki güç paylaşımı, belirlenen enerji yönetim stratejileri doğrultusunda etkin biçimde gerçekleştirilebilmektedir.

Bu bölümde, söz konusu güç elektroniği dönüştürücülerinin çalışma prensipleri, tasarım kriterleri ve sistem başarımına etkileri ele alınmaktadır.

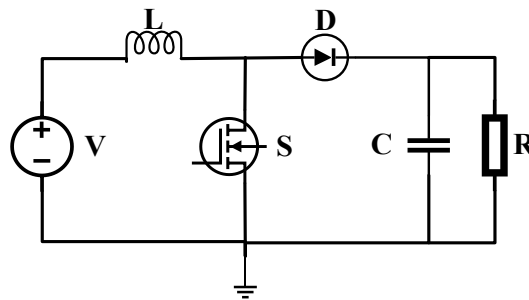
3.1 Faz Kaydırmalı Yükseltici Dönüştürücü Devre Tasarımı ve Modeli

Yakıt hücresi tabanlı enerji sistemlerinde güç elektroniği arayüzü, yalnızca gerilim seviyesini dönüştürmekle kalmamakta; aynı zamanda kaynağın dinamik karakteristiğini, akım dalgalanmalarını ve genel sistem verimliliğini doğrudan etkilemektedir [19]. Özellikle PEM yakıt hücreleri, düşük çıkış gerilimi, yüksek akım seviyeleri ve sınırlı dinamik yanıt kabiliyetleri nedeniyle doğrudan DA bara bağlantısına uygun değildir [20, 21]. Bu nedenle, yakıt hücresinin çıkış gerilimini istenen DA bara seviyesine yükseltebilen ve giriş akımını mümkün olduğunca düzgün tutan bir yükseltici DA-DA dönüştürücü yapısının kullanılması zorunlu hale gelmektedir.

Bu çalışmada, yakıt hücresinin 24 V nominal çıkış geriliminin 48 V DA baraya aktarılması amacıyla, sürekli iletim modunda (CCM) çalışan, 5-fazlı faz kaydırmalı yükseltici (interleaved boost) dönüştürücü yapısı tercih edilmiştir.

3.1.1 Yükseltici devre topolojisi

Yükseltici dönüştürücü, girişteki doğru gerilimi daha yüksek seviyede bir doğru gerilime dönüştüren anahtarlama bir güç elektroniği devresidir. Temel yapısı; bir anahtarlama elemanı, bir diyot, bir indüktans ve bir çıkış kapasitöründen oluşmaktadır. Anahtarlama işlemi sırasında indüktans üzerinde enerji depolanmakta ve bu enerji, anahtar kapandığında çıkışa aktarılmaktadır. Şekil 3.1’de basit devre topolojisi gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Yükseltici devre topolojisi.

Yükseltici dönüştürücünün temel çalışma prensibi iki ana durum üzerinden açıklanabilir. Bu durumlar anahtarın durumuna göre belirlenir.

Anahtar iletimde iken, giriş kaynağından çekilen enerji indüktans üzerinde depolanır ve diyot ters polarmada olduğundan çıkış devresinden izole edilir.

Anahtar iletimde değilken, indüktans üzerinde depolanan enerji diyot üzerinden çıkışa aktarılır ve giriş gerilimi ile seri halde toplanarak çıkış geriliminin giriş geriliminden daha yüksek olmasını sağlar.

Yükseltici dönüştürücüler, indüktans akımının sifıra düşüp düşmemesine bağlı olarak kesintili iletim modu (DCM) veya sürekli iletim modu (CCM) altında çalışabilir. Yüksek güç seviyelerinde ve düşük giriş gerilimlerinde çalışan yakıt hücresi uygulamalarında, akım dalgalanmalarının azaltılması ve daha kararlı bir çalışma elde edilmesi amacıyla CCM çalışma modu tercih edilmektedir.

Sürekli iletim modunda, ideal bir yükseltici dönüştürücü için giriş ve çıkış gerilimleri arasındaki ilişki, anahtarlama doluluk oranı (D) cinsinden denklem 3.1'deki şekilde ifade edilir:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (3.1)$$

Burada; V_{in} , dönüştürücü giriş gerilimini, V_{out} , çıkış gerilimini ve D, anahtarlama doluluk oranını temsil etmektedir.

Bu denklemden görüleceği üzere, doluluk oranı arttıkça çıkış gerilimi de artmaktadır. Ancak pratik uygulamalarda anahtarlama kayıpları, iletim kayıpları ve yarı iletken elemanların sınırları nedeniyle doluluk oranının belirli bir üst değerin üzerine çıkması verim ve kararlılık açısından tercih edilmemektedir [5, 22]. Bu durum, yüksek gerilim yükseltme oranlarının tek fazlı yükseltici yapılarıyla gerçekleştirilmesini sınırlayan temel etkenlerden biridir.

Tek fazlı yükseltici dönüştürücüler, yüksek güç seviyelerinde çalışırken giriş akımında büyük dalgalanmalara ve anahtarlama elemanları üzerinde yüksek akım streslerine neden olmaktadır. Bu durum, özellikle hassas bir kaynak olan PEM yakıt hücreleri için istenmeyen bir durumdur [21, 22]. Bu sınırlamaları aşmak amacıyla, çok fazlı (interleaved) yükseltici dönüştürücü yapıları geliştirilmiştir.

Faz kaydırmalı yükseltici dönüştürücülerde, birden fazla yükseltici faz paralel olarak bağlanır ve her fazın anahtarlama sinyali belirli bir faz kayması ile sürülür. Beş fazlı durum için faz kayması denklem 3.2'deki gibi hesaplanır:

$$\frac{360^\circ}{5} = 72^\circ \quad (3.2)$$

Bu yaklaşım sayesinde:

- Toplam giriş akımı fazlar arasında paylaştırılarak her bir anahtar ve indüktans üzerindeki akım stresi azaltılır,
- Fazlar arası akım dalgalanmaları birbirini kısmen sönümleyerek giriş ve çıkış akımındaki dalgalanma önemli ölçüde düşürülür,
- Daha küçük indüktans ve kapasitör değerleri ile aynı başarımlar elde edilebilir,
- Yüksek güç seviyelerinde daha yüksek sistem verimi sağlanır.

Bu çalışmada, yakıt hücresinin DA baraya bağlanmasında 5-fazlı faz kaydırmalı yükseltici dönüştürücü yapısının tercih edilmesinin temel nedenleri hem elektriksel hem de sistem düzeyinde değerlendirilmektedir. Öncelikle, yakıt hücresinin düşük gerilim–yüksek akım karakteristiği, giriş akımındaki dalgalanmalara karşı hassas bir yapı sergilemesine neden olmaktadır. Çok fazlı yapı sayesinde giriş akımı daha düzgün hale getirilerek yakıt hücresinin ömrü ve kararlılığı artırılmaktadır.

Ayrıca, çok fazlı yapı; yüksek güç aktarımı gerektiren insansız hava aracı uygulamalarında, anahtarlama elemanlarının termal yükünü azaltmakta ve soğutma gereksinimlerini daha yönetilebilir seviyelere çekmektedir. Beş fazlı yapı, faz sayısı ile sistem karmaşıklığı arasında uygun bir denge sağlayarak hem verim hem de kontrol edilebilirlik açısından avantajlı bir çözüm sunmaktadır.

Sonuç olarak, 5-fazlı faz kaydırmalı yükseltici dönüştürücü, yakıt hücresi tabanlı hibrit enerji sistemlerinde; düşük akım dalgalanması, yüksek verim ve güç yoğunluğu gereksinimlerini karşılayan uygun bir arayüz topolojisi olarak öne çıkmakta olduğu için tercih edilmiştir.

3.1.2 Tasarım

İHA güç sisteminin gereksinimleri doğrultusunda, yakıt hücresi arayüzü için tasarlanan 5-fazlı tanzimli yükseltici devrenin başarımını belirleyen en kritik aşama, anahtarlama frekansı, indüktans (L) ve kapasitans (C) değerlerinin optimize edilmesidir. Bu çalışmada, güç yoğunluğu ve anahtarlama kayıpları arasındaki denge gözetilerek anahtarlama frekansı 20 kHz olarak belirlenmiştir. Tasarımın temel hedefi, yakıt hücresinin ömrünü doğrudan etkileyen akım dalgalanmasını %1,5-2 bandında tutmak ve DA bara gerilimindeki dalgalanmayı %1 seviyesinin altına indirmektir. Devre parametrelerinin hesaplanmasında, sistemin sürekli iletim modunda (CCM)

çalıştığı varsayılmıştır. Nominal giriş gerilimi (V_{in}) 24 V, hedef çıkış gerilimi (V_{out}) ise 48 V olarak alınmıştır.

3.1.2.1 Doluluk oranı

Yükseltici çeviricinin transfer fonksiyonu, giriş ve çıkış gerilimleri arasındaki ilişkiyi anahtarlama sinyalinin doluluk oranı (D) üzerinden tanımlar [20, 21]. İdeal koşullar altında ve kayıplar ihmal edildiğinde, sistemin nominal çalışma noktası için gerekli doluluk oranı denklem 3.3 ile hesaplanmıştır:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 - \frac{24}{48} = 0.5 \quad (3.3)$$

Bu %50 doluluk oranı, 5-fazlı yapıda her bir fazın 72 derecelik faz farkıyla sürülmesi durumunda, giriş akımındaki dalgalanmaların açısından da etkin bir çalışma noktasıdır.

3.1.2.2 Faz indüktörlerinin seçimi

Yakıt hücresi yığımından çekilen akımın pürüzsüz olması, kimyasal reaksiyonun kararlılığı için hayati önem taşır. Bu nedenle indüktör tasarımı, izin verilen maksimum akım dalgalanması (ΔI_L) kriterine göre yapılır. Bu çalışmada, yakıt hücresi koruma kriterleri göz önüne alınarak akım dalgalanma sınırı %1.5-2 aralığında hedeflenmiştir. Her bir faz için gerekli indüktans değeri, giriş gerilimi, doluluk oranı, anahtarlama frekansı (f_{sw}) ve hedeflenen akım dalgalanması dikkate alınarak denklem (3.4) ile türetilir:

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_L \cdot f_{sw}} \quad (3.4)$$

Tasarım hedefleri doğrultusunda yapılan optimizasyon sonucunda, her bir faz için 0.0005 H değerinde özdeş indüktörlerin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu değer, 20 kHz anahtarlama frekansında akım değişim hızını sınırlayarak, giriş akımındaki yüksek frekanslı bileşenleri filtrelemekte ve tanzimli yapının da katkısıyla toplam giriş akımı dalgalanmasını ihmal edilebilir seviyelere indirmektedir.

3.1.2.3 Kapasitör seçimi

48 V DA bara geriliminin kararlılığı, aviyonik sistemlerin ve motor sürücülerin güvenli çalışması için kritik bir parametredir. Çıkış kapasitörü (C_{out}), anahtarlama

periyotları boyunca enerji dengesini sağlayarak gerilim dalgalanmasını (ΔV_{out}) sınırlar. Bu çalışmada, gerilim dalgalanması için oldukça sıkı bir tolerans olan %1 seviyesi hedeflenmiştir. Gerekli minimum kapasitans değeri, yük akımı (I_{out}), doluluk oranı ve izin verilen gerilim dalgalanması kullanılarak denklem 3.5 ile hesaplanır:

$$C_{out} = \frac{I_{out} \cdot D}{f_{sw} \cdot \Delta V_{out}} \quad (3.5)$$

Sistemin tam yük altındaki akım talebi ve %1'lik gerilim kısıtlaması altında yapılan hesaplamalar ve benzetim iterasyonları sonucunda, çıkış kapasitörü değeri 2 mF olarak belirlenmiştir. Bu yüksek kapasitans değeri, 5-fazlı yapının getirdiği yüksek frekanslı şarj-deşarj döngülerini etkin bir şekilde sönümleyerek, DA bara geriliminin dinamik yük değişimlerinde dahi 48 V referans değerinde sabit kalmasını sağlamaktadır.

Sonuç olarak seçilen tasarım parametreleri Çizelge 3.1'de ifade edilmiştir.

Çizelge 3.1 : Tasarım değerleri.

Parametre	Değer
Giriş gerilimi	24 (V)
Çıkış gerilimi	48 (V)
Anahtarlama frekansı	20 (kHz)
Faz indüktörleri	0.0005 (H)
Kapasitör	2 (mF)
Doluluk oranı	0.5

3.1.3 Kontrol

Yakıt hücresi tabanlı enerji sistemlerinde güç elektroniği dönüştürücülerinin kararlı ve güvenilir biçimde çalışabilmesi, yalnızca uygun devre tasarımı ile değil, aynı zamanda etkin bir kapalı çevrim kontrol yapısının uygulanmasıyla mümkün olmaktadır. Özellikle çok fazlı yükseltici dönüştürücülerde; çıkış geriliminin regülasyonu, fazlar arası akım paylaşımının dengelenmesi ve giriş kaynağı üzerindeki akım dalgalanmalarının sınırlandırılması, kontrol sisteminin temel hedefleri arasında yer almaktadır [22].

Bu nedenler göz önünde bulundurularak, bu çalışmada tasarlanan 5-fazlı faz kaydırmalı dönüştürücü için gerilim ve akım temelli, çift çevrimli kapalı çevrim bir kontrol mimarisi tercih edilmiştir.

3.1.3.1 PI kontrol

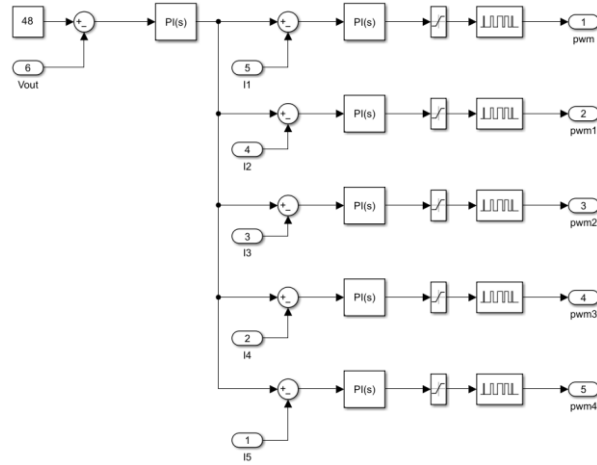
Endüstriyel güç elektroniği uygulamalarında, basit yapısı, kararlı davranışı ve pratikteki başarısı nedeniyle oransal–integral (PI) kontrolcü yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompanzator, hata sinyaline hem anlık (oransal) hem de zamana bağlı (integral) bir tepki vererek, sistemin hem hızlı hem de kalıcı hatasız bir şekilde referans değerine ulaşmasını sağlamaktadır [20-22]. Genel bir PI transfer fonksiyonu denklem 3.6’da gösterildiği şekilde oransal kazanç (K_p) ve integral kazancı (K_i) ile hesaplanır:

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3.6)$$

Oransal kazanç sistemin geçici rejimdeki hızını belirlerken, integral kazanç sürekli hal hatasını ortadan kaldırarak çıkışın referans değeri hassas biçimde takip etmesini sağlamaktadır.

3.1.3.2 Çift geri beslemeli kontrol

Bu çalışmada kullanılan kontrol yapısı, dış gerilim çevrimi ve iç akım çevrimlerinden oluşan hiyerarşik bir kapalı çevrim mimarisine dayanmaktadır. Bu tür çift çevrimli kontrol yapıları, özellikle yüksek güçlü DA-DA dönüştürücü uygulamalarında; sistemin hem kararlılığını artırması hem de geçici rejim başarımını iyileştirmesi nedeniyle tercih edilebilmektedir [20]. Hiyerarşik yapı sayesinde, farklı dinamiklere sahip büyüklükler ayrı çevrimler altında kontrol edilerek daha etkin bir regülasyon sağlanmaktadır. Modelde kullanılan gerilim ve akım geri beslemesi ile kontrolcülerden oluşan çevrim Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 : Gerilim ve akım geri beslemeli kontrol modeli.

Bu mimaride, öncelikle DA bara çıkış gerilimi sürekli olarak ölçülmekte ve belirlenen referans gerilim değeri ile karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma sonucunda elde edilen gerilim hatası, sistemin dış çevrimini oluşturan gerilim kompanzatörüne uygulanmaktadır. Gerilim kompanzatörü, çıkış gerilimindeki sapmaları telafi edebilmek amacıyla, dönüştürücünün üretmesi gereken toplam referans akım değerini belirlemektedir. Böylece, gerilim kontrolü doğrudan anahtarlama sinyallerini etkilemek yerine, daha hızlı dinamiklere sahip olan akım çevrimleri üzerinden dolaylı olarak gerçekleştirilmiş olmaktadır.

