

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YENİLENEBİLİR ENERJİ VE BİYO YAKIT TABANLI YAKIT
HÜCRESİ SİSTEMLERİ İLE GEMİLERDE HOTEL YÜKLERİ
İÇİN ENERJİ VE GÜÇ YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Batuhan ÇAKAN

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK - ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Prof. Dr. İhsan PEHLİVAN

Haziran 2025

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YENİLENEBİLİR ENERJİ VE BİYO YAKIT TABANLI YAKIT
HÜCRESİ SİSTEMLERİ İLE GEMİLERDE HOTEL YÜKLERİ
İÇİN ENERJİ VE GÜÇ YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Batuhan ÇAKAN

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK - ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 23/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Prof. Dr. İhsan PEHLİVAN	Başarılı
Üye: Prof. Dr. Nuri AKKAŞ	Başarılı
Üye: Doç. Dr. Selçuk EMİROĞLU	Başarılı

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim

Batuhan ÇAKAN
23/06/2025

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, araştırma sürecinin her aşamasında desteğini esirgemeyen, akademik gelişimime katkı sağlayan değerli danışman hocam Prof. Dr. İhsan PEHLİVAN'a ve bu süreçte bilgi birikimi, yol göstericiliği ve sürekli desteğiyle yanımda olan Ar-Ge Müdürüm ve çalışma arkadaşım Erdeniz EROL'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi'ne, İş Deneyimi Yüksek Lisans Programı kapsamında bu çalışmaya sağladıkları destekten dolayı teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Avrupa Birliği'nin 2021–2027 yıllarını kapsayan “Ufuk Avrupa” (Horizon Europe) Araştırma ve İnovasyon Programı kapsamında, HORIZON-CL5-2023-D5-01-12 başlıklı çağrıya yapılan başvuru sonucu kabul edilen ve 101238620 numaralı hibe sözleşmesi ile desteklenen “GAMMA – Green Ammonia and Biomethanol Fuel Maritime Vessels” projesi bünyesinde gerçekleştirilmiştir.

Yüksek lisans öğrenimime katkı sağladığı ve bu proje sürecine dâhil olmama imkân tanıdığı için Elkon Elektrik San. Tic. A.Ş. firmasına teşekkür ederim. Ayrıca GAMMA Projesi'ne katkı sağlayan tüm proje ortaklarına teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR	vi
SİMGELER	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiv
ABSTRACT	xv

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Emisyon ve regülasyonlar	1
1.2. Endüstriyel standartlar.....	3
1.3. Tezin Amacı	6
1.4. GAMMA Projesi Genel Bakış	8
1.4.1. GAMMA projesi hedefleri.....	9
1.5. Literatür Araştırması	11
1.6. Tezin Kapsamı.....	14

BÖLÜM 2.

BİYO YAKIT VE YAKIT HÜCRESİ ALT SİSTEMLERİ	16
2.1. Giriş	16
2.2. Metanol ve Amonyak Yakıtlarının Özellikleri ve Denizcilikte Kullanımı	17
2.2.1. Metanol (CH_3OH)	17
2.2.1.1. Depolama ve taşıma koşulları	18
2.2.1.2. Güvenlik ve toksisite değerlendirmesi	18
2.2.1.3. Yakıt olarak avantajları ve sınırlamaları	19
2.2.2. Amonyak (NH_3)	20
2.2.2.1. Depolama ve taşıma koşulları	22
2.2.2.2. Güvenlik ve toksisite değerlendirmesi	22
2.2.3. Uluslararası kurallar ve regülasyonlar	24
2.2.3.1. Amonyak ve metanol yakıtlarının kullanım kısıtları	25

2.2.3.2. Yakıt tankı standartları ve güvenlik sistemleri.....	26
2.3. Yeşil Yakıt Besleme Sistemi.....	28
2.3.1. Amonyak parçalanması ile hidrojen eldesi	29
2.3.2. Metanol reformasyonu ile hidrojen eldesi	30
2.3.3. Hidrojen saflaştırılması	32
2.3.4. Hidrojenden elektrik üretimi.....	33
2.3.5. Enerji dönüşüm verimliliği ve entegrasyon	35

BÖLÜM 3.

ALARM, İZLEME VE KONTROL SİSTEMLERİNDE VERİ YÖNETİMİ VE MÜDAHALE SÜREÇLERİ..... 37

3.1. Giriş.....	37
3.2. Sistem Ön Koşulları ve Başlangıç Durumları	38
3.3. Arıza Türleri ve Etkileri Analizi	39
3.4. Güvenlik ve Kontrol Sistemlerinde Veri İşleme, İletim ve Eylemler	41
3.4.1. Alarm süreci, veri dönüştürme, iletim ve erişilebilirlik yönetimi.....	42
3.4.2. ESD kontrol fonksiyonu.....	45

BÖLÜM 4.

AA MİKRO ŞEBEKE SENKRONİZASYON VE KONTROL YÖNTEMLERİ..... 48

4.1. Giriş.....	48
4.1.1. Mikro şebekelerde evirici tabanlı kaynakların rolü	51
4.2. AA Şebeke Senkronizasyonunun Temelleri.....	54
4.2.1. Şebeke senkronizasyonunun tanımı	54
4.2.2. Senkronizasyon gereksinimleri (Faz, Frekans, Gerilim)	55
4.2.3. Yetersiz senkronizasyonun etkileri	56
4.3. Senkronizasyon yöntemleri	58
4.3.1. Senkronizasyon yöntemlerinin sınıflandırılması	59
4.3.2. PLL tabanlı senkronizasyon teknikleri	61
4.3.2.1. SRF-PLL (Senkron Referans Çerçevesi PLL).....	61
4.3.2.2. DDSRF-PLL (Çift Dengelenmiş Senkron Referans Çerçevesi PLL).....	63
4.3.2.3. DDSRF-PLL (Çift Dengelenmiş Senkron Referans Çerçevesi PLL).....	64
4.4. Şebeke Oluşturan (GFM) ve Şebeke Takip Eden (GFL) Eviriciler	66
4.4.1. Şebeke oluşturan evirici	67
4.4.2. Şebeke takip eden evirici (GFL)	69
4.5. Droop Kontrol ve Paralel GFMI Senkronizasyonu.....	72
4.5.1. Droop kontrolü.....	72
4.5.1.1. Droop Eğrileri	74
4.5.1.2. Droop kontrolünün uygulanması.....	76
4.5.2. Şebeke oluşturan eviricilerin paralel çalışması	77
4.5.2.1. GFM eviricilerin ön senkronizasyonu.....	78
4.5.2.2. Droop kontrolcülerinde güç paylaşımı	82

BÖLÜM 5.

ENERJİ YÖNETİM VE GÜÇ YÖNETİM SİSTEMİNİN KONTROL

STRATEJİSİ	85
5.1. EMS ve PMS Fonksiyonel Yapısı.....	85
5.2. Alt Sistemlerin Entegrasyonunda EMS ve PMS Arayüzleri.....	89
5.3. EMS Kontrol Stratejisi ve Operasyon Modları	91
5.3.1. Sıfır emisyon modu.....	95
5.3.2. Hibrit mod	99
5.3.3. Dizel jeneratör modu (DGM).....	102
5.3.4. Mod geçişleri, operasyon senaryoları ve EMS/PMS koordinasyonu	104

BÖLÜM 6.

YENİ OPERASYON PROFİLİ VE ÇALIŞMA MODLARI..... 108

6.1. Giriş.....	108
6.2. Kuru Yük Gemisine Ait Genel Bilgilendirme ve Sistem Tanımı	108
6.3. Yeni Operasyon Profili.....	111
6.3.1. Enerji tüketimi.....	113
6.3.2. Operasyon alt sistem kriterleri	114
6.4. Yeni Operasyon Yük Dengesi.....	117
6.4.1. Kuru yük gemisi operasyon senaryoları.....	121
6.4.1.1. Demirleme operasyonu	121
6.4.1.2. BWTS ve kargo operasyonları	122
6.4.1.3. Limandan ayrılma ve limana varma operasyonları.....	124
6.4.1.4. Normal seyir operasyonu	125

BÖLÜM 7.

ANALİZ VE SİMÜLASYON SONUÇLARI

7.1. Giriş.....	126
7.2. Üç faz GFM/GFL Evirici modeli tasarımı	128
7.2.1. Üç fazlı sistemlerde evirici LCL filtre tasarımı	129
7.3. Alt Sistem Modelleri	132
7.3.1. Yakıt hücresi sistem modeli.....	132
7.3.2. Batarya sistem modeli.....	136
7.3.3. PV sistem modeli	140
7.3.4. Jeneratör sistem modeli.....	144
7.4. Sistemler Arasında Güç Paylaşımı Simülasyonu	146
7.4.1. Batarya ve yakıt hücresi sistemi güç paylaşımı	147
7.4.2. Batarya, yakıt hücresi ve dizel jeneratör sistemi yük paylaşımı	150
7.5. Hibrit Sistem EMS Modeli.....	152
7.6. Operasyon Profilleri Simülasyonu	155
7.6.1. Demirleme operasyonu	157
7.6.2. BWTS sistemi olmadan kargo operasyonu	158
7.6.3. BWTS sistemi ile kargo operasyonu.....	160
7.6.4. Limandan ayrılma ve limana varma operasyonları.....	162
7.6.5. Normal seyir operasyonu	164

BÖLÜM 8.	
SONUÇLAR	167
8.1. Sonuçlar.....	167
8.2. Öneriler.....	171

KAYNAKLAR	174
------------------------	------------

EKLER.....	183
-------------------	------------



KISALTMALAR

AA	: Alternatif akım
AB	: Avrupa Birliği
ABS	: Amerikan Gemi Sınıflandırma Bürosu
ACK	: Onay
AGF	: Akım Kaynaklı evirici
AMCS	: Alarm İzleme ve Kontrol Sistemi
APC	: Aktif güç kontrolü
BMS	: Batarya Yönetim Sistemi
BWTS	: Balast suyu arıtma sistemi
CESS	: Konteyner Tipi Enerji Depolama Sistemleri
DA	: Doğru Akım
DCS	: Dağıtılmış Kontrol Sistemi
DDSRF	: Çift Dengelenmiş Senkron Referans Çerçevesi
DG	: Dizel jeneratör
DGA	: Darbe Genişlik Ayarı
DNV	: Norveç Doğrulama Kuruluşu
DPU	: Veri İşleme Birimi
DTU	: Veritabanı İşlem Birimi
ECA	: Emisyon Kontrol Alanları
EMC	: Elektromanyetik uyumluluk
EMS	: Enerji Yönetim Sistemi
EP	: Beklenen Performans
ESD	: Acil Durum Durdurma
ESS	: Enerji Depolama Sistemleri
FC	: Yakıt Hücresi
FCMS	: Yakıt Hücresi Yönetim Sistemi
FDS	: Fonksiyonel Tasarım Şartnamesi