Gerilim kompanzatörünün ürettiği bu referans akım bilgisi, beş fazlı dönüştürücünün her bir fazına dağıtılmakta ve her faz için ölçülen indüktör akımı geri beslemesi ile karşılaştırılmaktadır. Bu işlem sonucunda, her faz için ayrı ayrı tanımlanan akım kompanzatörlerine giriş sinyalleri oluşturulmaktadır. İç akım çevrimleri, hızlı dinamik yanıtları sayesinde indüktör akımlarının referans değerlerini hassas biçimde takip etmesini sağlamak ve fazlar arasında akım dengesizliği oluşmasını engellemektedir.

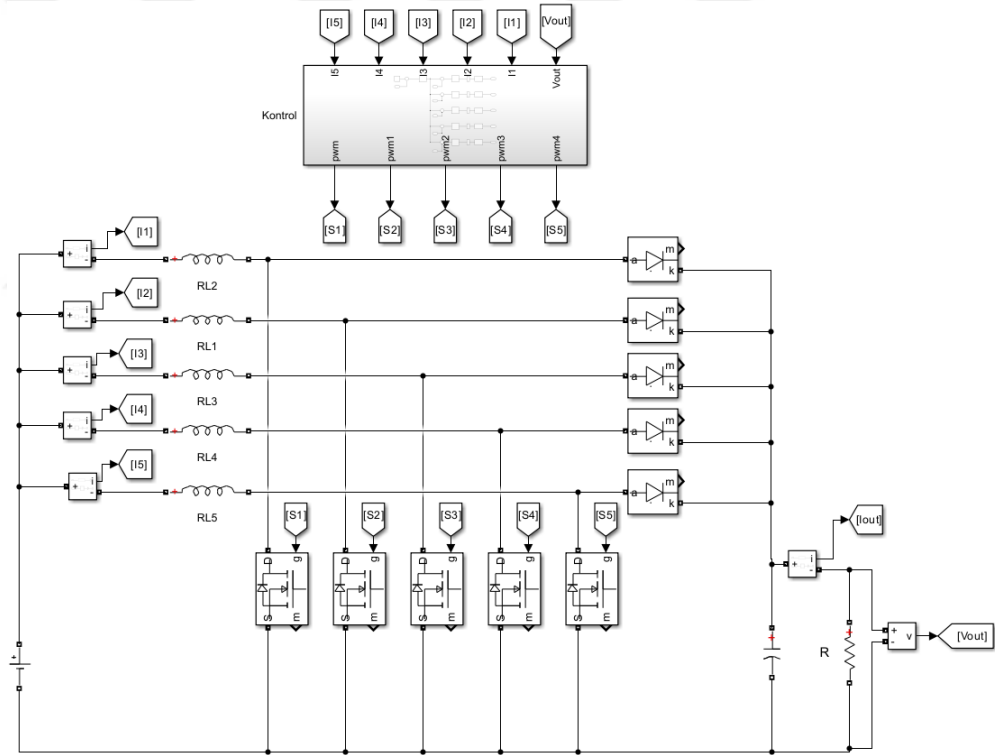
Akım kompanzatörlerinin çıkışları, ilgili faza ait anahtarlama elemanlarını süren Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) üreticilerini kontrol etmektedir. PWM sinyalleri, çok fazlı yapının gerektirdiği şekilde fazlar arasında 72° faz kayması olacak biçimde üretilerek 5-fazlı çalışma sağlanmaktadır. Bu faz kayması, giriş ve çıkış akımlarındaki dalgalanmaların birbirini kısmen sönmülmesine olanak tanıyarak, toplam akım dalgalanma seviyesinin düşürülmesine katkı sağlamaktadır.

3.1.3.3 Kontrol katsayıları

Gerilim çevrimi, sistemin daha yavaş dinamiklere sahip dış kontrol çevrimi olarak ele alınmış olup, temel görevi DA bara gerilimini 48 V referans değeri etrafında kararlı bir şekilde regüle etmektir. Çıkış gerilimindeki sapmalar, gerilim kompanzatörü tarafından işlenerek dönüştürücünün üretmesi gereken toplam referans akım seviyesi belirlenmektedir. Yapılan modelleme ve benzetim çalışmaları sonucunda, gerilim kompanzatörü için oransal kazanç $K_p=0.17$ ve integral kazanç $K_i=6.6$ olarak seçilmiştir. Bu kazançlar, çıkış geriliminde aşırı salınıma neden olmadan hızlı bir geçici rejim yanıtı elde edilmesini sağlarken, sürekli hal hatasının da etkin biçimde ortadan kaldırılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca gerilim çevriminin bant genişliği, iç akım çevrimlerine kıyasla daha düşük seçilerek kontrol yapısında hiyerarşik bir düzen oluşturulmuştur.

İç akım çevrimleri ise dönüştürücünün hızlı dinamiklerine yanıt veren ve çok fazlı yapıda fazlar arası akım paylaşımını doğrudan kontrol eden çevrimlerdir. Her bir faz için ayrı bir kompanzatör kullanılarak indüktör akımlarının referans değerlerini hassas biçimde takip etmesi sağlanmıştır. Bu kapsamda akım kompanzatörlerinin kazançları $K_p=1$ ve $K_i=0.4$ olarak belirlenmiştir. Seçilen bu değerler, indüktör akımlarının hızlı ve kararlı bir şekilde referans seviyesine ulaşmasını sağlarken, anahtarlama frekansına bağlı yüksek frekanslı gürültülerin kontrol başarımı üzerindeki olumsuz etkilerini sınırlandırmaktadır. Akım çevrimlerinin hızlı tepki kabiliyeti sayesinde ani yük değişimleri sırasında DA bara geriliminde oluşabilecek saptmalar da etkin biçimde bastırılmaktadır.

Sonuç olarak 5-fazlı devrenin ve kontrolcüler tarafından oluşan MATLAB/Simulink modeli Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : 5-fazlı devre Simulink modeli.

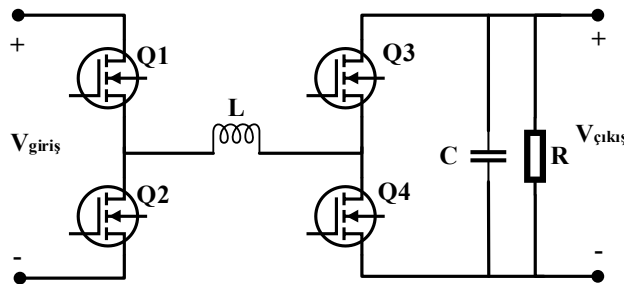
3.2 4-Anahtarlı Çift Yönlü Yükselten-Alçaltan Devre

Bu tasarımda, lityum-iyon batarya, hibrit enerji sisteminin ikincil güç kaynağı olarak görev yapmakta ve hem enerji sağlaması hem de uygun koşullarda şarj edilebilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, batarya ile DA bara arasındaki güç aktarımının iki yönlü olarak gerçekleştirilebilmesi kritik bir gereksinimdir. Tek yönlü DA-DA

dönüştürücüler yalnızca bataryanın deşarj edilmesine veya şarj edilmesine imkan tanırken, çift yönlü dönüştürücü yapılar aynı güç elektroniği devresi üzerinden her iki çalışma durumunun da gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, devre karmaşıklığını ve sistem ağırlığını azaltmasının yanı sıra, hibrit enerji sistemlerinde esnek ve verimli bir enerji yönetimi sağlanması açısından tercih edilmektedir [23].

Bu sistemde bataryanın nominal gerilimi 24 V seviyesinde olup, DA bara gerilimi 48 V olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla güç akış yönüne bağlı olarak dönüştürücünün farklı çalışma modlarında görev yapması gerekmektedir. Bataryanın deşarj olduğu ve gücün bataryadan DA baraya aktarıldığı ileri yönde çalışma durumunda, dönüştürücünün 24 V seviyesindeki batarya gerilimini 48 V DA bara gerilimine yükseltmesi gerekmekte olup bu durumda devre yükseltici (boost) modda çalışmaktadır. Tersine, bataryanın şarj edildiği ve gücün DA baradan bataryaya aktarıldığı geri yönde çalışma durumunda ise dönüştürücü alçaltıcı (buck) modda görev yapmakta ve 48 V bara gerilimini batarya için uygun olan 24 V seviyesine düşürmektedir. Bu iki temel çalışma modu, çift yönlü güç akışını destekleyen uygun bir anahtarlama stratejisi ile tek bir dönüştürücü topolojisi üzerinden gerçekleştirilebilmektedir.

Bu amaç doğrultusunda, batarya arayüzü için 4-anahtarlı alçaltıcı-yükseltici (buck–boost) dönüştürücü topolojisi tercih edilmiştir. Bu yapı, klasik alçaltıcı ve yükseltici dönüştürücülerin avantajlarını tek bir devrede birleştirmekte ve çift yönlü güç akışına doğal olarak imkan tanımaktadır. Dört aktif anahtardan oluşan bu topoloji, güç akış yönünün ve çalışma modunun yalnızca anahtarlama sinyalleri üzerinden belirlenebilmesini sağlamakta, ilave mekanik anahtarlar veya diyot bazlı yönlendirme elemanlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır [23]. Böylece hem iletim kayıpları azaltılmakta hem de yüksek verimli bir şarj–deşarj süreci elde edilmektedir. Şekil 3.4’te devre topolojisi gösterilmiştir.



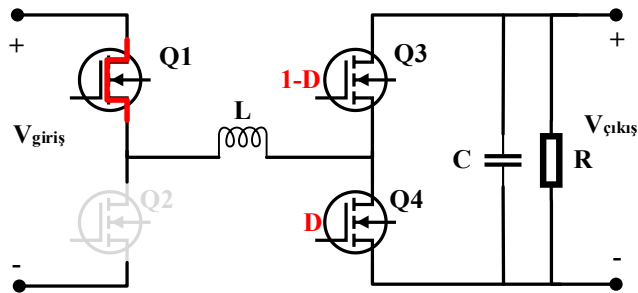
Şekil 3.4 : 4-anahtarlı yükselten-alçaltan devre topolojisi.

3.2.1 Çalışma modları

4-anahtarlı alçaltıcı-yükseltici dönüştürücü, yapısı gereği üç farklı çalışma modunu desteklemektedir: alçaltıcı (buck), yükseltici (boost) ve geçiş koşullarında her iki davranışı bir arada sergileyen alçaltıcı-yükseltici (buck–boost) modu. Batarya geriliminin DA bara geriliminden düşük olduğu bu çalışmada, ileri yönde güç akışı sırasında yükseltici modu, geri yönde güç akışı sırasında ise alçaltıcı modu temel çalışma biçimleri olarak kullanılmaktadır. Sistemde batarya gerilimi (24 V) her zaman DA bara geriliminden (48 V) düşük olduğu için, çalışma rejimi iki temel mod üzerine kurulmuştur.

3.2.1.1 Deşarj yönünde çalışma

Bu modda güç, bataryadan DA baraya aktarılır. Batarya gerilimi (24 V) bara gerilimine (48 V) yükseltilmelidir. Giriş tarafındaki üst anahtar (Q1) sürekli iletimde (ON), alt anahtar (Q2) ise kesimdedir (OFF). Bu sayede giriş gerilimi doğrudan indüktöre uygulanır. Gerilim yükseltme işlemi, çıkış tarafındaki bacakta bulunan Q3 ve Q4 anahtarları ile gerçekleştirilir. Q4 anahtarı PWM ile anahtarlanarak indüktörü şarj ederken, Q3 senkron diyot gibi davranarak enerjiyi baraya aktarır [24]. Yükseltici modu için gerilim ilişkisi denklem 3.1'deki gibi ifade edilir. Bu durumda anahtarların durumları Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Deşarj yönünde çalışma.

3.2.1.2 Şarj yönünde çalışma

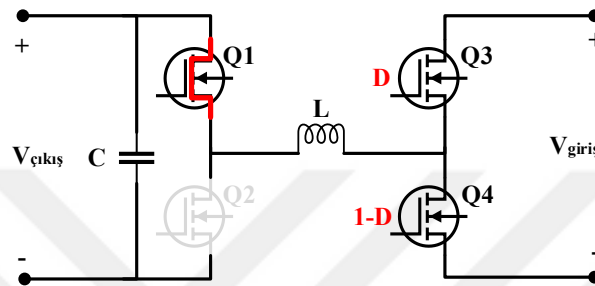
Bu modda güç, DA baradan bataryaya aktarılır. Yüksek olan bara gerilimi (48 V), batarya şarj gerilimi seviyesine (28 V) düşürülmelidir.

Bu durumda sistem ters yönde çalışır; yani DA bara "giriş", batarya ise "çıkış" olarak davranır. Çıkış tarafındaki (baraya bağlı) üst anahtar (Q3) PWM ile anahtarlanarak gerilimi kıyarken, alt anahtar (Q4) ve giriş tarafındaki anahtarlar (Q1, Q2) uygun

senkronizasyonla akım yolunu tamamlar. Genellikle bu modda, batarya tarafındaki üst anahtar (Q1) iletimde, batarya tarafındaki alt anahtar (Q2) açık devre olarak tutularak filtrelenmiş akımın bataryaya akması sağlanır [24]. Alçaltıcı çalışma modunda ise doluluk oranı ve gerilimler ilişkisi için denklem 3.7'deki ifade geçerlidir:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = D = \frac{24}{48} = 0.5 \quad (3.7)$$

Bu durumdaki çalışmada anahtarlamanın durumu Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : Şarj yönünde çalışma.

3.2.2 Tasarım

Çift yönlü DA-DA dönüştürücü tasarımı, pasif bileşenlerin (indüktör ve kapasitörler) boyutlandırılması, devrenin her iki çalışma modunda da (şarj/alçaltıcı ve deşarj/yükseltici) istenen başarımları sağlama açısından kritik öneme sahiptir. Batarya arayüzü için tasarlanan 4-anahtarlı topolojide, aynı indüktör (L) her iki yöndeki güç akışında da enerji depolama elemanı olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle tasarım sürecinde, hem yükseltici (boost) hem de alçaltıcı (buck) modları için gerekli indüktans değerleri ayrı ayrı hesaplanmış ve sistemin sürekli iletim modunda (CCM) kalmasını garanti edecek en büyük değer referans alınmıştır. Tasarım parametreleri, sistemin dinamik tepkisini hızlandırmak ve pasif bileşenlerin boyutlarını minimize etmek amacıyla 100 kHz anahtarlama frekansı (f_{sw}) üzerinden belirlenmiştir. Nominal çalışma koşullarında, batarya ve bara tarafındaki akım ve gerilim dalgalanmalarının %1 seviyesinin altında tutulması hedeflenmiştir.

3.2.2.1 Ortak indüktör seçimi

İndüktör değeri, akım dalgalanmasını (ΔI_L) sınırlayan ana parametredir. Çift yönlü çalışmada indüktör seçimi yapılırken şarj ve deşarj durumları analiz edilmiştir.

Batarya geriliminin (24 V) bara gerilimine (48 V) yükseltildiği bu modda, indüktör üzerindeki akım dalgalanması giriş gerilimine ve doluluk oranına (D) bağlıdır. Denklem 3.4'te ifade edilen ilişki ile gerekli indüktör hesabı yapılabilir.

Bara geriliminin (48 V) batarya seviyesine (24 V) düşürüldüğü bu modda, indüktör çıkış filtresinin bir parçasıdır. Akım dalgalanması giriş (V_{bus}) ve çıkış (V_{bat}) gerilimlerine göre belirlenir. Bu durumdaki hesap, denklem 3.8'de gösterildiği gibidir:

$$L = \frac{D \cdot (V_{bus} - V_{bat})}{\Delta I_L \cdot f_{sw}} \quad (3.8)$$

Her iki mod için yapılan hesaplamalar karşılaştırılmış ve akım dalgalanmasını her koşulda %1-2 bandında tutacak güvenli değeri dikkate alınmıştır. Bu analizler sonucunda, çift yönlü dönüştürücü için ortak indüktör değeri 0.0004 H olarak belirlenmiştir. Bu değere sahip indüktör, hem şarj hem de deşarj sırasında dalgalanmaları azaltarak çalışabilecektir.

3.2.2.2 Kapasitörlerin seçimi

4-anahtarlı topolojide, güç akış yönüne bağlı olarak giriş ve çıkış portları yer değiştirmektedir. Bu nedenle kapasitörler, bulundukları taraftaki (batarya veya bara) gerilim kararlılığını sağlayacak şekilde konumlandırılmıştır.

Bara tarafı kapasitörü (C_{bus}), deşarj modunda dönüştürücünün çıkış kapasitörü olarak görev yapar. Yükseltici topolojinin doğası gereği, yük akımı kesikli olduğu için gerilim dalgalanmasını bastırmak adına daha yüksek bir kapasitans değerine ihtiyaç duyulur. %1 gerilim dalgalanması hedefiyle denklem 3.5 kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu, bara tarafına yerleştirilecek kapasitör değeri 0.0005 F olarak seçilmiştir.

Batarya tarafı kapasitörü (C_{bat}), şarj modunda dönüştürücünün çıkış kapasitörü olarak çalışır. Alçaltıcı modunda indüktör ile seri olduğu için çıkış akımı sürekli ve kapasitör üzerindeki akım stresi daha düşüktür. Ayrıca bataryanın kendisi de büyük bir kapasitans gibi davrandığından, burada gerekli olan filtreleme kapasitansı teorik olarak daha düşüktür. Bu mod için denklem 3.9'daki ilişki kullanılarak hesaplama yapılmıştır:

$$C_{bat} = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_{sw} \cdot \Delta V_{bat}} \quad (3.9)$$

Yüksek frekanslı (100 kHz) anahtarlama gürültülerini filtrelemek amacıyla batarya tarafı için 2 μ F değerinde bir kapasitörün yeterli olduğu hesaplanmıştır.

Tasarımın sonucu olarak devrenin parametreleri Çizelge 3.2’de gösterildiği gibi oluşturulmuştur.

Çizelge 3.2 : Tasarım değerleri.

Parametre	Değer
Giriş gerilimi	24/48 (V)
Çıkış gerilimi	48/24 (V)
Anahtarlama frekansı	100 (kHz)
İndüktör	0.0004 (H)
Batarya kapasitörü	2 (μ F)
Bara kapasitörü	0.0005 (F)
Doluluk oranı	0.5/0.5

3.2.3 Kontrol

Çift yönlü DA-DA dönüştürücünün kararlı çalışması, enerji akış yönüne (şarj veya deşarj) bağlı olarak değişen sistem dinamiklerinin etkin bir şekilde kontrol edilmesine dayanır [23]. Bu çalışmada, batarya ve DA bara arasındaki gerilim regülasyonunu sağlamak amacıyla, çıkış geriliminin geri beslendiği kapalı çevrim kontrol mimarisi tasarlanmıştır. Sistem, çalışma moduna göre iki farklı kontrolcü bloğu arasında geçiş yapmaktadır: Deşarj modu için kararlı hal hatasını sıfırlayan bir PI (Oransal-İntegral) denetleyici; şarj modu için ise geçici hal cevabını iyileştiren bir PID (Oransal-İntegral-Türev) denetleyici tercih edilmiştir.

3.2.3.1 Deşarj modu kontrolü

Bataryanın DA barayı beslediği deşarj modunda, temel kontrol hedefi, yakıt hücresinin yetersiz kaldığı durumlarda DA bara gerilimini 48 V referans değerinde sabit tutmaktır. Bu modda sistemin önceliği, yük değişimlerinde oluşabilecek gerilim çökmelerini engellemek ve kararlı hal hatasını elimine etmektir. Bu gereksinimler doğrultusunda sistemin kararlılığını sağlayan PI denetleyicili yapı yeterli görülmüştür.

Kontrolcü parametrelerinin belirlenmesinde, sistemin benzetim modeli üzerinde manuel ayarlama yöntemi izlenmiştir. Adım yanıtı testleri ile yapılan iterasyonlar

sonucunda, PI denetleyicisi için seçilen parametreler oransal kazanç (K_P) için 0.003 ve integral kazanç (K_I) için 2 olmuştur.

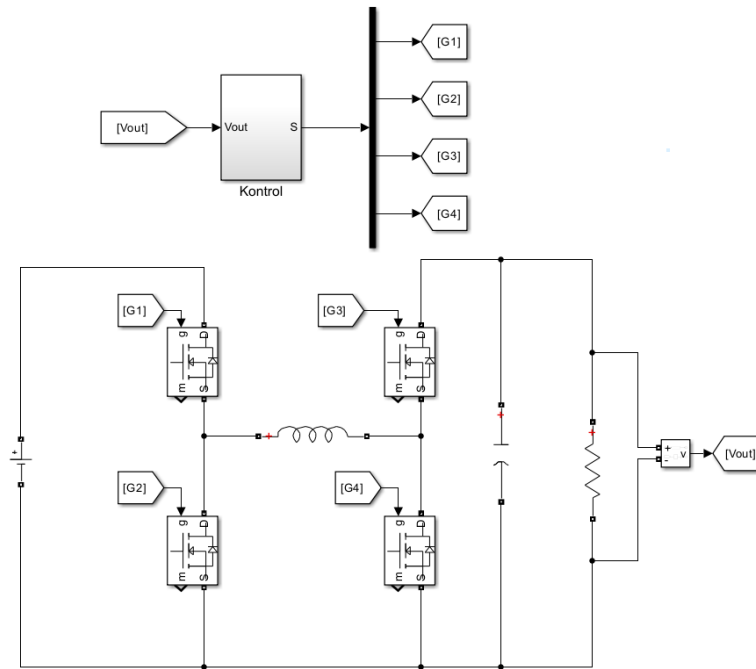
Bu düşük oransal kazanç ve baskın integral kazanç kombinasyonu, sistemin yüksek frekanslı gürültülere aşırı tepki vermesini engellerken, DA bara geriliminin referans değerden sapmamasını sağlamaktadır.

3.2.3.2 Şarj modu kontrolü

DA baradan bataryaya enerji akışının olduğu şarj modunda, kontrol hedefi batarya terminallerindeki şarj gerilimini regüle etmektir [23]. Bataryanın şarj süreci, kimyasal yapısı gereği hassas bir gerilim kontrolü gerektirir ve ani akım darbelerine karşı sistemin sönümlenmesi önemlidir. Bu nedenle sistemin gelecekteki hatasını öngörerek bir PID denetleyici tasarlanmıştır.

Şarj modu kontrolcüsünün parametreleri, bataryanın şarj dinamikleri ve dönüştürücünün alçaltıcı modundaki transfer fonksiyonu dikkate alınarak deneme-yanılma yöntemiyle manuel bir şekilde gerekli hassasiyette ayarlanmıştır. Şarj modu PID denetleyicisi için seçilen parametreler oransal kazanç (K_P) için 0.003, integral kazanç (K_I) için 3 ve türev kazanç (K_D) için 0.000015 olmuştur.

Sonuç olarak 4-anahtarlı yükselten-alçaltan devrenin MATLAB/Simulink modeli Şekil 3.7’de gösterildiği gibi oluşturuldu.



Şekil 3.7 : 4-anahtarlı çift yönlü yükselten-alçaltan devre modeli.



4. ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ

Hibrit enerji sistemleri, birden fazla enerji kaynağının tek bir yükü beslemek üzere birlikte kullanıldığı yapılar olup, özellikle değişken yük profiline sahip uygulamalarda enerji sürekliliği, verimlilik ve sistem güvenilirliğini artırmak amacıyla yaygın olarak tercih edilmektedir. Yakıt hücresi–batarya hibrit sistemleri, bu bağlamda hem yüksek enerji yoğunluğu hem de yüksek güç yoğunluğu gereksinimlerini aynı anda karşılayabilen çözümler sunmaktadır [26]. Ancak bu tür sistemlerin başarımı, yalnızca kullanılan enerji kaynaklarının özelliklerine değil, aynı zamanda bu kaynakların birbirleriyle nasıl bağlandığına ve yönetildiğine de doğrudan bağlıdır [27]. Bu nedenle hibrit enerji sistemleri, mimari yapılarına göre sınıflandırılmakta ve uygulama gereksinimlerine uygun mimarinin seçilmesi kritik bir tasarım adımı olarak değerlendirilmektedir.

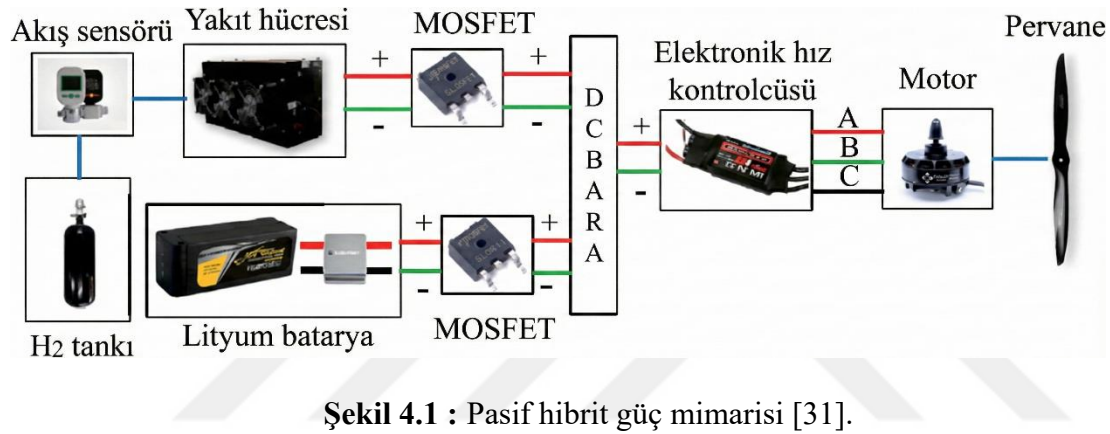
4.1 Hibrit Enerji Sistemi Mimarileri

Literatürde hibrit enerji sistemleri mimarileri genel olarak pasif mimari ve aktif mimari olmak üzere iki ana başlık altında incelenmektedir. Bu iki yaklaşım, enerji kaynakları arasındaki güç paylaşımının nasıl gerçekleştirildiği ve güç elektroniği arayüzlerinin sistemdeki rolü bakımından temel farklılıklar göstermektedir [7, 28].

4.1.1 Pasif hibrit sistemler

Pasif hibrit mimaride, enerji kaynakları genellikle doğrudan aynı DA bara üzerine bağlanmakta ve güç paylaşımı, kaynakların iç dirençleri, gerilim seviyeleri ve doğal elektriksel karakteristikleri tarafından belirlenmektedir. Bu yapıda batarya, süperkapasitör veya yakıt hücresi gibi kaynaklar arasında aktif bir güç paylaşım kontrolü bulunmamakta; sistem, yük değişimlerine doğal dinamik tepkilerle yanıt vermektedir. Pasif mimarinin en belirgin avantajı, ekstra güç elektroniği bileşenleri ve karmaşık kontrol algoritmaları gerektirmediği için tasarımının son derece basit, düşük maliyetli ve hafif olmasıdır. Dönüştürücü kayıpları olmadığı için teorik olarak elektriksel iletim verimi yüksektir [7].

Ancak pasif mimarilerin en önemli dezavantajı, güç paylaşımının hassas ve öngörülebilir bir şekilde kontrol edilememesidir. Özellikle yakıt hücresi gibi yavaş dinamiklere sahip enerji kaynakları, ani yük değişimlerine doğrudan maruz kalabilmekte ve bu durum hem performans kayıplarına hem de kaynak ömrünün kısılmasına neden olabilmektedir. Ayrıca DA bara geriliminin regülasyonu, pasif mimarilerde sınırlı olup, sistem kararlılığı büyük ölçüde yük ve kaynak parametrelerine bağımlı hale gelmektedir. Bu nedenlerle pasif mimariler genellikle düşük güçlü, dinamik gereksinimleri sınırlı ve kontrol hassasiyetinin kritik olmadığı uygulamalarda tercih edilmektedir [29, 30]. Şekil 4.1’de İHA için uygulanabilecek bir pasif hibrit güç sistemi gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Pasif hibrit güç mimarisi [31].

4.1.2 Aktif hibrit sistemler

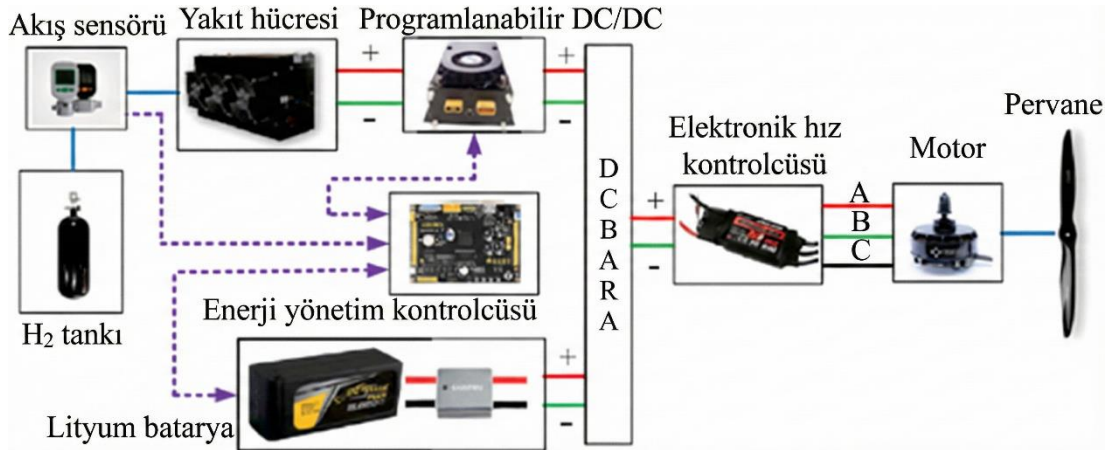
Aktif hibritleşme mimarisi, enerji kaynakları ile yük barası arasında yerleştirilen DA-DA güç dönüştürücüleri vasıtasıyla güç akışının kontrollü bir şekilde yönetildiği gelişmiş bir topolojidir. Bu yapıda, en az bir veya birden fazla kaynak, kendi dönüştürücüsü üzerinden baraya bağlanır. Bu sayede kaynakların gerilim seviyeleri DA bara geriliminden bağımsızlaştırılır ve bir enerji yönetim sistemi (EMS) tarafından aktif güç paylaşımı yapılabilir [29, 30].

Literatürde aktif mimariler, dönüştürücülerin konfigürasyonuna göre yarı-aktif ve tam-aktif olarak sınıflandırılabilir. Bu yapıda, en yüksek kontrol esnekliği sunan yapı; yakıt hücresi için tek yönlü, batarya için ise çift yönlü dönüştürücülerin kullanıldığı tam aktif topolojidir [7, 31].

Bu mimaride, yakıt hücresi bir yükseltici dönüştürücü ile baraya bağlanarak akımı ve gerilimi hassas bir şekilde kontrol edilir. Batarya ise şarj ve deşarj olabilmek için çift yönlü bir dönüştürücü üzerinden sisteme entegre edilir. Merkezi bir kontrolcü, yük

talebini ve kaynakların durumunu izleyerek dönüştürücülere referans sinyalleri gönderir. Bu sinyal sonucunda yük akışı ayarlanır [27, 31].

Aktif hibrit güç aktarma mimarisi, bir enerji yönetim sistemi vasıtasıyla tam kontrol hakimiyeti sağlamaktadır; bu sayede yakıt hücresi gibi ana enerji kaynakları, daima optimal verimlilik noktasında sabit çalıştırılabilir veya dinamik çalışma koşulları sınırlandırılarak bileşen ömrü korunabilir [32]. Sistemin en önemli avantajlarından biri, kaynaklardaki gerilim dalgalanmalarından bağımsız olarak yük tarafına kararlı ve regüle edilmiş bir DA bara gerilimi sunmasıdır. Ayrıca, batarya yönetimi aktif olarak gerçekleştirilerek, aşırı şarj ve deşarj durumları engellenmekte ve bu sayede batarya ömrü önemli ölçüde uzatılmaktadır. Mimari, farklı gerilim seviyelerine sahip kaynakların aynı sistemde entegre edilerek sorunsuz bir şekilde kullanılmasına olanak tanıyan üstün bir sistem esnekliği sunar [27, 31]. Bununla birlikte, söz konusu avantajlar beraberinde bazı dezavantajları getirmektedir: DA-DA dönüştürücü gibi ek güç elektroniği bileşenlerinin kullanımı; sistemin toplam ağırlığını, hacmini ve başlangıç maliyetini artırır. Ayrıca, her bir dönüştürücü devresinde kaçınılmaz olarak ortaya çıkan anahtarlama kayıpları, sistemin genel enerji verimliliğinde bir miktar düşüşe neden olabilmektedir [32]. Şekil 4.2’de İHA için uygulanabilecek bir aktif hibrit güç sistemi gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Aktif hibrit güç mimarisi [31].

Pasif ve aktif mimarilerin İHA uygulamaları açısından karşılaştırmalı analizi, sistem gereksinimlerine göre farklılık gösterir. Pasif mimari basitlik sunarken, aktif mimari performans ve koruma sunar. Çizelge 4.1’deki karşılaştırma, bu iki yaklaşımın temel farklarını özetlemektedir. Çalışma için istenilen koşullarda tasarım yapılabilmesi için bu farklar dikkate alınmıştır.

Çizelge 4.1 : Hibrit güç mimarilerinin karşılaştırması.

Özellik	Pasif Mimari	Aktif Mimari
Devre Yapısı	Basit	Karmaşık
Kontrol Yeteneği	Yok / Sınırlı	Tam
Bara Regülasyonu	Değişken	Sabit ve Kararlı
Yakıt Hücresi Koruması	Zayıf	Yüksek
Verimlilik	Yüksek	Orta
Maliyet ve Ağırlık	Düşük	Yüksek

Bu tez çalışmasının temel amacı, zorlu uçuş profillerinde dahi DA bara gerilimini 48 V seviyesinde kararlı tutmaktır. Pasif mimarinin kontrolsüz doğası, yakıt hücresini ani yük değişimlerinde reaktan açlığı durumuna maruz bırakma riski taşıdığından ve hassas bara regülasyonunu sağlayamadığından uygun görülmemiştir. Bu nedenle, yakıt hücresi ve batarya arasındaki güç akışını bir enerji yönetim sistemi algoritması ile optimize edebilmek için, her iki kaynağın da dönüştürücülerle kontrol edildiği tam aktif hibrit güç mimarisi tercih edilmiştir. Bu seçim, sistemin karmaşıklığını artırsa da yakıt hücresinin ömrünü uzatmak ve görev güvenilirliğini sağlamak adına yapılmış bir mühendislik tercihidir.