FEC	: Tam Eşdeğer Döngü Sayısı
FLL	: Frekans kilitlemeli döngü
FMEA	: Hata Türleri ve Etkileri Analizi
FR	: Fonksiyonel Gereksinim
GFL	: Şebeke takip eden
GFM	: Şebeke oluşturan
GHG	: Sera gazı
HAZID	: Tehlike Belirleme
HFO	: Ağır Deniz Yakıtı
HMI:	: İnsan-Makine Arayüzü
HSE	: İş Sağlığı, Güvenliği ve Çevre
HVAC	: Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme Sistemleri
HW	: Donanımsal Kablolama
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IGC	: Uluslararası Genel Sertifikası
IMO	: Uluslararası Denizcilik Örgütü
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü
LCA	: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
LCCA	: Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi
LDLH	: Sağlık İçin Anında Tehlikeli Seviye
LDU	: Yerel Gösterge Birimi
LNG	: Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
LPF	: Alçak geçiren filtre
LR	: Lloyd'un Klaslama Kurumu
LSMGO	: Düşük Kükürtlü Denizcilik Gaz Yağı
MFD	: Çok İşlevli Gösterge
MGO	: Denizcilik Gaz Yağı
MPC	: Model Öngörülü Kontrol
MPP	: Maksimum Güç Noktası
NMA	: Norveç Denizcilik Otoritesi
PCC	: Ortak bağlantı noktasındaki
PEL	: İzin Verilen Maruz Kalma Sınırı
PEM	: Proton Değişim Membranlı
PEMFS	: Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi

PFSL	: Güç-Frekans Senkronizasyon Döngüsü
PLC	: Programlanabilir Mantık Denetleyicisi
PLL	: Faz Kilitleme Döngüsü
PMS	: Güç Yönetim Sistemi
POE	: Ethernet Üzerinden Güç İletimi
PSA	: Basınç Salınımlı Adsorpsiyon
PV	: Fotovoltaik
PWM	: Darbe Genişliği Modülasyonu
RCO	: Risk Kontrol Seçenekleri
RoCoF	: Frekans Değişim Hızı
RPC	: Reaktif güç kontrolü
SCADA	: Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemi
SoC	: Şarj Durumu
SOLAS	: Denizde Can Güvenliği Uluslararası Sözleşmesi
SRF	: Senkron Referans Çerçevesi
THD	: Toplam Harmonik Bozunum
TQP	: Teknoloji Yeterlilik Süreci
UPS	: Kesintisiz Güç Kaynağı
VAC	: Havalandırma ve İklimlendirme
VLSFO	: Çok Düşük Kükürtlü Fuel Oil
VOC	: Uçucu Organik Bileşikler
VSL	: Gerilim Senkronizasyon Döngüsü
XLPE	: Çapraz Bağlı Polietilen

SİMGELER

C	: Filtre kapasitansı (F)
CH_3OH	: Metanol
CO	: Karbonmonoksit
d, q	: dq eksen bileşenleri
f	: Frekans (Hz)
H_2	: Hidrojen gazı
I_o	: Çıkış akımı (A)
k_i	: İntegratör kazancı
k_{inv}	: Evirici kazancı
k_p	: Oransal kazanç
k_r	: Rezonatör kazancı
L	: Endüktans (H)
m	: DGA modülasyon katsayısı
m_p, m_Q	: Droop modülasyon katsayıları
NH_3	: Amonyak
P	: Aktif güç (W)
P_u	: birim değer
Q	: Reaktif Güç (VAr)
R_s	: Stator direnci
T_D	: Zaman gecikmesi (s)
t_d	: Zaman sabiti
t_s	: Yerleşme Zamanı (s)
V_{AA}	: AA bara gerilimi (V)
V_{DA}	: DA bara gerilim (V)
V_{dq}	: dq eksenlerde gerilim (V)
V_o	: Çıkış gerilim (V)
w	: Açısal hız
W_e	: elektriksel güç

W_p	: tepe güç
X	: Reaktans (ohm)
X_C	: Kapasitif reaktans (ohm)
X_L	: Endüktif reaktans (ohm)
Z	: Empedans (ohm)
α, β	: $\alpha\beta$ durağan eksen bileşenleri
δ	: Güç açısı (derece)
ζ	: Sönüm katsayısı
θ	: Elektriksel faz açısı (derece)
τ	: Zaman sabiti (s)
Φ	: Empedans açısı (derece)
ϕ	: Faz açısı (derece)
ω	: Açısal frekans (rad/s)

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1: Entüstriyel Standartlar	5
Tablo 3.1: ESD durumları	47
Tablo 6.1: Geminin mevcut yük analizi	110
Tablo 6.2: Yeni sistem yük analizi	113
Tablo 6.3: Amonyak parçalama ve metanol reformasyon sistemlerinin teknik özellikleri	115
Tablo 6.4: PSA saflaştırma ünitesinin teknik özellikleri	115
Tablo 6.5: Yakıt hücresi sisteminin teknik özellikleri	116
Tablo 6.6: Güneş paneli teknik özellikleri	116
Tablo 6.7: Batarya sisteminin teknik özellikleri	117
Tablo 6.8: Geminin yeni operasyon yük analizi	118
Tablo 7.1: Yakıt hücresi sistemi parametreleri	134
Tablo 7.2: Batarya sistemi parametreleri	138
Tablo 7.3: PV sistemi parametreleri	142
Tablo 7.4: Dizel jeneratör parametreleri	144

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1: Entegre hibrit enerji sistemini gösteren sadeleştirilmiş blok diyagram.....	6
Şekil 1.2: GAMMA projesi logo.....	8
Şekil 2.1: Yeşil Yakıtlardan Gemi Şebekesine Entegre Hibrit Enerji Akış Diyagramı	16
Şekil 2.2: Metanol faz diyagramı	17
Şekil 2.3: Amonyak faz diyagramı	21
Şekil 2.4: Amonyak parçalanmasına dayalı hidrojen üretim prensibi	29
Şekil 2.5: Metanol reformasyonuna dayalı hidrojen üretim prensibi.....	31
Şekil 2.6: Proton değişim membranlı yakıt hücresi (PEMFC) yapısı.....	34
Şekil 3.1: Alarm akış diyagramı	43
Şekil 3.2: Güvenlik ve kontrol sistemi veri akış diyagramı	44
Şekil 3.3: ESD mantık diyagramı	45
Şekil 4.1: AA şebeke tek hat şeması	49
Şekil 4.2: DA kaynaklı sistemlerin kontrolcü yapısı	52
Şekil 4.3: Konvansiyonel şebeke senkronizasyon yöntemlerinin sınıflandırması	59
Şekil 4.4: SRF-PLL üzerine yapılan iyileştirmeler	60
Şekil 4.5: SRF-PLL temel prensibi	61
Şekil 4.6: GFM tipi evirici yapısı.....	66
Şekil 4.7: GFL tipi evirici yapısı.....	66
Şekil 4.8: GFM evirici kontrol yapısı	67
Şekil 4.9: Sistemin dinamik modeli	68
Şekil 4.10: DQ ekseninde gerilim kontrolüne ait şematik yapı	68
Şekil 4.11: GFL evirici kontrol yapısı	70
Şekil 4.12: Droop kontrol yapısının genel görünümü.....	73
Şekil 4.13: İletim hattının genel tek fazlı eşdeğer devresi	73
Şekil 4.14: Frekans ve gerilim droop karakteristikleri.....	75
Şekil 4.15: APC genel yapısı	76
Şekil 4.16: RFC genel yapısı.....	77
Şekil 4.17: Yük altında paralel çalışan GFM eviricileri	79
Şekil 4.18: Genlik senkronizasyonu kontrol yapısı.....	80
Şekil 4.19: Frekans ön senkronizasyonu kontrol yapısı.....	81
Şekil 4.20: Faz ön senkronizasyonu kontrol yapısı.....	82
Şekil 4.21: Frekans ve faz ön senkronizasyonunun genel yapısı	82
Şekil 4.22: Paralel operasyon grafiği	83
Şekil 5.1: EMS/PMS arayüzleri	86
Şekil 5.2: EMS ve PMS genel fonksiyonel yapı blok diyagramı.....	88
Şekil 5.3: EMS ve PMS Entegrasyonuna Alt Sistem Arayüzleri	90
Şekil 5.4: Sistemin EMS G/Ç blok diyagramı	92
Şekil 5.5: Operasyon modu akış diyagramı	94