4.2 Enerji Yönetim Sistemi

Tasarımdaki insansız hava aracı, görev profili boyunca yüksek derecede değişken güç taleplerine sahip bir sistemdir. Kalkış, dikey tırmanış, ani manevralar ve yük değişimleri sırasında talep edilen güç seviyesi kısa sürelerde önemli ölçüde artarken; seyir uçuşu gibi fazlarda daha düşük ve görece sabit güç gereksinimleri ortaya çıkmaktadır [33]. Bu durum, tek bir enerji kaynağına dayalı sistemlerin performans ve süreklilik açısından yetersiz kalmasına neden olmakta, yakıt hücresi–batarya gibi hibrit enerji sistemlerinin kullanımını gerekli kılmaktadır. Ancak hibrit yapıların sunduğu potansiyel avantajların etkin biçimde kullanılabilmesi, enerji kaynakları arasındaki güç paylaşımının uygun bir enerji yönetim sistemi ile düzenlenmesine doğrudan bağlıdır.

İHA’lar için geliştirilen EMS yaklaşımlarının temel hedefleri; DA bara geriliminin kararlı tutulması, ani güç taleplerinin güvenli şekilde karşılanması, yakıt hücresinin yavaş dinamiklerinin korunması, batarya şarj durumunun (SoC) güvenli sınırlar

içerisinde tutulması, sistem genel verimliliğinin maksimize edilmesi ve enerji maliyetinin optimize edilmesidir. Bu hedeflere ulaşmak amacıyla literatürde çok sayıda EMS yaklaşımı önerilmiş olup, bu yöntemler farklı karmaşıklık seviyeleri, hesaplama yükleri ve uygulama gereksinimleri sunmaktadır [29-32].

Kural tabanlı enerji yönetimi, hibrit enerji sistemlerinde en yaygın kullanılan ve en olgun yöntemlerden biridir [7, 30]. Bu yaklaşımda güç paylaşımı, önceden tanımlanmış mantıksal kurallar aracılığıyla gerçekleştirilir. Kurallar genellikle yük gücü, DA bara gerilimi, batarya SoC seviyesi ve yakıt hücresinin izin verilen çalışma sınırları gibi ölçülebilir büyüklüklere dayandırılmaktadır. “Eğer-ise” (if-then) mantığına dayanan bu yapı, sistemin farklı çalışma koşullarına hızlı ve öngörülebilir tepkiler vermesini sağlar. Kural tabanlı EMS’nin en önemli avantajlarından biri, hesaplama gereksiniminin son derece düşük olmasıdır. Bu özellik, işlemci kapasitesi ve enerji bütçesi sınırlı olan İHA platformları için büyük bir avantaj sunmaktadır. Ayrıca kontrol yapısının şeffaf ve yorumlanabilir olması, sistem davranışının kolayca analiz edilebilmesini ve güvenlik açısından doğrulanmasını mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, kural tabanlı yöntemler genellikle küresel optimum çözümler sunmamakta; başarımları büyük ölçüde kural setinin doğruluğuna ve mühendislik sezgisine bağlı kalmaktadır [7, 30]. Ancak İHA uygulamalarında güvenilirlik ve gerçek zamanlı uygulanabilirlik, çoğu zaman teorik optimum olma durumundan daha öncelikli kriterler olarak değerlendirilmektedir.

Frekans tabanlı EMS, yük gücünü frekans bileşenlerine ayırarak enerji kaynaklarının dinamik özelliklerine uygun biçimde güç paylaşımı yapmayı amaçlayan bir yaklaşımdır. Bu yöntemde, yük gücünün düşük frekanslı bileşenleri yakıt hücresi tarafından karşılanırken, yüksek frekanslı ve ani değişen bileşenler batarya gibi hızlı tepki verebilen enerji kaynakları tarafından sağlanmaktadır [29, 30]. Bu yaklaşım, yakıt hücresinin ani akım değişimlerine maruz kalmasını doğal bir şekilde engellemesi açısından önemli bir avantaj sunmaktadır [29, 30, 33]. Ancak frekans tabanlı yöntemler, filtre tasarımına ve sistem parametrelerine yüksek derecede bağımlıdır. İHA’ların görev profilleri büyük ölçüde değişken olduğundan, sabit kesim frekansları her uçuş koşulu için ideal sonuçlar vermeyebilir. Ayrıca bu yaklaşım, batarya şarj durumu (SoC) gibi kritik değişkenleri doğrudan kontrol etmemekte, bu da uzun süreli görevlerde batarya yönetimi açısından dezavantaj yaratmaktadır.

Eşdeğer tüketim minimizasyon stratejisi (ECMS), hibrit enerji sistemlerinde anlık yakıt tüketimini minimize etmeyi hedefleyen optimizasyon temelli bir EMS yaklaşımıdır. Bu yöntemde bataryadan çekilen veya bataryaya aktarılan enerji, eşdeğer bir yakıt tüketimi olarak modellenmekte ve her zaman adımında toplam eşdeğer tüketimi minimize eden güç paylaşımı belirlenmektedir. ECMS, kural tabanlı yöntemlere kıyasla daha yüksek verimlilik sunabilmekte ve yarı-optimal çözümler üretebilmektedir. Ancak yöntemin başarısı, eşdeğerlik faktörlerinin doğru seçilmesine doğrudan bağlıdır. İHA'lar gibi görev profili sık değişen sistemlerde bu faktörlerin sabit tutulması zor olmakta; adaptif ECMS yaklaşımları ise kontrol yapısını daha karmaşık hale getirmektedir. Ayrıca gerçek zamanlı uygulamada hesaplama yükü, kural tabanlı yöntemlere göre belirgin şekilde daha fazladır [29, 30, 32].

Model öngörülü kontrol (MPC), sistemin matematiksel modelini kullanarak belirli bir öngörü ufku boyunca gelecekteki davranışını tahmin eden ve bu tahminlere dayalı bir optimizasyon problemi çözen ileri seviye bir kontrol yaklaşımıdır. MPC, çok değişkenli sistemlerde kısıtların doğrudan kontrol problemine dahil edilebilmesi açısından son derece güçlü bir yöntemdir. Hibrit İHA enerji sistemlerinde MPC, teorik olarak en yüksek başarıyı sunabilecek EMS yaklaşımlarından biridir [29]. Ancak doğru ve güncel bir sistem modeli gereksinimi, yüksek hesaplama maliyeti ve gerçek zamanlı optimizasyon zorunluluğu, MPC'nin pratik İHA uygulamalarında sınırlı kullanımına yol açmaktadır. Özellikle uçuş kontrolü ve navigasyon gibi diğer kritik yazılımlarla aynı işlemci üzerinde çalışması gereken EMS için MPC, çoğu zaman uygulanabilir bir çözüm olmaktan çıkmaktadır [29, 32].

Dinamik programlama, tüm görev profili boyunca küresel optimum çözüm sağlayabilen bir yöntemdir ve genellikle EMS yaklaşımlarının başarımlarını değerlendirmesinde referans olarak kullanılmaktadır. DP, sistemin tüm gelecekteki yük profilini bildiği varsayımı altında, enerji kaynaklarının en verimli kullanımını teorik olarak belirleyebilmektedir. Ancak, DP'nin hesaplama maliyeti son derece yüksektir ve gelecekteki yük profilinin önceden bilinmesini gerektirir. Bu nedenle DP, gerçek zamanlı EMS uygulamaları için uygun olmayıp, daha çok çevrim dışı analizler ve diğer yöntemlerin başarımlarını karşılaştırmaları amacıyla kullanılmaktadır [32].

4.2.1 Tasarım

Bu çalışmada ele alınan yakıt hücresi–batarya hibrit İHA enerji sistemi; yüksek dinamik yük değişimleri, ani güç talepleri, sınırlı hesaplama kaynakları ve uçuş güvenliği açısından kritik olan gerilim kararlılığı gereksinimleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. İHA uygulamalarında enerji yönetim sistemi yalnızca ortalama güç paylaşımını değil, aynı zamanda kalkış, ani manevra ve yük değişimleri sırasında oluşan geçici durumları da güvenli biçimde yönetmek zorundadır. Bu nedenle, EMS seçiminde teorik optimum durumu kadar gerçek zamanlı uygulanabilirlik ve sistem dinamikleriyle uyumluluk da belirleyici kriterler olarak ele alınmıştır.

Model öngörülü kontrol (MPC) ve dinamik programlama (DP) gibi optimizasyon tabanlı yaklaşımlar, hibrit enerji sistemleri için yüksek teorik başarımlarına rağmen, yüksek hesaplama maliyetleri ve ayrıntılı sistem modeli gereksinimleri nedeniyle bu çalışma kapsamında uygun bulunmamıştır. Özellikle İHA platformlarında gerçek zamanlı çalışması gereken uçuş kontrol, seyrüsefer ve haberleşme sistemleri ile birlikte düşünüldüğünde, EMS'nin düşük hesaplama yüküne sahip olması önemli bir tasarım kısıtı haline gelmektedir. ECMS ve saf frekans tabanlı yaklaşımlar ise parametre ayarlarına yüksek duyarlılıkları ve görev profiline bağlı adaptasyon gereksinimleri nedeniyle pratik uygulamada sınırlı avantaj sunmaktadır.

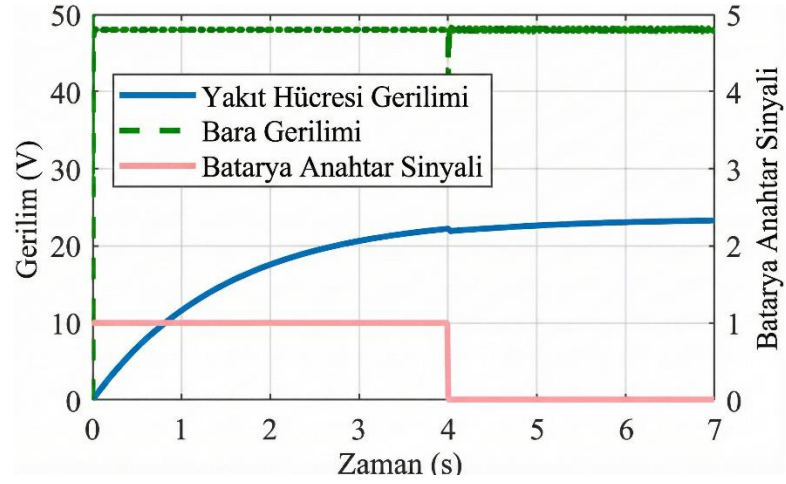
Bu gerekçeler doğrultusunda, çalışmada temel enerji yönetim yaklaşımı olarak kural tabanlı bir EMS tercih edilmiştir. Kural tabanlı yapı, yakıt hücresinin yavaş dinamikleri ve akım değişimlerine karşı hassasiyeti göz önünde bulundurularak, yakıt hücresinin mümkün olduğunca kararlı ve düşük frekanslı güç bileşenlerini karşılamasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Buna karşılık batarya, ani yük değişimleri ve kısa süreli yüksek güç taleplerini karşılamak üzere sistemde aktif rol almaktadır. Bu yapı sayesinde yakıt hücresinin ömrü korunmakta, DA bara gerilimi daha kararlı hale getirilmekte ve sistemin genel güvenilirliği artırılmaktadır.

Ancak yapılan sistem analizleri ve benzetim çalışmaları, yalnızca kural tabanlı bir yaklaşımın özellikle yük ani değişimleri ve sistem başlangıç anı gibi özel çalışma koşullarında yetersiz kalabileceğini göstermiştir. Yakıt hücreleri, çalışma prensipleri gereği başlangıç anında çıkış gerilimi ve gücünü hemen nominal seviyeye ulaştıramamakta, bu süreçte bara geriliminde düşümler meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, sistemin başlatılması sırasında yakıt hücresinin devreye alınması

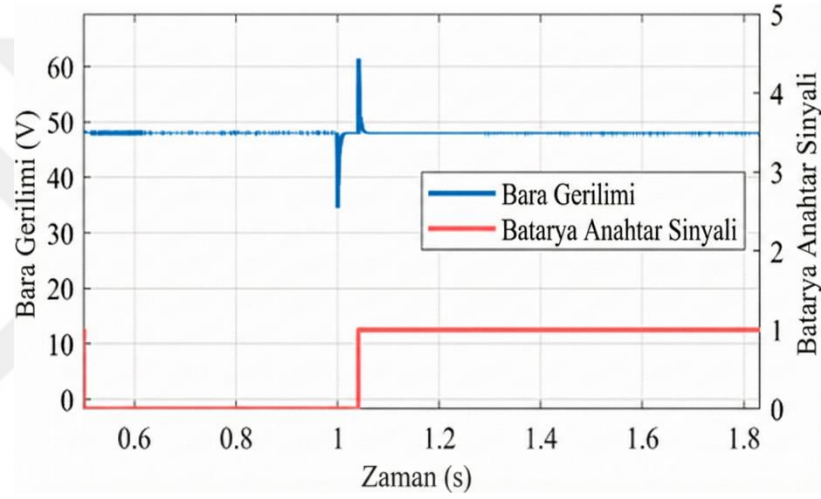
geciktirilmiş ve başlangıç anında yalnızca bataryanın DA barayı beslemesi esas alınmıştır. Yakıt hücresi, çıkış karakteristiği kararlı hale geldikten sonra kontrollü bir şekilde sisteme dahil edilmektedir.

Buna ek olarak, ani yük artışları sırasında DA bara geriliminde oluşabilecek geçici gerilim düşümlerini bastırmak amacıyla, kural tabanlı EMS'ye bir geçici durum algılama ve uygun anahtarlama mekanizması entegre edilmiştir. Bu hibrit yapı sayesinde, yük gücünün yüksek frekanslı bileşenleri ve hızlı anlık etkilerin yakıt hücresinin çıkış gerilimine etkileri saptanıp yeni duruma kadar talep edilen güç batarya tarafından karşılanmakta; düşük frekanslı ve kararlı güç talepleri ise kural tabanlı karar mekanizması çerçevesinde yakıt hücresine yönlendirilmektedir. Böylece frekans tabanlı yaklaşım, sürekli bir EMS yöntemi olarak değil, kural tabanlı yapıyı destekleyen yardımcı bir mekanizma olarak kullanılmıştır.

Bu kontrol mimarisi, hem yakıt hücresinin dinamik sınırlamalarını koruma altına almakta hem de DA bara geriliminin geçici durumlarda hızlı şekilde toparlanmasını sağlamaktadır. Ayrıca sistem davranışının büyük ölçüde deterministik ve öngörülebilir olması, uçuş güvenliği açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Geliştirilen anahtarlama mekanizması sayesinde EMS, farklı çalışma koşullarına uyum sağlayabilmektedir. Gerilim toleransı değeri ve tepki süresi istenilen davranışa göre belirlenebilmektedir. Şekil 4.3'te sadece bu mekanizma kullanılarak elde edilen başlangıç karakteristiği gösterilmiştir. Burada yakıt hücresi nominal çalışma gerilimine ulaşırken yaşanan gecikmenin batarya tarafından telafisi görülebilir. Ayrıca, gerilim seviyesinin kararlı duruma geçtiği durumda yakıt hücresinin devreye alındığı görülebilir. Şekil 4.4'te yine sadece bu mekanizmanın kullanımının ani yük değişimi sırasında etkisi gösterilmiştir. Burada görüldüğü üzere ani yüklenmenin sonucunda oluşan gerilim düşümü belirlenen tepki süresinde bataryanın devreye alınmasıyla telafi edilmektedir.



Şekil 4.3 : Yakıt hücresi ve bataryanın başlangıç davranışı.



Şekil 4.4 : Yakıt hücresi ve bataryanın ani yüklenme davranışı.

4.2.1.1 Kontrol kuralları

Bu çalışmada geliştirilen enerji yönetim sistemi, yakıt hücresi ve lityum bataryadan oluşan hibrit İHA güç mimarisinin fiziksel, ekonomik ve yaşlanma temelli kısıtları dikkate alınarak kural tabanlı bir yapı ile tasarlanmıştır. Kural tabanlı yaklaşımın temel amacı; yakıt hücresini verimli ve güvenli çalışma bölgesinde tutmak, hidrojen tüketimini minimize etmek, sistem bileşenlerinin ömürlerini uzatmak ve DA bara üzerindeki yük taleplerinin kesintisiz şekilde karşılanmasını sağlamaktır.

Yakıt hücreleri, özellikle hızlı güç değişimlerine karşı hassas olmaları, belirli bir güç aralığında daha yüksek verimle çalışmaları ve dinamik akım dalgalanmalarının yaşlanmayı hızlandırması nedeniyle, İHA uygulamalarında doğrudan yük takip eden bir kaynak olarak kullanılmaya uygun değildir. Bu çalışmada kullanılan yakıt hücresinin verim ve ömür karakteristikleri dikkate alındığında, 500–2000 W aralığında

ve mümkün olduğunca sabit güç seviyelerinde çalıştırılması tercih edilmiştir. Bu aralığın altında çalışmak sistem verimini düşürmekte, üstünde çalışmak ise yakıt hücresi üzerinde termal ve elektrokimyasal stres oluşturmaktadır.

Buna ek olarak, hidrojenin depolanması, taşınması ve yakıt hücresinde elektrik enerjisine dönüştürülmesi, bataryadan sağlanan enerjiye kıyasla daha yüksek bir maliyet ve karmaşıklık içermektedir. Bu nedenle enerji yönetim stratejisinde, hidrojen enerjisinin yalnızca gerekli olduğu durumlarda kullanılması, mümkün olan senaryolarda yükün batarya tarafından karşılanması hedeflenmiştir. Ancak bataryanın da sınırsız bir kaynak olmadığı; yüksek deşarj oranlarının batarya ömrünü kısalttığı, düşük şarj durumlarında (SoC) derin deşarj riskinin olduğu ve şarj/deşarj sınırlarının korunması gerektiği göz önünde bulundurulmuştur.

Bu çerçevede, kural tabanlı EMS tasarımı yapılırken iki temel değişken olarak, talep edilen güç seviyesi ve bataryanın şarj durumu (SoC) esas alınmıştır.

Talep edilen güç, sistem dinamikleri açısından düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç seviyede sınıflandırılmıştır. Benzer şekilde batarya SoC seviyesi de batarya güvenliği ve kullanılabilirliği dikkate alınarak düşük, orta ve yüksek olarak tanımlanmıştır. Bu iki değişkenin birlikte değerlendirilmesiyle sistemin karşılaşılabileceği tüm temel çalışma senaryoları kapsamıştır.

Batarya SoC seviyesinin düşük olduğu durumlar, bataryanın korunması gereken en kritik senaryolardır. Bu koşullarda, bataryanın daha fazla deşarj edilmesi sistem güvenilirliği açısından risk oluşturacağından, yakıt hücresinin mümkün olan en yüksek katkıyı sağlaması tercih edilmiştir. Talep düşük olsa dahi, yakıt hücresinin nominal güçte çalıştırılması bataryanın toparlanmasına olanak tanımaktadır. Talep orta veya yüksek seviyeye çıktığında ise yakıt hücresi maksimum güç seviyesine alınarak batarya üzerindeki yük azaltılmaktadır.

Batarya SoC seviyesinin orta olduğu durumlar, sistemin en dengeli çalışma koşullarını temsil etmektedir. Bu senaryolarda, talep düşük ise hidrojen kullanım maliyetini azaltmak amacıyla yakıt hücresi minimum güç seviyesinde tutulmakta, yükün büyük kısmı batarya tarafından karşılanmaktadır. Talep orta seviyeye çıktığında, yakıt hücresinin nominal güçte çalıştırılması hem verimlilik hem de batarya koruması açısından uygun bir denge sağlamaktadır. Yüksek talep durumlarında ise yakıt hücresi

maksimum güç seviyesine çıkarılmaktadır. Bu sayede batarya üzerindeki ani yük artışları sınırlandırılmaktadır.

Batarya SoC seviyesinin yüksek olduğu senaryolarda ise batarya enerjisinin kullanımı önceliklendirilmiştir. Bu durum, hidrojenin daha maliyetli bir enerji kaynağı olması ve bataryanın bu aşamada deşarj edilmesinin sistem açısından daha avantajlı olması ile açıklanmaktadır. Talep düşük veya orta seviyede iken yakıt hücresi minimum güçte çalıştırılmakta, yüksek talep durumunda ise yakıt hücresi nominal güç seviyesine alınarak bataryanın aşırı zorlanması önlenmektedir.

Bu mantıksal değerlendirmeler sonucunda, talep edilen güç ve batarya SoC seviyelerine bağlı olarak yakıt hücresi çıkış gücünü belirleyen kural seti oluşturulmuştur. Elde edilen kurallar Çizelge 4.2'deki şekilde özetlenmektedir.

Çizelge 4.2 : Kontrol kuralları.

Kural No	Girdi 1: Talep	Girdi 2: SoC	Yakıt Hücresi Çıkışı
1	Düşük	Düşük	Nominal
2	Orta	Düşük	Maksimum
3	Yüksek	Düşük	Maksimum
4	Düşük	Orta	Minimum
5	Orta	Orta	Nominal
6	Yüksek	Orta	Maksimum
7	Düşük	Yüksek	Minimum
8	Orta	Yüksek	Minimum
9	Yüksek	Yüksek	Nominal

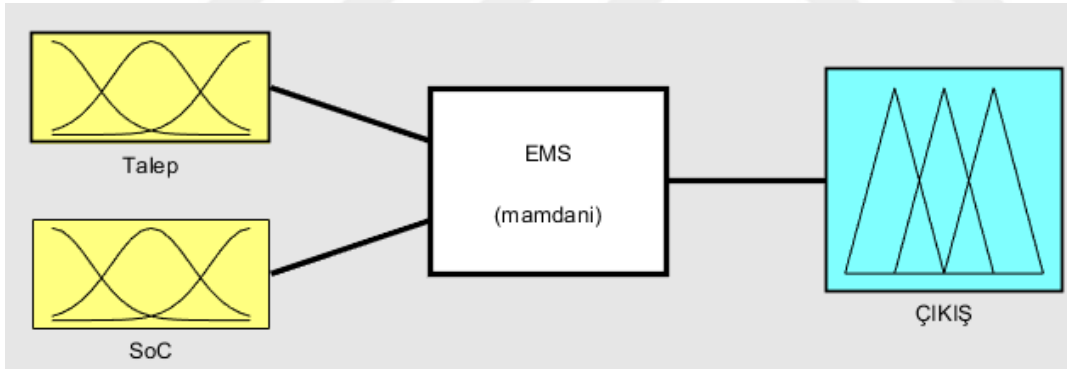
Bu kural tablosu sayesinde yakıt hücresi, verimli çalışma bölgesinde ve ani güç değişimlerinden izole edilmiş şekilde çalıştırılmakta; batarya ise sistem dinamiklerini dengeleyen ve kısa süreli güç taleplerini karşılayan bir tampon enerji kaynağı olarak konumlandırılmaktadır. Talep edilen toplam güçten yakıt hücresi tarafından sağlanan güç çıkarıldığında kalan güç otomatik olarak batarya tarafından karşılanmakta ve sistem genelinde dengeli, güvenli ve ekonomik bir enerji paylaşımı elde edilmektedir.

Geliştirilen kural tabanlı EMS, hibrit İHA uygulamaları için gerekli olan basitlik, güvenilirlik ve fiziksel sistem farkındalığını bir araya getirmekte; aynı zamanda ileride adaptif veya optimizasyon tabanlı yöntemlerle geliştirilebilecek sağlam bir temel sunmaktadır.

4.2.1.2 Kontrolcü tasarımı

Önceki bölümde oluşturulan kural tablosu, enerji yönetim sisteminin temel karar mekanizmasını belirlemektedir. Ancak, klasik "keskin mantık" veya basit "eğer-ise" yapılarında, sistem bir durumdan diğerine geçerken çıkış gücünde ani ve sert değişimler meydana gelir. Bu durum, yakıt hücresi üzerinde istenmeyen güç dalgalanmalarına ve kararsızlıklara yol açabilir. İHA'nın uçuşu sırasında güç talebi ve batarya durumu sürekli ve doğrusal olmayan bir şekilde değiştiği için, insan muhakemesini ve belirsizlikleri modelleyebilen bulanık mantık kontrol yaklaşımı tercih edilmiştir.

Bulanık mantık, kesin sınırlar yerine üyelik dereceleri kullanarak geçişlerin yumuşak ve sürekli olmasını sağlar [34]. Bu çalışmada, girdilerin dilsel değişkenlere dönüştürülmesi ve sonucun elde edilmesi sürecinde, hesaplama verimliliği ve kontrol başarısı nedeniyle Mamdani tipi çıkarım mekanizması kullanılmıştır. Tasarlanan kontrolcü; durulama yöntemi olarak ağırlık merkezi yöntemini kullanmakta, "ve" bağlacı için minimum, "veya" bağlacı için maksimum operatörlerini esas almaktadır. Şekil 4.5'te bulanık mantık kontrolcüsünün iki girişli yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : Bulanık mantık diyagramı.

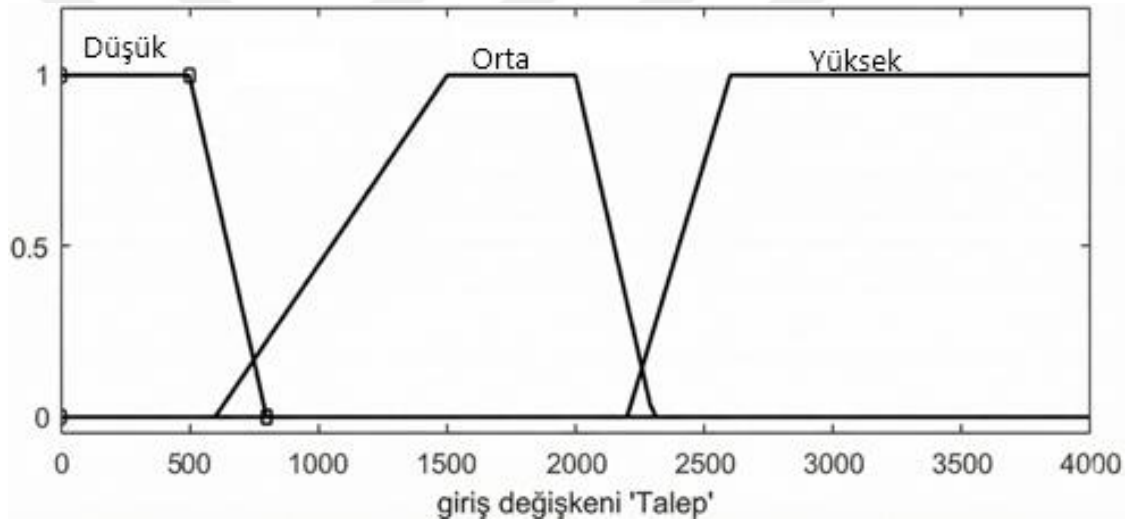
Kontrolcünün tasarımı, İHA'nın güç sistemi kapasiteleri ve bir önceki bölümde belirlenen verimlilik ve maliyet gibi kısıtları doğrultusunda yapılandırılmıştır. Sistem iki giriş ve bir çıkış değişkenine sahiptir.

Giriş 1 : Talep edilen güç

İHA'nın o anki toplam güç ihtiyacını temsil eder. Toplam sistem gücüne uygun olarak 0-4000 Watt aralığında tanımlanmıştır. Üyelik fonksiyonları (MF), güç profillerindeki geçişleri kapsayacak şekilde üç seviyeye ayrılmıştır:

- Düşük (MF1): Trapez (yamuk) tipinde, [0 0 500 800] aralığında tanımlanmıştır. 0-500 W arası kesinlikle düşük kabul edilirken, 800 W'a kadar azalarak devam eder. Bu bölge süzülme ve iniş aşamalarını temsil eder.
- Orta (MF2): Trapez tipinde, [600 1500 2000 2300] aralığında tanımlanmıştır. İHA'nın seyir uçuşunda en sık bulunacağı güç bandıdır. 1500-2000 W arası kararlı bölge olarak belirlenmiştir.
- Yüksek (MF3): Trapez tipinde, [2200 2600 4000 4000] aralığında tanımlanmıştır. 2600 W üzeri tam yük, tırmanma ve ani manevra durumlarını kapsar.

Şekil 4.6'da ilk giriş değişkeni olan talep edilen güç değeri için üyelik fonksiyonlarının sınırları ve durumları grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : Talep girişi için üyelik fonksiyonları.

Trapezoidal fonksiyonların tercih edilme nedeni, belirli bir güç aralığında (örneğin 1500-2000 W arası) üyelik derecesini 1'de sabit tutarak kontrolcünün kararlı bir çıkış üretmesini sağlamaktır.

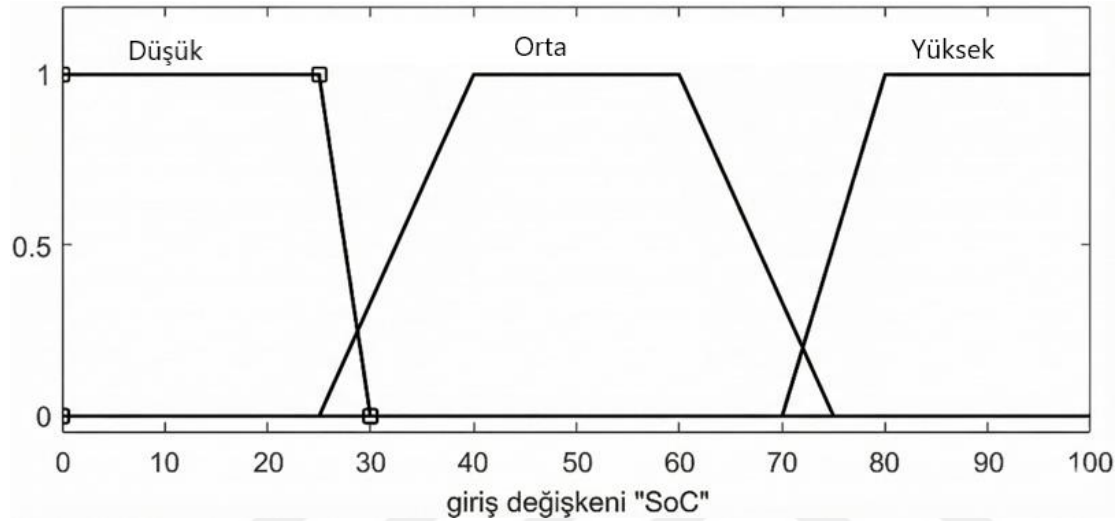
Giriş 2 : Batarya şarj durumu (SoC)

Bataryanın enerji seviyesini temsil eder ve [0 100] % aralığındadır. Bataryayı korumak ve güvenli operasyon sağlamak amacıyla sınırlar hassas belirlenmiştir:

- Düşük (MF1): Trapez tipinde, [0 0 25 30] aralığındadır. %25'in altı kritik bölge olarak tanımlanmış, %30'a kadar geçiş payı bırakılmıştır. Bu bölgede sistem bataryayı korumaya odaklanır.

- Orta (MF2): Trapez tipinde, [25 40 60 75] aralığındadır. %40 ile %60 arası bataryanın en sağlıklı çalıştığı nominal bölgedir.
- Yüksek (MF3): Trapez tipinde, [70 80 100 100] aralığındadır. %80 ve üzeri tam doluluk durumunu ifade eder ve bu bölgede batarya kullanımı teşvik edilir.

Şekil 4.7’de ikinci giriş değişkeni olan batarya şarj durumu için üyelik fonksiyonlarının sınırları ve durumları grafikte gösterilmiştir.



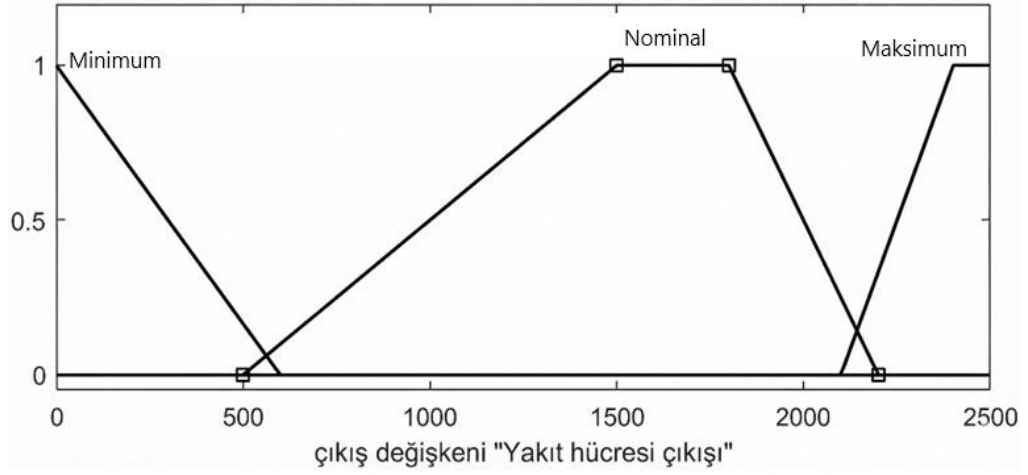
Şekil 4.7 : Batarya şarj durumu için üyelik fonksiyonları.