Şekil 5.6: Sıfır emisyon modu.....	95
Şekil 5.7: Hibrit çalışma modu	99
Şekil 5.8: Dizel jeneratör modu	102
Şekil 5.9: Sıfır emisyon mod geçişleri, operasyon senaryosu.....	106
Şekil 6.1: Gemi operasyonları yük analizi	111
Şekil 6.2: Normal seyir gemi güç profili.....	113
Şekil 6.3: Bir günlük planlanan operasyon senaryosu	114
Şekil 6.4: Yeni operasyon yük dengesi	120
Şekil 6.5: Demirleme operasyonu tek hat gösterimi	122
Şekil 6.6: Kargo ve BWTS operasyonu tek hat gösterimi	123
Şekil 6.7: Limana Varış/Ayrılma operasyonu tek hat gösterimi.....	124
Şekil 6.8: Normal seyir operasyonu tek hat gösterimi	125
Şekil 7.1: Tüm sistem MATLAB®/Simulink modeli.....	127
Şekil 7.2: PV evirici kontrol yapısı	128
Şekil 7.3: FC ve BAT evirici kontrol yapısı	129
Şekil 7.4: LCL filtre modeli	129
Şekil 7.5: Yakıt hücresi sistemi MATLAB®/Simulink modeli.....	133
Şekil 7.6: Yakıt hücresi V/I karakteristiği.....	134
Şekil 7.7: Yakıt hücresi DA/DA çıkış simülasyon sonucu	135
Şekil 7.8: Yakıt hücresi sistemi simülasyon sonucu	135
Şekil 7.9: Batarya sistemi deşarj karakteristiği	136
Şekil 7.10: Batarya sistemi MATLAB®/Simulink modeli.....	137
Şekil 7.11: Batarya sistemi simülasyon sonucu	139
Şekil 7.12: Batarya sistesi SoC simülasyon sonucu.....	139
Şekil 7.13: PV modeli ışınım karakteristik grafiği.....	140
Şekil 7.14: PV sistemi MATLAB®/Simulink modeli	141
Şekil 7.15: PV sistem simülasyon sonucu	143
Şekil 7.16: PV ışınım referans modeli	143
Şekil 7.17: Dizel jeneratör Matlab/Simulink modeli	145
Şekil 7.18: Dizel jeneratör güç simülasyon sonucu	146
Şekil 7.19: Batarya ve yakıt hücresi paralel çalışma modeli	148
Şekil 7.20: Batarya ve yakıt hücresi arasında güç paylaşımı simülasyon sonucu ...	149
Şekil 7.21: Batarya ve yakıt hücresi güç paylaşımı frekans değişimi simülasyon sonucu	149
Şekil 7.22: Batarya ve yakıt hücresi ve dizel jeneratör paralel çalışma modeli.....	151
Şekil 7.23: Dizel jeneratör, batarya ve yakıt hücresi arasında güç paylaşımı simülasyon sonucu	152
Şekil 7.24: Hibrit sistem EMS modeli	153
Şekil 7.25: E-yakıt sistemi ve gemi yük profili modeli	156
Şekil 7.26: Demirleme operasyonu simülasyon sonucu	157
Şekil 7.27: BWTS sistemi olmadan kargo operasyonu simülasyon sonucu	159
Şekil 7.28: BWTS ile kargo operasyonu simülasyon sonucu	161
Şekil 7.29: Limandan ayrılma/varma operasyonu simülasyon sonucu.....	163
Şekil 7.30: Normal seyir operasyonu başlangıç simülasyon sonucu	164
Şekil 7.31: Normal seyir operasyonu simülasyon sonucu	165

YENİLENEBİLİR ENERJİ VE BİYO YAKIT TABANLI YAKIT HÜCRESİ SİSTEMLERİ İLE GEMİLERDE HOTEL YÜKLERİ İÇİN ENERJİ VE GÜÇ YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

ÖZET

Tez çalışmasının amacı, gemilerdeki hotel yüklerinin enerji ihtiyacını karşılamak üzere yakıt hücreleri, batarya sistemleri ve güneş panellerinden oluşan hibrit bir enerji ve güç yönetim yapısının tasarlanması, kontrol algoritmalarının geliştirilmesi ve oluşturulan yapının gemi mikroşebekesiyle senkron çalışabilirliğinin değerlendirilmesidir. Bu kapsamda, fosil yakıtla çalışan geleneksel gemi altyapısının, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenen bir sistem mimarisiyle retrofit edilmesi ve emisyon azaltımına katkı sağlanması amaçlanmıştır. Geliştirilen sistemde, metanol reformasyonu ve amonyak parçalanmasıyla elde edilen hidrojen saflaştırılarak yakıt hücrelerine aktarılmış ve burada elektrik enerjisine dönüştürülmüştür. Bu enerji, batarya sistemleri ve PV panellerle birlikte kullanılarak gemi üzerindeki hotel yükleri beslenmiştir. Enerji yönetimi, EMS ve PMS yapısıyla entegre biçimde gerçekleştirilmiş; üretim-tüketim-depolama dengesi gözetilerek sistemin kararlılığı sağlanmıştır. MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan dijital ikiz modeli ile senaryo bazlı simülasyon çalışmaları yürütülmüştür. Farklı enerji kaynaklarının görev dağılımları, senkronizasyon yöntemleri ve geçiş stratejileri test edilmiştir. Batarya sistemi grid-forming modda şebeke referansını sağlamış; yakıt hücresi sabit güçle yük taşımış; PV üretimi ise batarya şarjını desteklemiştir. Jeneratörlerin devreden çıkarıldığı, bataryaların geçici yük dengeleme görevini üstlendiği ve yakıt hücrelerinin ana yük taşıyıcısı olduğu senaryolar başarıyla yürütülmüştür. EMS yazılımı, SoC, PV üretimi ve yük talebi gibi değişkenleri izleyerek kaynakları kontrollü şekilde devreye almış; GFM-GFL geçişlerinde kararsızlık oluşmadan yük paylaşımı sağlanmıştır. Simülasyon çıktıları, sistemin çevresel regülasyonlara uyumlu ve sürdürülebilir şekilde çalıştığını göstermiştir. Çalışmada enerji altyapısının yanı sıra güvenlik ve izleme mekanizmaları da değerlendirilmiştir. Metanol ve amonyak gibi e-yakıtların entegrasyonu için sıcaklık, basınç, gaz sızıntısı, SoC ve hücre sıcaklığı gibi parametreler izlenmiş; anomalilerde otomatik koruma mekanizmaları devreye alınmıştır. ESD sistemi, başlatma ön koşulları, kapatma prosedürleri ve yeniden başlatma stratejileri mantıksal kontrol diyagramlarıyla modellenmiş; güvenliği tehdit eden durumlara karşı test edilmiştir.

Sonuç olarak, fosil yakıt bağımlılığını azaltan, yenilenebilir kaynak entegrasyonunu sağlayan ve operasyonel güvenliği gözetilen entegr e bir komuta-kontrol yapısı geliştirilmiştir. Geliştirilen hibrit sistem, sıfır emisyonu yakın koşullar sağlayarak çevreci gemi dönüşümünde uygulanabilir bir model sunmuş; farklı gemi tiplerine uyarlanabilirliği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit Enerji Sistemleri, Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu, Denizcilikte Sürdürülebilirlik, Alternatif Yakıtlar, EMS, PMS

ENERGY AND POWER MANAGEMENT SYSTEM DESIGN FOR HOTEL LOADS ON SHIPS USING RENEWABLE ENERGY AND BIOFUEL-BASED FUEL CELL SYSTEMS

ABSTRACT

The objective of this thesis is to design a hybrid energy and power management system composed of fuel cells, battery storage systems, and photovoltaic panels to supply the hotel load demand on ships. It also aims to develop control algorithms and evaluate the synchronization capability of the designed structure with the ship's microgrid. Within this scope, the study focuses on retrofitting conventional ship infrastructure that operates on fossil fuels with a system architecture supported by renewable energy sources, thereby contributing to emission reduction targets.

In the proposed system, hydrogen is produced through methanol reforming and ammonia cracking, then purified and transferred to fuel cells where it is converted into electrical energy. This energy is used in conjunction with battery storage systems and PV panels to supply the onboard hotel loads. Energy management is carried out through an integrated EMS and PMS structure, ensuring system stability by maintaining the balance between generation, consumption, and storage.

Scenario-based simulations were conducted using a digital twin model developed in MATLAB/Simulink. These simulations tested the role allocation of different energy sources, synchronization methods, and transition strategies. The battery system operated in grid-forming mode to provide the reference voltage and frequency; the fuel cell supplied steady power; and the PV system supported battery charging based on load demand. Scenarios where generators were gradually disconnected, batteries took over temporary load balancing, and fuel cells acted as the main power source were successfully implemented. The EMS software dynamically monitored parameters such as SoC, PV output, and load demand, and activated energy sources in a controlled manner. Load sharing was achieved smoothly without instability during GFM-GFL transitions. Simulation results demonstrated that the system could operate sustainably and in compliance with environmental regulations.

In addition to the energy infrastructure, system safety and monitoring mechanisms were also evaluated. For the integration of e-fuels such as methanol and ammonia, critical parameters such as temperature, pressure, gas leakage, SoC, and cell temperature were monitored in real-time, and automatic protection mechanisms were configured to respond to anomalies. The ESD system was modeled based on logical control diagrams, covering startup conditions, safe shutdown procedures, and restart strategies, and tested against potential risk scenarios.

As a result, an integrated command and control structure has been developed that reduces fossil fuel dependency, ensures renewable integration, and enhances operational safety. The proposed hybrid system demonstrates a viable model for green ship retrofiting by achieving near-zero emission conditions, and its adaptability to different vessel types has been evaluated.

Keywords: Hybrid Energy Systems, Renewable Integration, Maritime Sustainability, Alternative Fuels, EMS, PMS



BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Emisyon ve regülasyonlar

Günümüzde küresel ticaretin %90'ından fazlası deniz yolu ile gerçekleştirilmektedir ve bu durum deniz taşımacılığını küresel ekonominin bel kemiği haline getirmiştir. Ancak bu sektör, kullanılan konvansiyonel enerji kaynakları nedeniyle önemli çevresel sorunlara yol açmaktadır. Deniz taşıtlarında yaygın olarak kullanılan ağır deniz yakıtı (HFO), denizcilik dizel yakıtı (MDO) ve denizcilik gaz yağı (MGO) gibi fosil yakıtlar, yüksek oranda sülfür (%1–5), aromatik bileşikler, ağır metaller ve karbon artıklarını içermektedir. Bu yakıtların yanması sonucunda atmosfere salınan karbon dioksit (CO₂), kükürt oksitler (SO_x), azot oksitler (NO_x), uçucu organik bileşikler (VOC), partikül madde (PM) ve siyah duman gibi zararlı emisyonlar, küresel ısınmaya katkı sağlamakta, asit yağmurlarına ve solunum yolları hastalıklarına neden olmaktadır [1,2].

Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), bu çevresel tehditleri azaltmak amacıyla 1997 yılında MARPOL 73/78 sözleşmesine Annex VI'yı ekleyerek deniz taşımacılığında kaynaklanan hava kirliliğini sınırlandırmaya yönelik hukuki bir çerçeve oluşturmuştur. Annex VI, deniz taşıtlarının kullandığı yakıtlardaki sülfür oranını kademeli olarak azaltmış; Emisyon Kontrol Alanları'nda (ECA) faaliyet gösteren gemiler için bu oranı 1 Ocak 2015 itibarıyla %0.1 seviyesine çekmiştir. Küresel düzeyde ise 2020 yılı itibarıyla sülfür üst sınırı %0.5 olarak belirlenmiştir [3,4].

Bu regülasyonların en belirgin etkisi, özellikle Avrupa kıyılarında faaliyet gösteren kısa mesafe deniz taşımacılığı hatlarında görülmektedir. Kuzey Denizi, Baltık Denizi ve İngiliz Kanalı gibi yoğun ECA bölgelerinde, düşük sülfürlü distilat yakıtların kullanımı zorunlu hale gelmiş; bu durum taşımacılık maliyetlerini önemli ölçüde artırmıştır. HFO yerine düşük kükürtlü denizcilik motorini (LSMGO) kullanımı, yakıt giderlerinde %30 ila %50 arasında bir artışa neden olmuş ve bu durum kısa mesafe deniz taşımacılığı ile kara taşımacılığı arasında bir modal kayma riskini gündeme getirmiştir [5,6].