Çıkış: Yakıt hücresi referans gücü

Kontrolcünün belirleyeceği yakıt hücresi gücünü temsil eder. Yakıt hücresinin fiziksel sınırları olan 0-2500 Watt aralığında tanımlanmıştır. Önceki bölümde belirlenen stratejiye uygun olarak üç seviye oluşturulmuştur. Bu seviyeler arasında yakıt hücresi çıkışı istenilen durumlara göre verilmiştir.

- Minimum Çalışma: Üçgen (Trimf) tipinde, [0 0 600] aralığındadır. Yakıt hücresinin rölanti veya minimum güçte çalıştığı durumdur. Özellikle bataryanın dolu olduğu durumlarda yakıt tasarrufu için bu seviye hedeflenir.
- Nominal Çalışma: Trapez tipinde, [500 1500 1800 2200] aralığındadır. Bu aralık, bir önceki bölümde hedeflenen "en verimli bölge" ile tam örtüşmektedir. Yakıt hücresinin en uzun ömürlü ve en yüksek verimle çalıştığı 1500-1800 W bandını merkezine alır.
- Maksimum Çalışma: Trapez tipinde, [2100 2400 2500 4000] aralığındadır. Sistemin verebileceği maksimum gücü temsil eder. 2400 W üzerinde tam kapasite çalışmayı ifade eder.

Şekil 4.8’de çıkış değişkeni olan yakıt hücresinin çıkış gücü referansı için üyelik fonksiyonlarının sınırları ve durumları grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : Yakıt hücresi çıkış referansı için üyelik fonksiyonları.

Üyelik fonksiyonlarının hibrit kullanımı sayesinde, keskin geçişler yerine bu stratejiler arasında yumuşak geçişler sağlanarak, ani güç dalgalanmalarını sönmleyen bir yapı sunulmaktadır.

Ancak, insan uzmanlığına ve mühendislik sezgilerine dayalı olarak oluşturulan bu kural tabanı, her ne kadar güvenli ve mantıklı bir işletim sağlasa da sistemin global optimumda çalıştığını garanti etmemektedir. Seçilen üyelik fonksiyonu aralıkları ve kural ağırlıkları statik olduğundan, değişen atmosferik koşullara veya görev profillerine dinamik olarak uyum sağlayamamaktadır. Statik olarak tanımlanan bu parametrelerin, dinamik ve doğrusal olmayan İHA yük profilleri altında optimum başarımı yakalayabilmesi için matematiksel bir optimizasyon sürecine tabi tutulması gerekmektedir.

4.2.2 Optimizasyon

Hibrit enerji sistemleri için enerji yönetimi problemi; çok sayıda değişken içeren, doğrusal olmayan, zamana bağlı ve çoğu durumda analitik olarak ifade edilmesi güç bir yapıya sahiptir. Yakıt hücresi–batarya gibi çok kaynaklı sistemlerde, enerji paylaşımına ilişkin kararlar yalnızca anlık güç talebine değil; sistem bileşenlerinin verim haritalarına, yaşlanma etkilerine, güvenli çalışma sınırlarına ve görev sonunda hedeflenen enerji durumlarına da bağlıdır. Bu nedenle enerji yönetimi optimizasyonu, klasik tek amaçlı ve doğrusal yöntemlerle çözülemeyecek kadar karmaşık bir problem

ortaya koymaktadır. Literatürde bu tür problemlerin çözümü için çeşitli sezgisel ve deterministik optimizasyon yöntemleri önerilmiştir [34].

Bulanık mantık denetleyicisi, insan uzmanlığını ve dilsel belirsizlikleri modellemede başarılı olsa da üyelik fonksiyonlarının sınır değerleri ve şekilleri genellikle deneme-yanılma yöntemiyle veya mühendislik sezgileriyle belirlenir. Ancak hibrit yakıt hücresi–batarya sistemlerinde; enerji verimliliği, hidrojen tüketimi ve batarya şarj durumu (SoC) hedeflerinin aynı anda optimize edilmesi çok kriterli bir problem oluşturmaktadır. Bu nedenle, kontrol başarımının daha da iyileştirilmesi amacıyla EMS parametrelerinin optimizasyon algoritmaları kullanılarak ayarlanması hedeflenmiştir.

Enerji yönetim problemleri; doğrusal olmayan, süreksiz, çok değişkenli yapıları nedeniyle klasik gradyan tabanlı yöntemler için uygun değildir. Bu bağlamda, sezgisel ve evrimsel optimizasyon algoritmaları, EMS optimizasyonu için literatürde yaygın olarak tercih edilmektedir. Enerji yönetim sistemlerinin optimizasyonu için parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve genetik algoritma (GA) gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [35].

Parçacık sürü optimizasyonu, doğadaki sürü davranışlarından esinlenerek geliştirilen, popülasyon tabanlı sezgisel bir optimizasyon yöntemidir. PSO algoritmasında her bir parçacık, çözüm uzayında bir aday çözümü temsil etmekte ve parçacıklar hem kendi en iyi konumları hem de sürünün genel en iyi çözümü doğrultusunda hareket etmektedir [35]. Bu yaklaşımın en önemli avantajı, algoritmanın yapısal olarak basit olması ve nispeten hızlı yakınsama sağlamasıdır. Bununla birlikte, PSO algoritmasının hibrit enerji yönetim sistemlerine uygulanmasında bazı sınırlamalar bulunmaktadır. Özellikle amaç fonksiyonunun çok modlu yapıya sahip olduğu ve çözüm uzayının geniş olduğu durumlarda, parçacıkların erken yakınsama eğilimi göstererek yerel minimumlarda sıkışabilmektedir. Ayrıca algoritmanın başarımı, hız ve ağırlık katsayılarının seçimine oldukça duyarlıdır [35]. Bu durum, bulanık mantık üyelik fonksiyonları gibi kesikli ve eşik tabanlı parametrelerin optimizasyonunda kararsız ve tekrarlanabilirliği düşük sonuçlara yol açabilmektedir. Bu nedenle PSO, bu çalışmada ele alınan EMS optimizasyon problemi için sınırlı bir uygunluğa sahiptir.

Simüle edilmiş tavlama algoritması (SA), metalurjik tavlama sürecinden esinlenerek geliştirilmiş, istatistik temelli bir optimizasyon yöntemidir. Algoritma, yüksek sıcaklık

seviyelerinde kötü çözümleri belirli bir olasılıkla kabul ederek yerel minimumlardan kaçmayı hedeflemektedir. Bu özellik, SA'yı teorik olarak küresel optimuma ulaşabilen yöntemler arasına dahil etmektedir. Ancak simüle tavlama algoritmasının en önemli dezavantajı, yakınsama süresinin uzun olması ve sıcaklık azalma parametrelerine yüksek derecede bağımlı olmasıdır [36]. Enerji yönetim sistemleri gibi çok boyutlu ve zamanla değişen problemlerde, bu durum hesaplama yükünü artırmakta ve algoritmanın pratik uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Özellikle çok sayıda parametrenin optimize edilmesi gereken bulanık mantık kontrolcü tasarımlarında, SA yöntemi genellikle verimlilik açısından yetersiz kalmaktadır.

Deterministik optimizasyon yöntemleri; doğrusal programlama, doğrusal olmayan programlama ve dinamik programlama gibi yaklaşımları içermektedir. Bu yöntemler, problem yapısının matematiksel olarak açık biçimde tanımlanabildiği ve çözüm uzayının düzgün olduğu durumlarda güçlü sonuçlar sunabilmektedir. Ancak hibrit enerji yönetim problemleri çoğu zaman doğrusal olmayan, ayrık kararlar içeren ve yüksek boyutlu yapılara sahiptir. Ayrıca bulanık mantık kontrolcülerin üyelik fonksiyonları gibi parametreleri, deterministik yöntemlerle ifade etmek ve çözmek oldukça zordur. Bu nedenle deterministik yaklaşımlar, bu çalışmada ele alınan EMS optimizasyon problemi için uygulanabilir bulunmamıştır.

Genetik algoritma, biyolojik evrim süreçlerinden esinlenen, seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörlerine dayalı popülasyon tabanlı bir optimizasyon yöntemidir. GA'da her bir birey, çözüm uzayında bir aday çözümü temsil etmekte ve popülasyon içerisindeki bireyler, tanımlanan amaç fonksiyonuna göre evrimsel bir süreçten geçirilmektedir. Genetik algoritmaların hibrit enerji sistemleri için önemli bir avantajı, çözüm uzayını küresel ölçekte tarayabilme yetenekleridir [37]. Algoritmanın türev bilgisine ihtiyaç duymaması, doğrusal olmayan ve süreksiz problem yapılarıyla doğal bir uyum sağlamaktadır. Ayrıca GA, çok kriterli amaç fonksiyonlarının kolaylıkla tanımlanabilmesine olanak tanımakta; hidrojen tüketimi, batarya SoC hedefi ve sistem verimliliği gibi birden fazla başarımlı ölçütünü aynı anda dikkate alabilmektedir. Bu çalışmada ele alınan bulanık mantık tabanlı enerji yönetim sistemi, üyelik fonksiyonlarının sınır değerleri ve geçiş bölgeleri gibi kesikli parametreler içermektedir. Bu tür parametrelerin optimizasyonu, gradyan tabanlı yöntemler için uygun değildir. GA'nın kesikli ve doğrusal olmayan değişkenlerle etkin biçimde

çalışabilmesi, bu algoritmayı EMS optimizasyonu için güçlü bir aday haline getirmektedir.

4.2.2.1 Genetik algoritma

Yukarıda sunulan yöntemlerin karşılaştırmalı değerlendirilmesi sonucunda, genetik algoritmanın bu çalışmada ele alınan optimizasyon problemi için en uygun yaklaşım olduğu sonucuna varılmıştır. GA'nın tercih edilmesinin temel gerekçeleri şu şekilde özetlenebilir:

Öncelikle, bulanık mantık kontrolcüde kullanılan üyelik fonksiyonlarının sınırları ve merkez noktaları, doğrusal olmayan ve kesikli bir yapıya sahiptir [34]. Bu durum, gradyan bilgisine dayalı yöntemlerin uygulanmasını mümkün kılmamaktadır. Genetik algoritmaların türev bilgisine ihtiyaç duymaması, bu tür problemlerde önemli bir avantaj sağlamaktadır.

İkinci olarak, bu çalışmada tanımlanan amaç fonksiyonu, hidrojen tüketimi ile uçuş sonu batarya SoC hedefinden sapmayı aynı anda içeren çok kriterli bir yapıya sahiptir. GA, bu tür çok amaçlı başarımlı ölçütlerini tek bir uygunluk fonksiyonu altında değerlendirebilme esnekliği sunmaktadır.

Son olarak, GA'nın çevrim dışı optimizasyon için uygun olması, hesaplama maliyetinin bu çalışmanın kapsamı açısından kabul edilebilir seviyede kalmasını sağlamıştır. Elde edilen en iyi çözümün daha sonra kontrolcüye entegre edilmesiyle gerçek zamanlı sistem üzerinde ek bir hesaplama yükü oluşturulmamıştır.

Bu nedenlerle genetik algoritma, bulanık mantık tabanlı enerji yönetim sisteminin parametre optimizasyonu için hem teorik hem de pratik açıdan güvenilir ve mantıklı bir çözüm olarak seçilmiştir.

4.2.2.2 Optimizasyon sonuçları

Optimizasyon süreci, doğrudan kontrol yapısının davranışını belirleyen üyelik fonksiyonu sınırları ve yakıt hücresi güç seviyeleri üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, kontrol algoritmasının yapısı değiştirilmeden sistemin hem enerji verimliliği hem de görev sonu batarya durumu açısından daha dengeli bir çalışma sergilemesi hedeflenmiştir.

Optimizasyon problemi, genetik algoritma (GA) tabanlı bir yöntem kullanılarak MATLAB ortamında çevrim dışı olarak çözülmüştür. Bu kapsamda, karar değişkenleri olarak altı boyutlu bir parametre vektörü tanımlanmış ve bu vektör, enerji yönetim stratejisinin temel eşiklerini temsil edecek şekilde yapılandırılmıştır.

Yakıt hücresi güç seviyeleri ise sistemin verimli ve düşük yaşlanma bölgesinde çalışmasını sağlayacak biçimde sınırlandırılmıştır. Bu sınırlamalarla beraber optimizasyon vektörünün elemanları Çizelge 4.3'teki gibi oluşmuştur.

Çizelge 4.3 : Optimizasyon vektörü elemanları ve sınır değerleri.

Değişken	Adı	Sınır değerleri
x(1)	Talep Gücü Düşük Seviye Bitiş Sınırı	[300, 800]
x(2)	Talep Gücü Yüksek Seviye Başlangıç Sınırı	[1800, 2400]
x(3)	Batarya SoC Düşük Seviye Sınırı	[15, 35]
x(4)	Batarya SoC Yüksek Seviye Sınırı	[65, 85]
x(5)	Yakıt Hücresi Nominal Güç Merkez Noktası	[1200, 2000]
x(6)	Yakıt Hücresi Maksimum Güç Başlangıç Noktası	[2100, 2400]

Her bir karar değişkeni için fiziksel ve operasyonel kısıtlar göz önünde bulundurularak alt ve üst sınırlar tanımlanmıştır. Örneğin, düşük talep gücü bölgesinin bitiş değeri 300–800 W aralığında, yüksek talep gücü başlangıcı ise 1800–2400 W aralığında sınırlandırılmıştır. Benzer şekilde SoC eşikleri, bataryanın güvenli çalışma aralığını ihlal etmeyecek şekilde %15–35 ve %65–85 aralıklarında belirlenmiştir.

Bu parametrelerin her biri, bulanık mantık kontrolcüsünde kullanılan üyelik fonksiyonlarının şekil ve konumlarını doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla, optimizasyon süreci; talep gücü–batarya–yakıt hücresi güç paylaşımı arasındaki ilişkinin sistematik olarak ayarlanmasını mümkün kılmaktadır.

Optimizasyon algoritmasında kullanılmaları için her bir üyelik fonksiyonunun optimizasyon vektörünün ilgili elemanı kullanılarak parametrik şekilde ifade edilmesi gerekmektedir. Optimize edilecek vektörün parametrelerine göre ifade edilmiş üyelik fonksiyonları Çizelge 4.4'te görülebilmektedir.

Çizelge 4.4 : Üyelik fonksiyonlarının parametrik değerleri.

Üyelik fonksiyonu	Tip	Sınır değerleri
Talep güç : Düşük (MF1)	Trapez	[0, 0, x(1), x(1)+200]
Talep güç : Orta (MF2)	Trapez	[x(1), x(1)+200, x(2)-200, x(2)]
Talep güç : Yüksek (MF3)	Trapez	[x(2)-200, x(2), 4000, 4000]
SoC : Düşük (MF1)	Trapez	[0, 0, x(3), x(3)+5]
SoC : Orta (MF2)	Trapez	[x(3), x(3)+5, x(4)-5, x(4)]
SoC : Yüksek (MF3)	Trapez	[x(4)-5, x(4), 100, 100]
Çıkış : Nominal (MF1)	Trapez	[x(5)-500, x(5)-275, x(5)+275, x(5)+700]
Çıkış : Minimum (MF2)	Üçgen	[0, 0, 600]
Çıkış : Maksimum (MF3)	Trapez	[x(6)-200, x(6), 2500, 4000]

Tanımlanan bu parametre vektörü için uygunluk fonksiyonu, sistem başarımını iki temel ölçüt üzerinden değerlendirecek şekilde kurgulanmıştır. Birinci ölçüt, görev süresi boyunca tüketilen toplam hidrojen miktarıdır. Hidrojen tüketimi, yakıt hücresinin çalıştığı güç seviyeleri ve süreleri dikkate alınarak hesaplanmış ve doğrudan enerji maliyetini temsil eden bir terim olarak amaç fonksiyonuna dahil edilmiştir. İkinci ölçüt ise uçuş sonunda elde edilen batarya SoC değerinin hedeflenen referans SoC seviyesinden sapmasıdır. Bu terim, bataryanın ne aşırı boşaltılmış ne de gereksiz şekilde dolu kalmasını sağlayacak şekilde sistemin dengeli çalışmasını teşvik etmektedir.

Bu iki kriter, ağırlıklandırılmış bir maliyet fonksiyonu altında birleştirilmiş ve genetik algoritma tarafından minimize edilmesi hedeflenen tekil bir amaç fonksiyonu haline getirilmiştir. İlgili maliyet fonksiyonunun hesaplanması, MATLAB uygunluk fonksiyonu kodu aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu fonksiyon içerisinde bulanık mantık kontrolcüsü ilgili parametrelerle güncellenmekte, sistem benzetimi çalıştırılmakta ve elde edilen hidrojen tüketimi ile görev sonu SoC değeri kullanılarak toplam maliyet hesaplanmaktadır. Denklem 4.1’de kullanılan genel maliyet hesabı denklemi verilmiştir.

$$J_{\text{maliyet}} = c_{\text{H}_2} \int_0^T \dot{m}_{\text{H}_2}(t) dt + c_{\text{bat}} \int_0^T |P_{\text{bat}}(t)| dt \quad (4.1)$$

Burada, J_{maliyet} hesaplanan toplam maliyetini, c_{H_2} hidrojen birim maliyetini, $\dot{m}_{H_2}$ kullanılan hidrojen miktarını ve P_{bat} kullanılan batarya gücünü ifade etmektedir.

Görev sonu SoC değerinin belirlenmesi, enerji yönetim sisteminin güç paylaşımı karakteristiğini doğrudan etkilemektedir. Bu tasarımda amaçlanan davranış yakıt hücresinin tüketimi ve ani yüklenmesini olabildiğince düşük tutmak olduğu için uçuş sonunda hedeflenen SoC değeri 20 olarak seçilmiştir. Bu değerin altında SoC oluşması durumu, batarya sağlığı ve acil durum koşulları göz önünde bulundurulduğunda istenmeyen bir durum olarak öne çıkmaktadır. Bu yüzden maliyet optimizasyonuna bir cezalandırma durumu eklenmiştir. Bu durum hedeflenen SoC değerinden düşük bir SoC elde edilmesi durumunda denklem 4.2'deki gibi hesaplanır.

$$ceza = (SoC_{Hedef} - SoC_{Sonuç}) \cdot 30 \quad (4.2)$$

Burada SoC_{Hedef} , uçuş sonunda elde edilmesi hedeflenen SoC değerini; $SoC_{Sonuç}$ ise benzetim sonucunda elde edilen SoC değerini ifade etmektedir. Hedeflenen durumdan daha fazla batarya kullanımının optimizasyonda istenmeyen bir durum olduğunu hesaplayabilmek için bu durumların farkları bir ceza katsayısı ile çarpılmıştır. Daha sonra maliyet hesabı denklem 4.3'deki gibi yapılır:

$$maliyet = w_1 \cdot H_{2toplam} + ceza \quad (4.3)$$

Burada $H_{2toplam}$ her benzetim iterasyonu sonucunda kullanılan toplam hidrojen miktarını ifade etmektedir. Bu miktarın maliyete etkisini belirlemek için ceza hesabında kullanıldığı gibi bir ağırlık katsayısı, w_1 , eklenmiştir. Ağırlık katsayıları optimizasyon karakteristiğini belirlemek için doğrudan etkili olmaktadır. Bu çalışmadaki uygunluk fonksiyonu tasarlanırken hidrojen tüketimi için ağırlık katsayısı 1 olarak seçilmiştir.

Optimizasyonun yürütülmesi için bu uygunluk fonksiyonunu çağıran ana genetik algoritma oluşturulmuştur. GA parametreleri, hesaplama maliyeti ile çözüm kalitesi arasında dengeli bir yapı sağlamak amacıyla belirlenmiştir. Bu kapsamda popülasyon büyüklüğü 20, jenerasyon sayısı ise 10 olarak seçilmiştir. Seçilen bu değerler, çözüm uzayının yeterli ölçüde taranmasına olanak tanırken, çevrim dışı optimizasyon süresinin makul seviyelerde kalmasını sağlamıştır.

Genetik algoritma; başlangıçta rastgele oluşturulan bir popülasyon üzerinden çalıştırılmış, her jenerasyonda çaprazlama, mutasyon ve seçim işlemleri uygulanarak

daha düşük maliyetli çözümler elde edilmiştir. Optimizasyon süreci boyunca, parametre vektörlerinin tanımlanan sınırlar içerisinde kalması sağlanmış ve fiziksel olarak anlamsız çözümlerin oluşması engellenmiştir.

GA çalışmasının sonunda, en düşük maliyet değerini sağlayan parametre seti “en iyi çözüm” olarak belirlenmiş ve bu parametreler kullanılarak nihai bulanık mantık tabanlı enerji yönetim sistemi oluşturulmuştur. Elde edilen kontrolcü hem hidrojen tüketimi hem de görev sonu SoC hedefi açısından dengeli ve uygulanabilir bir başarıyı sergilemiştir.

Hazırlanan optimizasyon modeli, güvenilirlik ve tekrarlanabilirlik açısından farklı başlangıç popülasyonları ile defalarca çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçların tutarlı olması, GA tabanlı optimizasyonun bu problem için kararlı ve uygun bir çözüm sunduğunu göstermiştir. Optimizasyon sürecine ait ana MATLAB kodları hazırlanmış olup, tüm benzetimler MATLAB ortamında başarıyla gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.5’te bulanık mantık kontrolcüsünün tüm üyelik fonksiyonlarının optimizasyon algoritması sonrası değerleri verilmiştir. Son durumdaki değerleri kontrol mekanizmasına entegre edilerek yakıt hücresi ve bataryadan oluşan sistemin kontrolcüsü güncellenmiştir.

Çizelge 4.5 : Bulanık mantık kontrolcüsü optimize edilmiş değerleri.

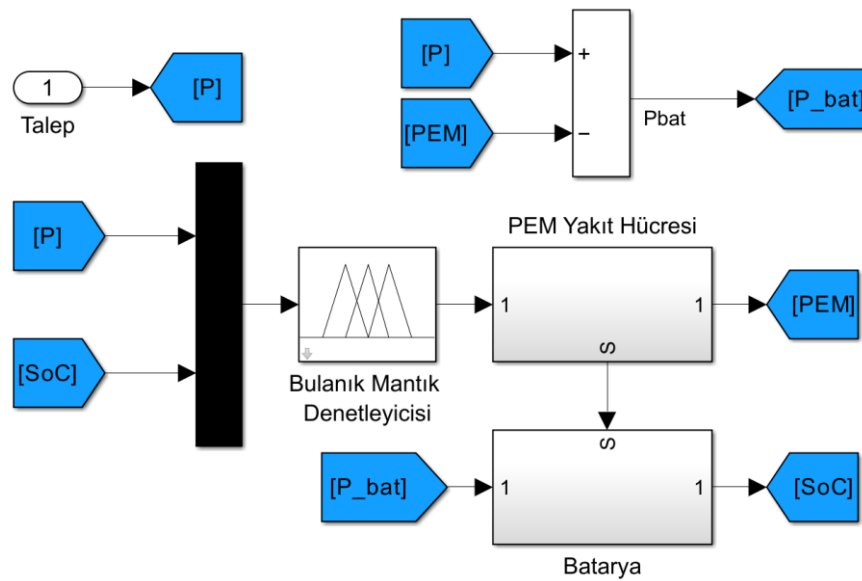
Üyelik fonksiyonu	Tip	Sınır değerleri
Talep güç : Düşük (MF1)	Trapez	[0, 0, 504.90, 704.90]
Talep güç : Orta (MF2)	Trapez	[504.90, 704.90, 1725.71, 1925.71]
Talep güç : Yüksek (MF3)	Trapez	[1725.71, 1925.71, 4000, 4000]
SoC : Düşük (MF1)	Trapez	[0, 0, 16.68, 21.68]
SoC : Orta (MF2)	Trapez	[16.68, 21.68, 67.85, 72.85]
SoC : Yüksek (MF3)	Trapez	[67.85, 72.85, 100, 100]
Çıkış : Nominal (MF1)	Trapez	[492.50, 993, 1543, 2243]
Çıkış : Min (MF2)	Üçgen	[0, 0, 600]
Çıkış : Maksimum (MF3)	Trapez	[2130, 2330, 2500, 4000]

Manuel tasarımda sezgisel olarak belirlenen sınırlar, bu optimizasyon ile sistemin gerçek fiziksel kısıtlarına ve verimlilik eğrilerine tam uyumlu hale getirilmiştir. Bu yapı, İHA'nın görev süresini uzatan ve enerji yönetimini otonom olarak en verimli

seviyede tutan nihai kontrolcü modelidir. Elde edilen nihai kontrolcü, enerji yönetim sistemine entegre edilerek benzetim çalışmasında kullanılmıştır.

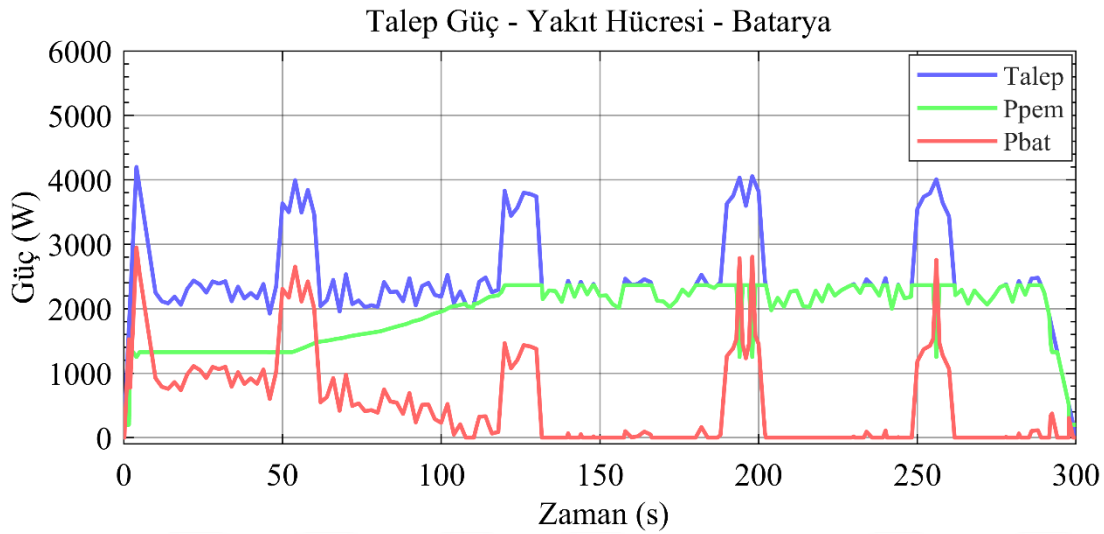
4.3 Model ve Benzetim

Hibrit enerji sistemi modeli; yakıt hücresi, lityum batarya, güç dönüştürücüleri, enerji yönetim sistemi ve kapalı çevrim kontrol mekanizmalarının bütünleşik olarak bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Yakıt hücresi, 24 V seviyesindeki çıkış gerilimini 48 V DA bara gerilimine yükseltmek amacıyla tasarlanan 5-fazlı faz kaydırmalı yükseltici tipi dönüştürücü üzerinden sisteme bağlanırken, batarya tarafında ise hem şarj hem de deşarj işlemlerini aynı donanım üzerinden gerçekleştirebilmek için 4-anahtarlı çift yönlü alçaltıcı-yükseltici dönüştürücü kullanılmıştır. Her iki güç kaynağı da ortak DA bara üzerinden yükü besleyecek şekilde yapılandırılmış ve güç paylaşımı, geliştirilen enerji yönetim sistemi tarafından belirlenen referanslar doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. EMS katmanında, anahtarlama mekanizması ve bulanık mantık tabanlı kontrol stratejileri kullanılarak yakıt hücresinin verimli ve sabit güç bölgelerinde çalışması sağlanmış, ani güç talepleri ve geçici rejimler ise batarya üzerinden karşılanmıştır. Bu yapı, dönüştürücülerin gerilim ve akım kontrol çevrimleri ile birlikte kapalı çevrim olarak çalıştırılmış ve tüm alt sistemlerin etkileşimi dikkate alınarak kapsamlı bir hibrit güç sistemi modeli elde edilmiştir. EMS, kontrol mekanizmaları ve güç kaynaklarını içeren bütünleşik sistemin MATLAB/Simulink modeli Şekil 4.9’da sunulmuştur.



Şekil 4.9 : EMS, kontrol mekanizması ve güç kaynaklarından oluşan model.

Oluşturulan hibrit güç sistemi modeli, uçuş süresince talep edilmesi öngörülen zamana bağlı yük profilleri altında benzetimi yapılmıştır. Bu benzetimler sonucunda, yakıt hücresi ve batarya arasındaki güç paylaşımını gösteren grafik Şekil 4.10'da sunulmuştur. Benzetim başlangıcında batarya şarj durumunun yüksek ve güç talebinin göreceli olarak yüksek olduğu çalışma koşullarında, enerji yönetim sistemi tarafından batarya ağırlıklı bir güç besleme stratejisinin benimsendiği gözlenmiştir. Uçuşun başlangıcında yakıt hücresinin sağlıklı bir şekilde yüksek güçlere çıkabilmesi için yüklenmesinin yavaş yapıldığı görülmektedir.

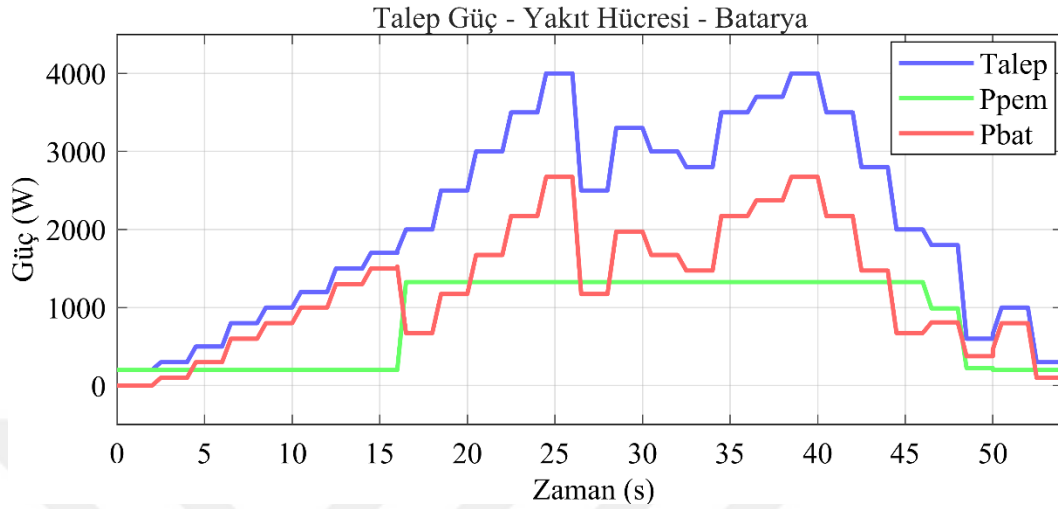


Şekil 4.10 : Uçuş yük profili altında kaynaklar arasındaki güç paylaşımı.

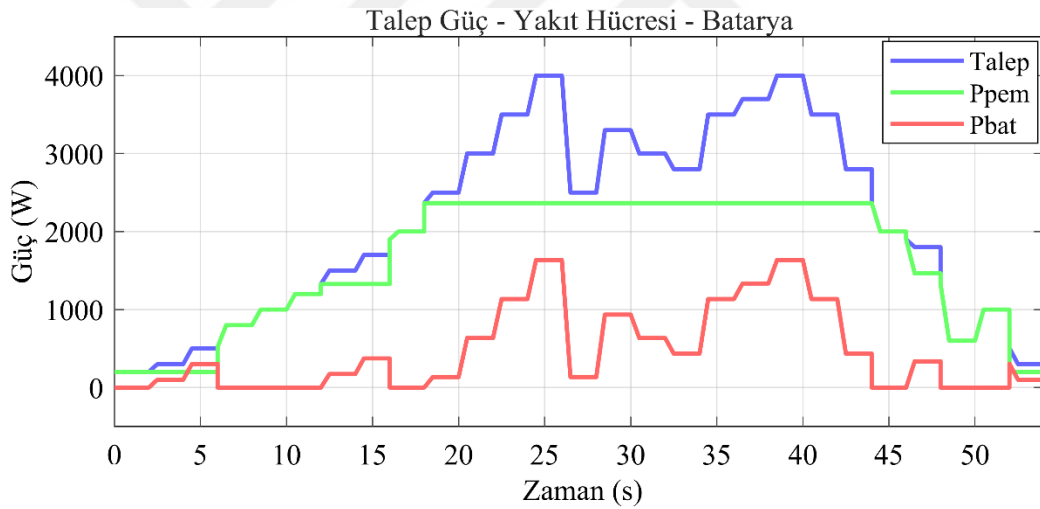
Yüksek SoC değerlerinde yakıt hücresi ve batarya arasındaki yük paylaşımı Şekil 4.11'de görülebilmektedir. Enerji yönetim sistemi bu durumda batarya kullanımını daha öncelikli olarak belirlemiştir. Talep edilen güç belirli bir seviyeye çıkana kadar yakıt hücresi en düşük maliyetli durumda kullanılmıştır. Yüksek talep sırasında da en verimli çalıştığı ve en düşük gerilim dalgalanması olan güç çıkış seviyesini sağlayarak çalıştığı görülebilir. Yakıt hücresinin gücünün olabildiğince sabit bir seviyede tutularak maruz kalabileceği değişken durumların yaşanmaya ve hücre sağlığına etkilerinin azaltılmaya çalışıldığı görülmektedir.