Özellikle Norveç kıyılarında, UNESCO tarafından Dünya Mirası ilan edilen fiyort bölgeleri (Geiranger, Aurlandsfjord ve Nærøyfjord) özel koruma altına alınmış ve bu alanlara giren gemilere sıkı emisyon standartları getirilmiştir. Norveç Denizcilik Otoritesi (NMA) tarafından hazırlanan kapsamlı raporlarda, NO_x seviyelerinin bazı dönemlerde sağlık eşiğini aştığı, siyah duman oluşumunun ise meteorolojik koşullar ve eski makineler nedeniyle ciddi boyutlara ulaştığı belirtilmiştir. Bu bağlamda, düşük sülfürlü yakıt kullanımı, NO_x azaltım sistemlerinin kurulması, görünür duman sınırlandırmaları, hız kısıtlamaları, gri su ve scrubber suyunun tahliyesine yasaklar gibi çok boyutlu önlemler önerilmiştir [7].

Benzer şekilde, Asya-Pasifik bölgesinde yer alan Tayvan gibi denizcilik açısından stratejik ülkelerde de MARPOL 73/78/97 regülasyonlarına uyum sağlamak adına liman otoriteleri tarafından gemilere yönelik egzoz denetimleri artırılmış, sertifika denetimleri zorunlu hale getirilmiş ve liman çevresine hava kalitesi izleme sistemleri yerleştirilmiştir [8].

Tüm bu çevresel baskılar ve regülasyonlar, fosil yakıtlara dayalı konvasiyonel tahrik sistemlerinin sürdürülebilir olmadığını açıkça ortaya koymaktadır. Bu noktada, hibrit sistemler ve sıfır emisyon teknolojileri, çevresel regülasyonlara uyum sağlayabilen sürdürülebilir çözümler olarak öne çıkmaktadır. Özellikle hidrojen bazlı yakıt hücreleri, batarya depolama sistemleri (BESS) ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynakların gemi tahrik sistemlerine entegrasyonu, hem lokal hava kalitesini artırmakta hem de global sera gazı salımını azaltmaktadır [9].

Yakıt hücreleri, hidrojenin elektrokimyasal reaksiyonuyla elektrik üretirken sadece su buharı salınımı yapar; bu da sistemin NO_x ve SO_x emisyonlarını tamamen ortadan kaldırdığı anlamına gelir. Ayrıca batarya sistemleriyle birlikte kullanıldığında, kıyı bölgelerinde ve hassas ekosistemlerde gemilerin sessiz ve sıfır emisyonlu şekilde çalışması mümkün hale gelir. Bu sistemler; MARPOL regülasyonlarına uyum sağlamanın ötesinde, gelecek nesil gemicilik stratejilerinin temelini oluşturmaktadır.

Literatürde gösterilen açıklardan hareketle bu tez çalışması kapsamında; değerlendirilen hibrit enerji yönetimi mimarileri, hem teknik hem de ekonomik açıdan uygulanabilir çözümler sunmakta, fosil yakıt bağımlılığını azaltmakta ve artan çevresel regülasyonlara hazırlıklı olunmasını mümkün kılmaktadır. Ayrıca gemi işletmecilerine uzun vadede

yakıt maliyetlerini düşürme ve karbon ayak izini azaltma imkânı sunarak rekabet avantajı kazandırmaktadır.

Denizcilik sektöründe sürdürülebilirliğe ulaşmanın yolu, emisyon azaltımını hedefleyen regülasyonlarla uyumlu, hibrit ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin teşvik edilmesinden geçmektedir. Bu bağlamda, hem uluslararası regülasyonların sıkılaştırılması hem de alternatif enerji sistemlerinin yaygınlaştırılması, gelecek nesil deniz taşımacılığının çevreyle dost ve ekonomik olarak sürdürülebilir olmasını sağlayacaktır.

1.2. Endüstriyel standartlar

Denizcilik sektöründe gemi sistemlerinin güvenli ve verimli şekilde işletilebilmesini sağlamak amacıyla bir dizi uluslararası endüstri standardı uygulanmaktadır. Bu standartlar, gemi tasarımı, yapımı ve işletimiyle ilgili pek çok teknik konuyu kapsamaktadır. Özellikle elektriksel kurulumlar, tehlikeli bölgeler, yakıt hücresi teknolojileri, hidrojen sistemleri ve batarya sistemleri gibi alt alanlarda detaylı güvenlik ve performans kriterleri belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında ele alınan hibrit enerji üretim yapısında yer alan yakıt sistemi, hidrojen saflaştırma üniteleri, yakıt hücreleri, batarya sistemleri, güneş panelleri ve evirici sistemleri gibi bileşenlerin her biri, uluslararası normlara uygunluk gözetilerek yapılandırılmıştır.

Özellikle yakıt sisteminde, amonyak ve metanol gibi alternatif yakıtların hidrojen üretimi amacıyla kullanıldığı reformasyon ve parçalama sistemleri için ISO 16110-1 standardı çerçevesinde güvenlik gereksinimleri dikkate alınmıştır. Bu sistemlerin içerdiği risklerin azaltılması amacıyla, ISO/TR 15916 tarafından belirlenen temel güvenlik ilkeleri doğrultusunda ekipman seçimi ve sistem yerleşimi yapılmıştır. Hidrojenin işlendiği ve depolandığı alanlarda, patlayıcı gaz ortamı oluşma olasılığına bağlı olarak IEC 60079-10-1 standardına göre tehlikeli bölge sınıflandırması yapılmış ve sistemde kullanılan tüm elektrikli ekipmanlar bu bölgelere uygun olarak belirlenmiştir. Bu ortamlardaki periyodik bakım ve denetimler için ise IEC 60079-17 standardı esas alınmıştır.

Yakıt hücresi sistemlerinin, hem performans hem de güvenlik açısından IEC 62282 standardına uygunluğu sağlanmıştır. Bu standardın getirdiği güvenlik önlemleri, özellikle hidrojen temelli sistemlerde kaçak tespiti, sıcaklık kontrolü ve sistemin olağan dışı durumlara tepkisini kapsayan kontrol stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Batarya enerji depolama sistemleri için, denizcilik uygulamalarında kullanılan lityum-iyon bataryaların hem güvenlik hem de performans gereksinimlerinin karşılanabilmesi amacıyla IEC 62619 ve IEC 62620 standartlarına uygunluk dikkate alınmıştır. Bu kapsamda batarya sistemlerinin şarj/deşarj profilleri, sıcaklık limitleri ve hücre dengeleme gibi işlemleri güvenli şekilde sürdürebilmesi sağlanmıştır.

Tez çalışmasında ayrıca enerji üretim bileşenlerinden elde edilen gücün şebekeye aktarımı, senkronizasyon ve dağıtım süreçleri üzerinde de durulmuştur. Şebeke eviricileri, özellikle güneş paneli, yakıt hücresi ve batarya gibi çoklu enerji kaynaklarının yer aldığı hibrit mikroşebeke ortamlarında kullanılmaktadır. Bu sistemlerde kullanılan eviricilerin, gerilim, frekans, toplam harmonik bozunum (THD) ve elektromanyetik uyumluluk (EMC) değerlerinin uluslararası standartlara uygun olması gerekmektedir. Bu bağlamda; IEC 60092-101, IEEE Std. 1547-2003, IEEE Std. 1547.4, IEEE Std. 1547-2018, IEEE Std. 45, EN/IEC 61800-3:2018, EN 50160:2010, Lloyd's Register, STANAG 1008 ve American Bureau of Shipping (ABS) gibi kuruluşların belirlediği kriterler dikkate alınmıştır.

Bu standartlar, şebeke eviricilerinin paralel çalışabilme, senkronizasyon hassasiyetleri, aktif ve reaktif güç paylaşımı, kısa devre senaryolarındaki kararlı davranış ve sistemin kesintisiz çalışabilme kapasitesi gibi özelliklerinin değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Tez kapsamında gözetilen uluslararası teknik standartlar, Tablo 1.1'de özetlenmiştir. Bu bağlamda eviricilerin kontrol algoritmaları, senkronizasyon mantıkları ve koruma yapılarına yönelik yapılan tüm tasarım ve simülasyon çalışmaları, bu standartlara uygun şekilde değerlendirilmiştir.

Bu çerçevede yürütülen çalışma, yalnızca teorik düzeyde sistem tasarımı ile sınırlı kalmamış; aynı zamanda uluslararası denizcilik ve endüstriyel regülasyonlar ile uyumluluğu hedefleyen kapsamlı bir mühendislik yaklaşımına dayanmaktadır. Bu sayede geliştirilen sistemin gerçek uygulamalara adapte edilmesi ve sınıflandırma kuruluşları tarafından onaylanabilir bir yapıya kavuşması sağlanmaktadır.

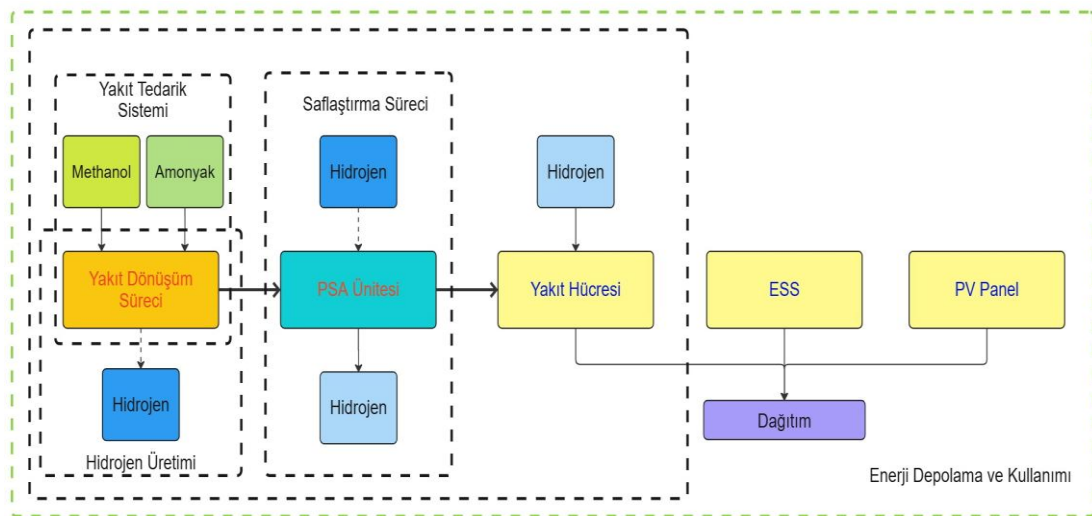
Tablo 1.1: Tezde gözetilen endüstriyel standartlar.

Standart	Kodu	Standart başlığı
Fuel and Hydrogen Systems	ISO 16110-1:2007	Hydrogen generators using fuel processing technologies “ Part 1: Safety
	ISO/TR 15916	Basic considerations for the safety of hydrogen systems
	IEC 60079-10-1:2008	Explosive atmospheres “Part 10-1: Classification of areas “Explosive gas atmospheres
	IEC 60079-17:2007	Explosive atmospheres “Part 17: Electrical installations inspection and maintenance
	IEC 62282	Fuel cell Technologies “Safety, performance, environmental impact”
Battery Systems	IEC 62619	Secondary cells and batteries “Safety requirements for industrial lithium systems
	IEC 62620	Secondary lithium cells and batteries “Performance and life testing for industrial applications
Electrical Installations and Ship Systems	IEC 60092-101	Electrical installations in ships “General requirements
	IEC 61363-1	Electrical installations in ships “Short-circuit current calculations”
	IEC 60076	Power transformers “General requirements
Switchgear and Inverters	IEC 60947	Low-voltage switchgear and controlgear
	IEC 60439	Low-voltage switchgear and controlgear assemblies “General requirements
	IEC 60898	Circuit breakers for overcurrent protection
	UL 1741-1999	"Standard for Inverters, Converters, and Controllers for Use in Independent Power Systems"
	IEEE 519-1992	Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems
Power Quality (IEEE)	IEEE 493-2007	Recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems
	IEEE 1100-1999	Recommended practice for powering and grounding sensitive electronic equipment
	IEEE 1250-1995	Guide for service to equipment sensitive to momentary voltage disturbances
	IEEE 1346-1998	Recommended practice for evaluating power system compatibility with electronics process equipment
	IEEE 1453-2004	Recommended Practice for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems
Grid Connection and Islanding	IEEE 929-2000	IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems
	IEEE 1547-2003	Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems”

1.3. Tezin Amacı

Bu tez çalışması, gemilerdeki hotel yüklerinin enerji ihtiyacını karşılamak üzere yakıt hücreleri, batarya enerji depolama sistemleri ve güneş panellerinden oluşan hibrit bir enerji ve güç yönetim yapısının tasarımı, kontrol algoritmalarının geliştirilmesi ve tasarlanan sistemin gemi mikroşebekesi ile senkron çalışabilirliğinin incelenmesidir. Bu doğrultuda, fosil yakıtlarla çalışan konvansiyonel gemi altyapısının, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenen bir sistem mimarisine dönüştürülmesi hedeflenmiştir.

Elkon Elektrik firmasının dahil olduğu Avrupa Birliği destekli GAMMA projesi, bu tez çalışmasının konusu olarak Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi İş Deneyimli Yüksek Lisans Programı kapsamında ele alınmıştır. Tez çalışmasının temel amacı, fosil yakıt kullanımını azaltmak, sera gazı emisyonlarını en aza indirmek ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin gemi sistemlerine uygulanabilirliğini artırmaktır. Bu hedef doğrultusunda sistem; biyoyakıtlar (biyometanol ve amonyak) ile beslenen metanol reformasyonu, amonyak parçalama, PSA saflaştırıcıları, fotovoltaiik paneller ve batarya gruplarını entegre bir yapı içinde değerlendirmektedir. Sistemin genel yapısı ve enerji dönüşüm sürecindeki anahtar bileşenler, Şekil 1.1’de sadeleştirilmiş bir blok diyagram olarak sunulmuştur. Bu görselde tüm sistemin işleyişine dair temel akış; yakıt dönüşümünden hidrojen saflaştırmaya, yakıt hücresiyle elektrik üretimine ve enerjinin bataryalar ile güneş panelleri üzerinden kullanımına kadar olan süreçler basit bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Entegre hibrit enerji sistemini gösteren sadeleştirilmiş blok diyagram.

Tez çalışmasının temel analiz bölümü, hibrit enerji sisteminin MATLAB®/Simulink ortamında modellenmesi ve simülasyonu üzerine kurulmuştur. Bu kısımda batarya-yakıt hücresi-güneş paneli-dizel jeneratör bileşenlerinin farklı konfigürasyonlarda bir araya getirildiği, yük profiline göre dinamik enerji dengesi analizlerinin yapıldığı sistem tasarımı yer almaktadır. Bu analizlerde, yakıt hücresi bozulması, hidrojen tüketimi, batarya çevrim ömrü gibi parametreler göz önünde bulundurularak, enerji sisteminin uzun vadeli performansı ve verimliliği değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte, bu enerji sistemlerinin gemi üzerindeki entegrasyonu sırasında güvenlik büyük önem taşımaktadır. Tez çalışmasında yalnızca kontrol sistemleri ve enerji yönetimi değil, aynı zamanda sistemin güvenli işletimi için gerekli altyapılar da değerlendirilmiştir. Özellikle gaz sızıntısı, sıvı dökülmesi, yangın riski gibi olası senaryolar için bir neden-sonuç matrisi oluşturulmuş; bu matris ile EMS-PMS sisteminin arıza senaryolarına nasıl tepki vereceği belirlenmiştir. Gaz dedektörleri, yangın algılama sistemleri, ESD işlevleri, alarm ağları ve havalandırma gereksinimleri gibi güvenlik önlemleri de sistem mimarisine entegre edilmiştir.

Sınıflandırma kuruluşlarının teknik ve güvenlik standartlarına uygunluk hedeflenerek, yangın algılama sistemleri, zehirli/gazlı ortam sensörleri, görsel-işitsel alarmlar ve manuel müdahale noktaları gibi tüm unsurlar merkezi bir kontrol sistemine bağlanmış ve gerçek zamanlı izleme altyapısı kurgulanmıştır. Tüm bu sistem bileşenleri, güvenlik ve enerji yönetimi açısından birlikte değerlendirilmiş, simülasyon analizleriyle desteklenmiş ve sistemin işletme senaryoları doğrultusunda mantık diyagramları ve akış şemaları oluşturulmuştur.

Bu çalışmada, hem yenilenebilir ve düşük emisyonlu enerji sistemlerinin entegrasyonuna yönelik mühendislik çözümleri hem de bu sistemlerin güvenli işletimi için gereken altyapısal gereksinimleri ortaya konulmakta; EMS ve PMS sistemleri üzerinden bu yapının yönetimini optimize eden bir yazılım-simülasyon tabanlı yaklaşım sunulmaktadır.

1.4. GAMMA Projesi Genel Bakış

GAMMA (Green Ammonia and Biomethanol Fuel Maritime Vessels) projesi, Avrupa Birliği'nin 2021–2027 dönemini kapsayan “Ufuk Avrupa” araştırma ve yenilik programı çerçevesinde geliştirilmiş olup, denizcilik sektöründe yenilenebilir yakıtların kullanımını teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Proje, Ufuk Avrupa Programı’nın Küme 5: İklim, Enerji ve Mobilite başlığı altında, HORIZON-CL5-2023-D5-01-12 numaralı çağrı kapsamında desteklenmeye hak kazanmıştır. Elkon Elektrik firması, proje başvurusunda yer alan uluslararası konsorsiyum tarafından davet edilmiş ve resmi ortak olarak projeye dâhil olmuştur.

Beş yıl süreyle yürütülmesi planlanan GAMMA projesi, 2024 yılında başlatılmış olup, gemi sistemlerinde sıfır emisyonlu ve yenilenebilir enerjiye dayalı güç çözümlerinin geliştirilmesini hedeflemektedir. Bu tez çalışması da, GAMMA projesi kapsamındaki teknik çıktılardan biri olarak, söz konusu teknolojilerin konvansiyonel gemi altyapılarına entegrasyonunu konu edinmektedir.



Şekil 1.2: GAMMA projesi logo.

Uzun mesafeli deniz taşımacılığı, küresel ticaretin %80-90’ını sağlamaktadır; ancak NO_x , SO_x ve GHG emisyonlarına ilişkin sıkı düzenlemeler, sektörde önemli teknolojik dönüşümleri zorunlu kılmaktadır. IMO 2050 yılına kadar GHG emisyonlarında %50 azalma hedefi net olmakla birlikte, bu hedefe nasıl ulaşılabileceği hâlâ belirsizliğini korumaktadır. Sektörün fosil yakıtlara olan bağımlılığının ciddi şekilde azaltılması gerekmektedir.

LNG gibi alternatif yakıtlar artık yaygınlaşmakta olup %20-30 oranında CO_2 azaltımı sağlamaktadır. Hidrojen taşıyıcılar (amonyak, hidrojen, biyometanol ve diğer biyoyakıtlar), çok daha fazla karbonsuzlaştırma potansiyeline sahiptir; ancak teknik, güvenlik, ekonomik ve fiyatlandırmaya bağlı kabul edilebilirlik gibi önemli engellerle karşı karşıyadır. Bununla birlikte, düşük hızda seyir, iyileştirilmiş gemi tasarımı ve

yenilenebilir kaynak kullanımı gibi verimlilik önlemleriyle de ciddi ölçüde yakıt tasarrufu sağlanır ve GHG salınımı azaltılır.

GAMMA projesi, bir dökme yük gemisinde hem biyometanol hem de amonyakın entegrasyonunu gerçekleştirmeyi hedeflemektedir. Bu kapsamda, biyometanol buhar reformasyonu yoluyla hidrojen gazına dönüştürülecek, amonyak ise bir parçalayıcıda ayrıştırılacaktır. Ardından, 1 MW'lık yakıt hücresi sistemiyle bu hidrojen elektrik enerjisine dönüştürülecektir.

GAMMA projesi sürdürülebilir yakıtların gemiye entegrasyonunda karşılaşılan teknik engelleri ele almaktadır. Bu engellerin başında, gemi üzerindeki operasyonlarda güvenliğin her koşulda sağlanması, mevcut gemi yapısı ve altyapısı ile entegrasyon, operasyonel gereksinimlere uygunluk, liman terminallerinde yakıt bulunabilirliği, farklı özelliklere sahip yakıtların gemide güvenli şekilde depolanması ve bu yakıtların gemi içerisinde hidrojen üretimi için dönüştürülmesi yer almaktadır. Son olarak, projenin bir diğer önemli amacı da toksisite ve yanıcılık gibi güvenlik riskleri göz önünde bulundurularak mürettebat için sürekli güvenliğin sağlanabildiğini kanıtlamaktır.