Orta SoC değerlerinde uçuş sırasında yakıt hücresi ve batarya arasındaki yük paylaşımı ise Şekil 4.12'de görülebilmektedir. Bu durum uçuşun genel durumundaki güç dağılımı karakteristiğini sunmaktadır. Enerji yönetim sistemi tarafından ani yükler ve yüksek talep şartlarında bataryanın devreye alınmasının sağlandığı görülebilmektedir. Böylece, yakıt hücresinin yüksek güç bölgelerinde gereksiz dalgalanmalara maruz kalması önlenmiş, hidrojen tüketimi açısından maliyet etkin bir işletim sağlanmış ve

aynı zamanda yakıt hücresinin yaşlanma ve yıpranma etkileri azaltılmıştır. Orta talep güç durumunda ise düşük seviyede ve sabit bir yakıt hücresi çıkışı sağlanabildiği görülebilmektedir.

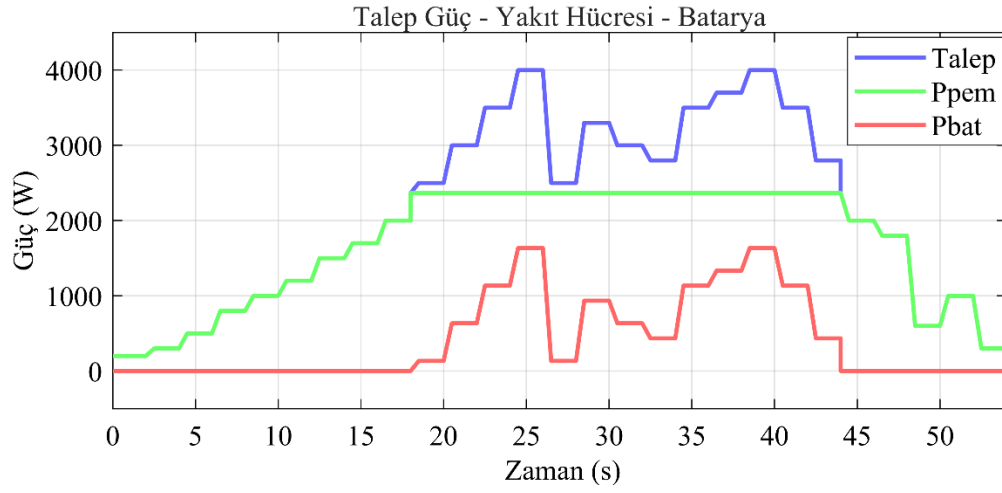


Şekil 4.11 : Yüksek SoC değerinde uçuş yük profili altında güç paylaşımı.



Şekil 4.12 : Orta SoC değerinde uçuş yük profili altında güç paylaşımı.

Düşük SoC değerlerinde uçuş esnasındaki yüklerin güç kaynakları arasındaki dağılımı Şekil 4.13'te görülmektedir. Bu durumda enerji yönetim sistemi, yakıt hücresine zarar vermeden bataryayı etkin bir şekilde kullanmıştır. Uçuş sırasında yapılacak manevralar veya kullanılması gereken aviyonik ekipmanlar sebebiyle oluşacak yüksek güç taleplerinde bataryanın devreye alındığı görülebilmektedir. Bu durum hem uçuşun ve görevin başarılı bir şekilde tamamlanmasını sağlamış hem de yakıt hücresini düşük verimli ve gerilimin dalgalanmasının arttığı bölgede çalışmaktan korumuştur.



Şekil 4.13 : Düşük SoC değerinde uçuş yük profili altında güç paylaşımı.

Elde edilen bu sonuçlar, geliştirilen enerji yönetim stratejisinin uçuş süresince hem enerji verimliliğini hem de sistem bütünlüğünü başarıyla koruduğunu ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, multirotor insansız hava araçları için hidrojen yakıt hücresi ve lityum bataryadan oluşan aktif hibrit bir güç sistemi tasarlanmış, modellenmiş ve MATLAB/Simulink ortamında ayrıntılı olarak benzetimi yapılmıştır. Geliştirilen sistem, yakıt hücresinin yüksek özgül enerji avantajı ile bataryanın yüksek güç yoğunluğu ve hızlı dinamik yanıt özelliklerini bir araya getirecek şekilde yapılandırılmıştır. Bu sayede, yalnızca batarya temelli sistemlere kıyasla daha uzun uçuş sürelerine olanak tanıyan ve aynı zamanda yakıt hücresinin dinamik kısıtlarını dengeleyen bir enerji altyapısı elde edilmiştir.

Devamında yakıt hücresi ve batarya için uygun güç elektroniği arayüzleri tasarlanmıştır. Yakıt hücresi tarafında 5-fazlı faz kaydırmalı yükseltici dönüştürücü kullanılarak hem düşük akım ve gerilim dalgalanması sağlanmış hem de yüksek güç seviyelerinde verimli bir DA bara beslemesi gerçekleştirilmiştir. Batarya tarafında ise 4-anahtarlı çift yönlü alçaltıcı-yükseltici dönüştürücü ile aynı donanım üzerinden şarj ve deşarj işlemleri mümkün kılınmıştır. Bu yapı, hibrit sistemlerde esneklik, ağırlık ve verimlilik açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

Enerji yönetim sistemi tasarımında ise farklı yaklaşımlar literatür çerçevesinde karşılaştırılmış ve bu çalışma özelinde kural tabanlı bir kontrol stratejisi temel alınmıştır. Yakıt hücresinin yavaş dinamikleri, verimli çalışma aralığı ve hidrojen maliyeti gibi faktörler dikkate alınarak, ani yük taleplerinin batarya tarafından karşılanması ve yakıt hücresinin mümkün olduğunca sabit ve verimli güç bölgelerinde çalıştırılması hedeflenmiştir. Bu kural tabanlı yapı, anlık durumlar ve sistemin ilk çalışma anları için anahtarlama mekanizmaları ile desteklenmiş; özellikle başlangıçta yakıt hücresinin geç oturan çıkış karakteristiği nedeniyle yalnızca batarya ile çalışılması sağlanmıştır. Kural tabanlı enerji yönetim stratejisi, bulanık mantık kontrolcü kullanılarak sürekli ve yumuşak bir güç paylaşım mekanizmasına dönüştürülmüştür. Talep edilen güç ve batarya SoC bilgileri giriş olarak kullanılmış, yakıt hücresi çıkış gücü ise kontrolcünün çıkışı olarak belirlenmiştir. Bulanık mantık kontrolcüsünün üyelik fonksiyonları ve eşik değerleri, genetik algoritma (GA) tabanlı

bir optimizasyon süreci ile ayarlanmıştır. Optimizasyon sürecinde hidrojen tüketimi ve görev sonu batarya SoC hedefinden sapma birlikte değerlendirilmiş, böylece hem maliyet etkin hem de görev güvenliğini gözeten bir enerji yönetim yapısı elde edilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçları, geliştirilen hibrit güç sistemi ve EMS yapısının uçuş yük profilleri altında beklenen davranışı sergilediğini göstermektedir. Batarya SoC seviyesinin yüksek olduğu ve ani güç taleplerinin bulunduğu durumlarda batarya ağırlıklı bir güç paylaşımı gözlemlenirken, SoC seviyesinin nominal aralığa yaklaşmasıyla birlikte yakıt hücresinin verimli çalışma bölgesinde devreye alındığı tespit edilmiştir. Bu sayede, yakıt hücresinin yüksek frekanslı güç dalgalanmalarına maruz kalması engellenmiş, hidrojen tüketimi açısından maliyet etkin bir işletim sağlanmış ve yakıt hücresi yaşlanmasının azaltılmasına katkı sunulmuştur.

Bu çalışmada sunulan model, çevrim dışı benzetim ortamında doğrulanmış olmakla birlikte, bazı sınırlamalara sahiptir. EMS tasarımı, belirli kural setleri ve sabit üyelik fonksiyonları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Gerçek uçuş koşullarında değişken çevresel faktörler ve görev profilleri dikkate alındığında, bu yapıların adaptif bir hale getirilmesi sistem başarımını daha da artırabilir. Gelecek çalışmalar kapsamında, enerji yönetim sisteminin yapay zeka ve öğrenme tabanlı yöntemlerle geliştirilmesi önerilmektedir. Bu tür yöntemler sayesinde, uçuş esnasında sistem davranışına göre kendini ayarlayabilen ve daha optimal güç paylaşımı gerçekleştirebilen EMS yapıları elde edilebilir. Ayrıca donanımsal testler ve gerçek uçuş deneyleri ile modelin doğrulanması, çalışmanın uygulamaya yönelik değerini önemli ölçüde artıracaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Cho, J., Kim, H. S., ve Min, K.** (2008). Transient response of a unit proton-exchange membrane fuel cell under various operating conditions. *Journal of Power Sources*, 185 (1), 118–128, doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.06.073.
- [2] **Tang, Y., Yuan, W., Pan, M., Li, Z., Chen, G., ve Li, Y.** (2010). Experimental investigation of dynamic performance and transient responses of a kW-class PEM fuel cell stack under various load changes. *Applied Energy*, 87 (4), 1410–1417.
- [3] **Espiari, S. ve Aleyaasin, M.** (2010). Transient response of PEM fuel cells during sudden load change. *Proceedings of the 2010 IEEE International Energy Conference and Exhibition (EnergyCon)*, (s.211–216), Manama. doi: 10.1109/ENERGYCON.2010.5771678.
- [4] **Khan, M. J. ve Iqbal, M. T.** (2005). Dynamic modelling and simulation of a fuel cell generator. *Fuel Cells*, 5(1), 97–104.
- [5] **Mubarok, H., ve Santoso, T. H.** (2021). Monitoring of Hydrogen Fuel Cell Modeling with Boost Converter. *Journal of Physics: Conference Series*, 1844., 012018.
- [6] **Wang, Z., Liu, Z., Fan, L., Du, Q., ve Jiao, K.** (2023). Application progress of small-scale proton exchange membrane fuel cell. *Energy Reviews*, 2(2), 100017. doi: 10.1016/j.enrev.2023.100017.
- [7] **Tian, W., Zhang, X., Zhou, P. ve Guo, R.** (2025). Review of energy management technologies for unmanned aerial vehicles powered by hydrogen fuel cell. *Energy*, 323.
- [8] **Datta, A.** (2021). *PEM fuel cell model for conceptual design of hydrogen eVTOL aircraft* (Rapor No: 20210000284). NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA.
- [9] **Url-1** <<https://www.thesisat.org/wp-content/uploads/2018/07/hidrojen-yakit-hucresi.jpg>>, erişim tarihi 25.12.2025.
- [10] **Barać, B., Krpan, M. ve Capuder, T.** (2024). Modelling of PEM fuel cell for power system dynamic studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 39(2), 3286–3298. doi:10.1109/TPWRS.2023.3297741.
- [11] **Wang, C., Nehrir, M. H. ve Shaw, S. R.** (2005). Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(2), 442–451.
- [12] **Ferrero, R., Marracci, M., Prioli, M. ve Tellini, B.** (2012). Simplified model for evaluating ripple effects on commercial PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(18), 13462–13469.

- [13] **Nehrir, M. H. ve Wang, C.** (2009). *Dynamic modeling and simulation of PEM fuel cells* (ss. 57–84). Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press.
- [14] **Larminie, J., Dicks, A. ve McDonald, M. S.** (2003). *Fuel cell systems explained* (2. baskı). Chichester: Wiley.
- [15] **Stauffer, D., Hirschenhofer, J., Klett, M. ve Engleman, R.** (1998). *Fuel cell handbook*. Morgantown, WV ve Pittsburgh, PA: Federal Energy Technology Center. (Teknik Rapor No: DOE/FETC-99/1076).
- [16] **Olabi, A. G., Wilberforce, T., Alanazi, A., Vichare, P., Sayed, E. T., Maghrabie, H. M., Elsaid, K. ve Abdelkareem, M. A.** (2022). Novel trends in proton exchange membrane fuel cells. *Energies*, 15(14), 4949.
- [17] **Jouin, M., Gouriveau, R., Hissel, D., Péra, M.-C. ve Zerhouni, N.** (2013). Prognostics and health management of PEMFC: State of the art and remaining challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 15307–15317.
- [18] **Şefkat, G. ve Özel, M. A.** (2018). PEM yakıt pilinin Simulink modeli ve analizi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(2), 351–366. <https://doi.org/10.17482/uumfd.400337>.
- [19] **Amatoul, F. Z. ve Er-raki, M.** (2023). Modeling and simulation of electrical generation systems based on PEM fuel cell–boost converter using a closed loop PI controller. *Energy Reports*, 9, 296–308.
- [20] **Kirubakaran, A., Jain, S. ve Nema, R. K.** (2009). The PEM fuel cell system with DC/DC boost converter: Design, modeling and simulation. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1(3), 165–170.
- [21] **Mwinga, M., McPherson, M. ve Groenewald, B.** (2015). Design, modelling and simulation of a fuel cell power conditioning system. *Journal of Thermal Engineering*, 1(6), 408–419.
- [22] **Tunelid, L.** (2022). *Boost converter inductor design for high-power fuel cells using Pareto optimisation for single and coupled cores*. (Yüksek lisans tezi). KTH Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [23] **Ren, L., Wang, D. ve Zhang, Y.** (2024). Adaptive neural network control of four-switch buck–boost converters. *Actuators*, 13(9), 375. <https://doi.org/10.3390/act13090375>.
- [24] **Sun, B.** (2019). *Multimode control for a four-switch buck-boost converter*. Texas Instruments. <https://www.ti.com/lit/an/slyt765/slyt765.pdf>
- [25] **Amatoul, F. Z. ve Er-raki, M.** (2023). Modeling and simulation of electrical generation systems based on PEM fuel cell–boost converter using a closed loop PI controller. *Energy Reports*, 9, 296–308.
- [26] **Shen, Z., Liu, S., Zhu, W., Ren, D., Xu, Q., ve Feng, Y.** (2024). A review on key technologies and developments of hydrogen fuel cell multi-rotor drones. *Energies*, 17, 4193. <https://doi.org/10.3390/en17164193>
- [27] **Karunarathne, L., Economou, J. ve Knowles, K.** (2012). Power and energy management system for fuel cell unmanned aerial vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 226(4), 437–454.

- [28] **Arat, H. T. ve Sürer, M. G.** (2020). Experimental investigation of fuel cell usage on an air vehicle's hybrid propulsion system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(49), 26370–26378. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.242>
- [29] **Xu, L., Huangfu, Y. ve Ma, R.** (2022). A comprehensive review on fuel cell UAV key technologies: Propulsion system, management strategy, and design procedure. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8(4), 4118–4139. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3195272>
- [30] **Boukoberine, M. N., Zia, M. F., Benbouzid, M., Zhou, Z. ve Donato, T.** (2021). Hybrid fuel cell powered drones energy management strategy improvement and hydrogen saving using real flight test data. *Energy Conversion and Management*, 236, 113987.
- [31] **Liu, L., Zhang, X. ve He, Y.** (2023). *Energy management and control of new energy flight vehicle* (ss. 12–14). Pekin: Beijing Institute of Technology Press.
- [32] **Sulaiman, N., Hannan, M. A., Mohamed, A., Majlan, E. H. ve Wan Daud, W. R.** (2015). A review on energy management system for fuel cell hybrid electric vehicle: Issues and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 802–814.
- [33] **Shen, Q., Hou, M., Liang, D. ve Yan, X.** (2008). The voltage characteristics of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) under steady and transient states. *Journal of Power Sources*, 179(1), 292–296.
- [34] **Li, P., Mao, Z., Pang, S., Shi, W., Quan, S. ve Huangfu, Y.** (2023). A fuzzy logic control-based energy management strategy for fuel cell/battery UAV hybrid power system. *49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2023) Bildiriler Kitabı*, Singapur, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IECON51785.2023.10312386>.
- [35] **Lei, T., Wang, Y., Jin, X., Min, Z., Zhang, X. ve Zhang, X.** (2022). An optimal fuzzy logic-based energy management strategy for a fuel cell/battery hybrid power unmanned aerial vehicle. *Aerospace*, 9(2), 115. <https://doi.org/10.3390/aerospace9020115>.
- [36] **Almaraashi, M., John, R. ve Coupland, S.** (2012). Designing generalised type-2 fuzzy logic systems using interval type-2 fuzzy logic systems and simulated annealing. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2012) Bildiriler Kitabı*, Brisbane, Avustralya, 1–8. <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2012.6251219>.
- [37] **Demirel, L.** (1999). *Mühendislik optimizasyonunda genetik algoritmalar*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. <https://polen.itu.edu.tr/items/b169e134-0ddc-4d1f-b990-e0538ffae4d9>.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Baran KUL

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2023, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği (İngilizce)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2022, Türk Hava Yolları Teknik A.Ş., Uzman (yarı zamanlı)
- 2023 – devam ediyor, Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ), Tasarım Mühendisi

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kul B., Özmen T., Uzun E., Gülbahçe M.O.** 2025. Modeling and Simulation of Hybrid Battery – Fuel Cell Energy System for UAVs. *2025 66th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, October 23-25, 2025 Riga, Latvia.