1.4.1. GAMMA projesi hedefleri

GAMMA projesinin temel hedefi, gemilerde alternatif yakıtların güvenli entegrasyonunu sağlayarak enerji dönüşümüne katkı sunmaktır. Bu kapsamda, biyometanol ve amonyak gibi sürdürülebilir yakıtların kullanımıyla çok düşük kükürtlü fuel oil (VLSFO) gibi fosil yakıtların yerine geçilmesi hedeflenmektedir. Projede, bu yakıtların kullanıldığı sistemlerin (biyometanol reformasyon, amonyak parçalayıcı ve 1 MW'lık düşük sıcaklıklı PEM yakıt hücresi) yardımıyla, gemi üzerindeki yardımcı motorların yerini alacak şekilde emisyonların azaltılması amaçlanmaktadır. Yardımcı motorlar yalnızca yedek olarak sistemde tutulacaktır.

Bu hedef doğrultusunda ilk amaç, yakıt sistemleri ve alt bileşenlerinin geliştirilmesidir. Biyometanol ve amonyak reaktörlerinin yüksek verimli katalizörlerle donatılmış şekilde tasarlanması, üretilmesi ve test edilmesi planlanmaktadır. Her biri 200 kWe kapasiteli reaktörler, uzun süreli çalışma koşulları altında değerlendirilerek hidrojen üretiminde güvenilirlikleri doğrulanacaktır. Bu reaktörlerde üretilen hidrojen, basınç PSA teknolojisiyle %99 saflıkta ayrıştırılarak yakıt hücrelerine beslenmek üzere hazırlanacaktır. PSA sistemlerinin de benzer şekilde, yüksek geri kazanım oranı ve uygun

debi koşullarını sağlayacak şekilde tasarlanması öngörülmektedir. Yakıt hücresi sisteminin modüler yapıda, konteyner bazlı bir yapı içerisinde entegre edilmesi de projenin öncelikli hedeflerindendir.

Bu kapsamda, sistemin diğer alt birimlerle birlikte entegre çalışabileceği bir kontrol stratejisi geliştirilecek ve tüm tasarım, P&ID/CAD çizimleriyle birlikte yapısal güvenlik koşullarına uygun şekilde kurgulanacaktır. Tüm bu alt sistemlerin bir araya getirilerek 50 saatlik entegre testlere tabi tutulması planlanmakta ve testlerin sonunda sistemin gemi üzerine montajı gerçekleştirilecektir. Projenin bir diğer önemli hedefi ise operasyonel güvenliği ve sistem izlenebilirliğini sağlayacak dijital altyapının kurulmasıdır. Yeni sistemlerin tümü dijital olarak izlenebilecek, kontrol ve analiz süreçleri merkezi bir sistem üzerinden yürütülecektir. Bu kapsamda, yakıt hücreleri, reformasyon ve parçalayıcıların güvenli çalışıp çalışmadığı sürekli denetlenecek, HVAC sistemleriyle desteklenen alanlarda olası sızıntılara karşı önleyici tedbirler alınacaktır. Ayrıca, gemi ve liman operasyonlarına dair yeni güvenli işletim prosedürleri tanımlanacaktır.

Sistemin dijitalleştirilmesiyle birlikte, gemi üzerindeki tüm enerji üretim ve tüketim döngüsü kayıt altına alınarak risk bazlı bakım stratejileri oluşturulacaktır. ISO 55000 standardına uygun şekilde, sistemlerin uzun dönemli takibi, anormalliklerin kaydı ve tahmine dayalı bakım uygulamaları mümkün kılınacaktır.

Son olarak proje, elde edilen teknik çıktılar doğrultusunda sürdürülebilir bir ticarileştirme stratejisi geliştirmeyi hedeflemektedir. Bu doğrultuda kapsamlı bir pazar analizi yapılacak, ortakların katkılarıyla çok paydaşlı bir iş modeli oluşturulacak ve fikri mülkiyet haklarına dayalı teknoloji transferi planlanacaktır. Elde edilen kazanımların 5 MW ölçeğine kadar yaygınlaştırılabilir olması da projenin uzun vadeli hedefleri arasında yer almaktadır.

1.5. Literatür Araştırması

Bu tez çalışması, hibrit enerji sistemlerinin denizcilik uygulamalarına entegrasyonu kapsamında, yakıt hücreleri, batarya sistemleri ve güneş panellerinin kullanıldığı yeni nesil enerji yönetimi mimarilerinin tasarımına ve bu sistemlerdeki kontrol, senkronizasyon ve güvenlik stratejilerine odaklanmaktadır. Literatür taraması bu hedefler doğrultusunda, hem elektriksel kontrol stratejileri hem de güvenlik sistemleri üzerine yapılmış çalışmaları kapsamaktadır.

Elektriksel sistemlerin kontrolü ve senkronizasyonu ile ilgili olarak, ada modlu mikro şebekelerde paralel evirici kontrolü ve senkronizasyon sistemlerinin kararlı ve etkin çalışmasının önemine vurgu yapan çalışmalar literatürde yaygın olarak yer almaktadır. Ye [10], paralel çalışan eviricilerde gerilim sarkmalarını önlemek için ölçülen gerilim geri beslemesine dayalı geliştirilmiş droop kontrol yöntemi önermiştir. Jin [11] ise ada modundan şebeke bağlantı moduna geçişte faz ve frekans senkronizasyonunu esas alan dikiş izsiz geçiş stratejisi geliştirmiştir. Guerrero [12] tarafından geliştirilen türevsel droop denetimi, dinamik geçici tepkileri iyileştirerek eviricilerin çevrimsel kararlılığını arttırmaktadır.

Bu çalışmada benzer olarak GFM ve GFL evirici yapıları için modelleme yapılmış, PFSL ve VSL temelli bir senkronizasyon yapısı kurulmuş ve farklı bağlantı modları arasındaki geçişlerde sistem kararlılığı sağlanmıştır. Zhang [13] tarafından sunulan çalışmada, GFM eviricilerin şebeke destek kapasitesi, RoCoF sınırları altında kontrol tasarımı ile detaylandırılmıştır. Benzer şekilde Rocabert [14], mikro şebekelerde birincil, ikincil ve üçüncül düzeylerde kontrol yapılarının genel bir analizini sunarak, sistemin kontrol edilebilirliğini ve güvenilirliğini artırmaya yönelik yöntemler önermiştir.

Enerji yönetimi stratejileri açısından, Hosseinzadeh [15] tarafından geliştirilen ROPMS yaklaşımı hibrit AA/DA mikro şebekelerde yenilenebilir kaynakların maksimum kullanımı, batarya ömrünün uzatılması ve yakıtı dayalı jeneratörlerin minimum kullanımı esaslarına dayanmaktadır. Qi [16] tarafından sunulan koordineli optimizasyon çerçevesi ise hibrit hidrojen-batarya enerji depolama yapıları için tahmin gerektirmeyen uzun dönemli bir enerji yönetimi çözümü sunmaktadır. Loskutov [17] ise PEM yakıt hücresi ve batarya tabanlı 3 kW'lık bir hibrit sistem için sonlu durum makinesi tabanlı EMS algoritması geliştirilerek sistem performansının deneysel olarak test edildiğini raporlamıştır.

Güvenlik sistemleri açısından, Liu [18] tarafından geliştirilen bulanık mantık ve DEMATEL tabanlı FMEA yöntemi, tahrik sistemlerinde risk önceliklendirmesini daha duyarlı hale getirerek sistemsal arızaların nedensel derecelerine göre sıralanmasını sağlamıştır. Benzer olarak Wang [19], batarya tahrikli hızlı feribotlar için resmî emniyet değerlendirmesi (FSA) sunmuş ve olay ağaçları analizleri ile kazaların önlenebilirliğini irdelenmemiştir. Ruggiero [20] tarafından hibrit tahrikli yolcu gemilerinde yangın risklerine karşı sistemsal tasarım önerileri sunulmuş ve özellikle batarya üzerinden gelen riskler detaylandırılmıştır.

Zhang [21] tarafından geliştirilen Entropi Bulut Yöntemi tabanlı yangın risk modeli ise saf elektrikli gemilerde yangın olasılıklarını sistematik olarak modelleyerek risk seviyelerinin kantitatif analizine olanak sağlamaktadır. Aarskog [22], hidrojen tahrikli yolcu feribotları için konsept risk değerlendirmesi sunarak, IGF koduna uygunluk analizini gerçekleştirmiş ve farklı güvenlik senaryoları için ölçülebilir sonuçlar elde etmiştir.

Bu tez kapsamında yapılan literatür araştırması, hibrit enerji sistemlerinin denizcilik mikro şebekelerine entegrasyonu üzerine odaklanmakta olup mevcut çalışmalar üç ana başlık altında incelenmiştir:

- Çoklu enerji kaynağına dayalı şebeke senkronizasyonu ve kontrol stratejileri,
- Enerji ve güç yönetimi algoritmalarının yapılandırılması,
- Entegre güvenlik sistemlerinin senaryo bazlı analizlere dayalı modellenmesi.

Literatürde, özellikle ada modlu mikro şebekelerde paralel eviricilerin kontrolü, GFM-GFL geçişleri ve droop tabanlı yük paylaşımı gibi konular sıkça ele alınmıştır. Ancak bu çalışmalar genellikle tekil kaynak yapıları altında gerçekleştirilmiş olup; dizel jeneratör, batarya, PV ve yakıt hücresi gibi farklı dinamik karakteristiklere sahip enerji kaynaklarının eş zamanlı senkronizasyonu ve bu yapıların mod geçişleriyle olan etkileşimleri kapsamlı biçimde analiz edilmemiştir.

Bu eksikliği gidermek üzere geliştirilen tez modeli, AA baralı bir hibrit sistemde GFM ve GFL kaynakların birlikte işletilmesine olanak tanıyan senaryo bazlı geçiş stratejilerini içermektedir. Özellikle batarya sisteminin GFM modda referans sağlaması, yakıt hücresinin gecikmeli olarak GFM moduna geçişi gibi durumlar için kontrol algoritmaları tanımlanmış ve bu yapılar, sistem kararlılığına etkisi açısından simülasyonlarla test edilmiştir.

Enerji yönetimi literatüründe; enerji verimliliği, yakıt tüketimi azaltımı ve batarya çevrim ömrü uzatımı gibi hedefler doğrultusunda geliştirilmiş algoritmalar yaygın olarak yer almaktadır. Bununla birlikte bu yaklaşımlar genellikle durağan sistemlerde veya tek modda değerlendirilmiş, gemi operasyonları gibi gerçek zamanlı geçiş gerektiren durumlar dikkate alınmamıştır. Bu çalışmada ise kural tabanlı EMS algoritması, hem SoC sınırları hem de senkronizasyon gerekliliklerine bağlı olarak kaynak geçişlerini dinamik olarak yönetmekte; böylece sadece yükü dengelemekle kalmayıp aynı zamanda kaynak sürekliliği ve sistem güvenliği de sağlanmaktadır.

Güvenlik literatürü incelendiğinde, genellikle tek yakıt türüne (ya metanol ya da amonyak) yönelik risk analizlerine odaklanıldığı, bu analizlerin ise enerji yönetimi sistemiyle doğrudan entegre edilmediği gözlemlenmektedir. Bu tez çalışmasında ise hem metanol hem de amonyağın birlikte kullanıldığı e-yakıt altyapısına özel olarak geliştirilmiş çift yakıt uyumlu bir güvenlik kontrol mimarisi önerilmiştir. Gaz sızıntısı, basınç sapmaları, yangın riski gibi senaryolar, ESD sistemleri ve mantıksal alarm koşulları ile birlikte değerlendirilmiş; tüm bu unsurlar enerji yönetimi yapısına entegre edilerek sistemsel bütünlük sağlanmıştır. Bu yaklaşım, enerji üretim kararlılığı ile emniyet fonksiyonlarının birlikte çalışabilirliğini güçlendirmektedir.

Mevcut literatürde genellikle ayrı ayrı değerlendirilen kontrol algoritmaları, enerji yönetimi stratejileri ve güvenlik altyapıları, bu tez çalışmasında bütüncül bir sistem mimarisi altında birleştirilmiş ve retrofit bir uygulama senaryosunda değerlendirilmiştir. Konvansiyonel dizel jeneratör ağırlıklı bir sistemin, batarya, güneş paneli ve yakıt hücresi gibi farklı kaynaklarla desteklenerek hibrit yapıya dönüştürülmesi sayesinde, bu çalışma hem saha gerçekliğine uygun hem de teoriyle uyumlu kapsamlı bir çözüm ortaya koymakta; literatürdeki parçalı yapıyı bütünsel bir modele dönüştürmektedir.

1.6. Tezin Kapsamı

Bu tez çalışması, denizcilik sektöründe sıfır emisyon hedeflerine ulaşılması amacıyla, yenilenebilir enerji kaynakları ve biyoyakıt tabanlı yakıt hücresi sistemlerinin gemi enerji altyapısına entegrasyonunu konu almaktadır. Çalışma, GAMMA projesi kapsamında geliştirilen hibrit enerji sistemi mimarisi ile ilişkilendirilmiş olup, sistemde kullanılan enerji kaynaklarının (biyometanol, amonyak, güneş enerjisi) güvenli, verimli ve yönetilebilir bir yapı altında gemi operasyonlarında kullanılabilirliğinin araştırılmasını hedeflemektedir.

Genele anlamda tez, hibrit bir enerji santrali tasarımında enerji yönetimi sisteminin ve güç yönetim sisteminin, farklı kaynaklardan gelen enerjiyi verimli bir şekilde yönetecek biçimde modellenip kontrol edilmesiyle, sistem verimliliğinin artırılacağı ve yakıt hücresi ile batarya ömrünün uzatılacağı varsayımına dayanmaktadır. Bu doğrultuda, sistem dinamiklerinin dijital ikiz ortamında modellenmesi ve kontrol stratejilerinin simülasyon temelli test edilmesi yöntem olarak benimsenmiştir.

Birinci bölümde, genel kavramsal çerçeve oluşturulmuş; denizcilikte hibrit sistemlerin kullanım alanları, alternatif yakıt teknolojilerinin önemi, uluslararası regülasyonlar ve çevresel etkiler özetlenmiştir. Ayrıca teorik altyapıyı oluşturan temel kavramlara ve literatürdeki güncel çalışmalara yer verilmiştir.

İkinci bölümde, sistemin alt bileşenlerine yönelik genel tanımlar yapılmıştır. Bu kapsamda; amonyak ve metanol bazlı yakıt dönüşüm sistemleri, hidrojenin PSA üniteleriyle saflaştırılması ve yakıt hücresi sisteminin temel çalışma prensipleri ele alınmıştır. Her bir alt sistemin fonksiyonları açıklanmış, yapıları ve kullanım amaçları detaylandırılmıştır.

Üçüncü bölümde, sistemin güvenli işletimi için oluşturulan güvenlik altyapısı detaylandırılmıştır. Bu kapsamda yangın algılama sistemleri, gaz dedektörleri, alarm ve acil durdurma sistemleri tanımlanmış ve sistem akış diyagramları ile desteklenmiştir. Her bir risk senaryosu için mantıksal güvenlik kontrol yapıları oluşturulmuştur. İzleme ve müdahale süreçlerinin merkezi kontrol birimiyle nasıl ilişkilendirileceği açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, enerji üretim ve dönüşüm sürecinde kullanılan batarya ve yakıt hücresi sistemlerinin evirici yapıları üzerinde durulmuştur. Bu bağlamda, sistemin elektriksel mimarisi analiz edilmiş; güneş paneli, batarya ve yakıt hücresi eviricilerinin kontrolü üzerine kurulu bir evirici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Denetim algoritmalarına

ilişkin karşılaştırmalar yapılmış ve uygulanan kontrol stratejileri analiz edilmiştir. Ayrıca bu bölümde hibrit sistemlerde kullanılan genel kontrol yöntemlerine ve denizcilikteki uygulamalarına yer verilmiştir.

Beşinci bölümde, enerji yönetim sistemi ve güç yönetim sistemi kontrol mantıkları detaylandırılmış, akış diyagramları ile sistemin enerji yönlendirme stratejileri modellenmiştir. Evirici senkronizasyonu, kontrol algoritmaları ve olası senkronizasyon problemleri üzerine literatür destekli analizler yapılmıştır. Bu analizler doğrultusunda, sistemin enerji akışı ve güç dengesini sağlayan mantıksal yapılar oluşturulmuştur. EMS-PMS yazılımına entegre edilen operasyon modları geliştirilmiştir. Bu modlar kapsamında sistemin senkronizasyon, yük paylaşımı ve enerji önceliklendirme fonksiyonları modellenmiş; dağıtım sistemiyle ilişkili kontrol senaryoları açıklanmıştır. Yazılım düzeyinde geliştirilen mod yapıları, devreye alma süreçleri ve farklı yük koşullarına göre sistem tepkileri de ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

Altıncı bölümde, üzerinde çalışılan yük gemisinin mevcut yük profili ile operasyonel seyir senaryoları detaylı şekilde ele alınmıştır. Mevcut çalışma profiline ek olarak, yeni yakıt sisteminin entegrasyonu ile ortaya çıkan yük analizleri değerlendirilmiş ve buna bağlı olarak belirlenen çalışma modları açıklanmıştır. Gemi üzerindeki mevcut sistemlerin kapasite ve teknik özellikleri göz önünde bulundurularak, önceki bölümlerde tanımlanan enerji yönetim stratejileriyle uyumlu olacak şekilde operasyon planları sunulmuştur. Farklı seyir senaryoları için yük analizleri bu kapsamda gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler, ilerleyen bölümlerde yürütülen simülasyon çalışmalarına referans olarak kullanılmıştır.

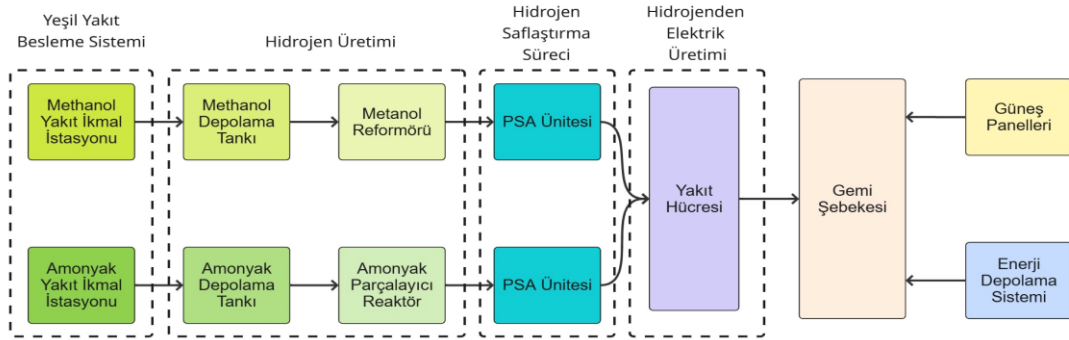
Yedinci bölümde, sistemin dijital ikizi oluşturularak hibrit modelleme gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ortamında geliştirilen model üzerinde enerji yönetim ve güç yönetim stratejileri denenmiş, kontrol sistemlerinin tepkileri analiz edilmiştir. Gerçek operasyon koşullarına uygun yük profilleri üzerinden senaryo bazlı simülasyonlar yapılmış, operasyon modlarının çalışması simülasyon ekran görüntüleriyle desteklenmiştir.

Tezin son bölümünde, gerçekleştirilen çalışmalar değerlendirilmiş; elde edilen bulgular doğrultusunda sonuçlar ve gelecek çalışmalara yönelik öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2. BİYO YAKIT VE YAKIT HÜCRESİ ALT SİSTEMLERİ

2.1. Giriş

Bu bölümde, sistemin alt bileşenlerine yönelik genel tanıtlar yapılmıştır. Bu kapsamda amonyak ve metanol bazlı yakıt dönüşüm sistemleri, hidrojenin PSA üniteleriyle saflaştırılması, yakıt hücresi sisteminin temel çalışma prensipleri ele alınmıştır. Şekil 2.1’de blok diyagramı gösterilmiştir.



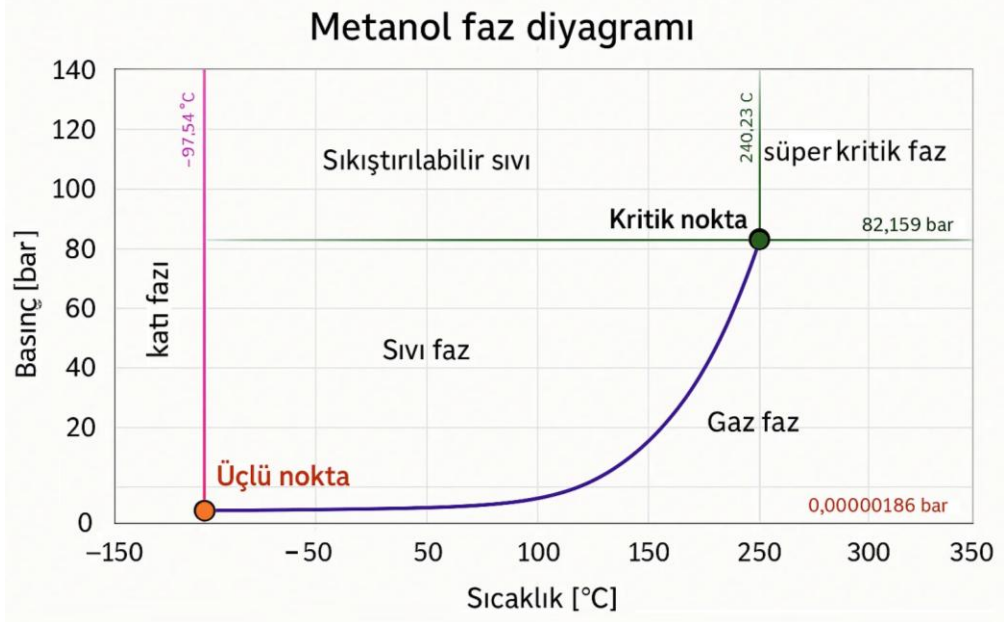
Şekil 2.1: Yeşil yakıtlardan gemi şebekesine entegre hibrit enerji akış diyagramı.

Amonyak ve metanol gibi yeşil kimyasal taşıyıcılardan hidrojen üretilip, PSA ile saflaştırarak yakıt hücresiyle elektrik enerjisi elde etme süreci, çok disiplinli bir mühendislik yaklaşımı gerektirmektedir. Her alt sistemin, yani yakıt besleme, reformasyon/parçalama, saflaştırıcı ve yakıt hücresi ünitelerinin, kendine özgü işlevi ve sistem bütününde tanımlı bir rolü bulunmaktadır. Entegrasyonun başarılı şekilde tasarlanması halinde, her adımda oluşan verim kayıpları minimize edilmektedir ve bir alt sistemde açığa çıkan atık enerji, diğer süreçlerde değerlendirilmek üzere kullanılmaktadır. Bu sayede, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltan, karbon emisyonu oluşturmayan ve elektrik talebini güvenilir biçimde karşılayan verimli bir enerji dönüşüm zinciri oluşturulmaktadır. Böyle bir sistem, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen hidrojenin depolanması ve kullanılmasında yenilikçi ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır.

2.2. Metanol ve Amonyak Yakıtlarının Özellikleri ve Denizcilikte Kullanımı

2.2.1. Metanol (CH_3OH)

Metanol, oda sıcaklığında berrak ve susuz bir sıvı olarak bulunmaktadır ve su ile her oranda karışabilmektedir. Normal atmosfer basıncında kaynama noktası yaklaşık 64.7°C , donma noktası ise -97.6°C 'dir. Kritik noktası ise yaklaşık 239°C sıcaklık ve 78.5 atm basınca karşılık gelmektedir. Metanolün üçlü noktasında (-97.7°C , $\sim 1.86 \times 10^{-6}\text{ bar}$) katı, sıvı ve gaz fazları dengede bulunmaktadır. Bu faz geçişleri ile kritik koşullar, Şekil 2.2'de metanolün faz diyagramı üzerinde gösterilmektedir. Kritik sıcaklık ve basıncın üzerinde ise metanol, süperkritik akışkan fazına geçiş yapmaktadır. Metanolün moleküler yapısı polar olup, nispeten düşük molekül ağırlığına (32 g/mol) sahip olduğu için yüksek buhar basıncına ulaşabilmektedir. Bu özellik, metanolün uçuculuk karakteristiğini açıklamaktadır [23,24].



Şekil 2.2: Metanol faz diyagramı.

Metanolün alt ısı değeri yaklaşık 19.9 MJ/kg 'dır, bu değer konvansiyonel deniz yakıtlarına (fuel oil yaklaşık 40 MJ/kg) göre düşüktür. Hacimsel enerji yoğunluğu da benzer şekilde daha düşük olmaktadır. Sıvı metanolün yoğunluğu yaklaşık 0.79 kg/L olduğundan, alt ısı değeri bazında litre başına yaklaşık 15.6 MJ enerji içermektedir. Bu değer, marin gazyağı veya dizel yakıtın ($\sim 36\text{ MJ/L}$) yaklaşık yarısı düzeyindedir. Dolayısıyla aynı menzili sağlayabilmek için metanol yakıt tanklarının konvansiyonel

yakıtlara kıyasla daha büyük hacimde tasarlanması gerekmektedir. Bununla birlikte, metanolün enerji yoğunluğu LNG, sıvı hidrojen ve amonyak gibi diğer alternatif yakıtlardan daha yüksek seviyededir. Metanolün hacimsel enerji yoğunluğu, LNG'nin yaklaşık %63'ü ve amonyanın yaklaşık %150'si kadar olmaktadır. Gravimetrik olarak ise 1 ton metanol, 1 ton LNG'nin içerdiği enerjinin yaklaşık %36'sını sağlamaktadır [23,25,36].

2.2.1.1. Depolama ve taşıma koşulları

Metanol, ortam sıcaklığı ve basıncında sıvı halde kalabildiğinden depolanması ve taşınması için kriyojenik koşullara ihtiyaç duyulmamaktadır. Gemilerde metanol yakıtı çelik yakıt tanklarında veya uygun kaplamalı tanklarda güvenli bir şekilde taşınabilmektedir. Ancak, metanolün parlama noktası oldukça düşük olup (~11–12 °C), SOLAS ve IGF Koduna göre düşük flaş noktalı yakıtlar arasında yer almaktadır. Bu nedenle, yakıt tanklarının yerleşiminde ve güvenliğinde özel önlemler alınması gerekmektedir. Gemi dış cidarına bitişik yakıt tanklarında ikincil bir bariyer olarak koferdam ya da çift cidar uygulanması, tank çevresinde gaz algılama ve havalandırma sistemlerinin bulunması zorunlu olmaktadır. Metanol yakıt tankları genellikle atmosferik basınçta çalışan entegre tanklar şeklinde tasarlanabilmektedir. LNG gibi basınçlı bağımsız tanklar zorunlu değildir; çünkü metanolün sıvı formda tutulabilmesi için yüksek basınç veya düşük sıcaklığa ihtiyaç duyulmaz. Ayrıca, metanol bazı durumlarda balast tankları gibi mevcut tanklarda da uygun modifikasyonlarla depolanabilmektedir. Bu esneklik, metanolün sıvı haldeki depolama kolaylığından kaynaklanmaktadır. Taşıma sırasında metanolün tamamen suyla karışabildiği ve suda çözünbildiği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu özellik, olası döküntülerde çevresel etkilerin petrol türevlerine kıyasla daha az olmasına olanak tanımaktadır [32,33,34,37].

2.2.1.2. Güvenlik ve toksisite değerlendirmesi

Metanol yanıcı ve toksik bir sıvı olmaktadır. Düşük flaş noktası (~11 °C) ve geniş alevlenme sınırları (%6 ile %36 hacim) nedeniyle, açık havada dahi buharlarının tutuşması halinde hızla yanabilmektedir. Ancak metanolün yanma alevi neredeyse görünmezdir, zira karbon-karbon bağı içermemesi sebebiyle is ve parlak ışık üretmez. Bu durum, yangın esnasında alevin tespitini güçleştirmekte ve özel alev sensörlerinin

kullanılmasını gerektirmektedir. Metanol buharı havadan biraz daha ağırdır ve kapalı alanlarda birikerek patlayıcı atmosfer oluşturabilmektedir. Dolayısıyla, metanol yakıt sistemlerinde sızdırmazlık, gaz deteksiyonu ve havalandırma uygulamaları kritik öneme sahiptir. Toksikolojik açıdan değerlendirildiğinde, metanol cilt ve göz yoluyla emilebilmekte, solunması durumunda baş ağrısı ve baş dönmesine yol açabilmektedir. Yutulması halinde ise, metabolizma sonucu formaldehit ve formik asit oluşumuna neden olmakta, bu durum körlük ve ölüme sebebiyet verebilmektedir. İş sağlığı limitlerine göre, metanol için tavsiye edilen 8 saatlik maruziyet sınırı yaklaşık 200 ppm olarak belirlenmektedir. Metanolün zehirliliği ağırlıklı olarak kronik veya akut yutmaya bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Buna karşın, amonyağa kıyasla inhalasyon yoluyla ani ölüm riski daha düşük olmaktadır. Yine de, metanol yakıtı kullanılan alanlarda uygun sensörlerle olası sızıntıların izlenmesi ve personelin antistatik koruyucu giysi, gözlük ve eldiven gibi koruyucu ekipmanlar kullanması gerekmektedir [32,33].

2.2.1.3. Yakıt olarak avantajları ve sınırlamaları

Metanolün gemi yakıtı olarak en büyük avantajlarından biri, oda sıcaklığında sıvı formda bulunması sayesinde depolama ve ikmal altyapısının görece basit olabilmesidir. Oda sıcaklığında sıvı halde kalması, LNG gibi yakıtlarla karşılaştırıldığında kriyojenik tanklara ya da hidrojen gibi yüksek basınçlı tüplere ihtiyaç bırakmamaktadır. Mevcut yakıt ikmal sistemleri, küçük modifikasyonlarla metanol yakıtı için kolaylıkla uyarlanabilmektedir. Ayrıca, metanol molekülünde kükürt bulunmadığından SO_x emisyonu üretmemektedir ve yanma sırasında is ile partikül oluşumu çok düşük seviyede kalmaktadır. NO_x emisyonları da petrol kökenli yakıtlara kıyasla daha düşük olmaktadır. Özellikle, metanolün yanması sırasında yüksek sıcaklıkları düşürmek amacıyla su enjeksiyonu uygulandığında IMO Tier III NO_x limitlerine ulaşmak mümkün olmaktadır. Metanolün bir diğer avantajı, toksik olmamakla birlikte çevresel açıdan biyolojik olarak hızla parçalanabilmesidir. Denize dökülmesi durumunda dizel yakıtlara göre daha hızlı çözünmekte ve mikroorganizmalar tarafından parçalanmaktadır.

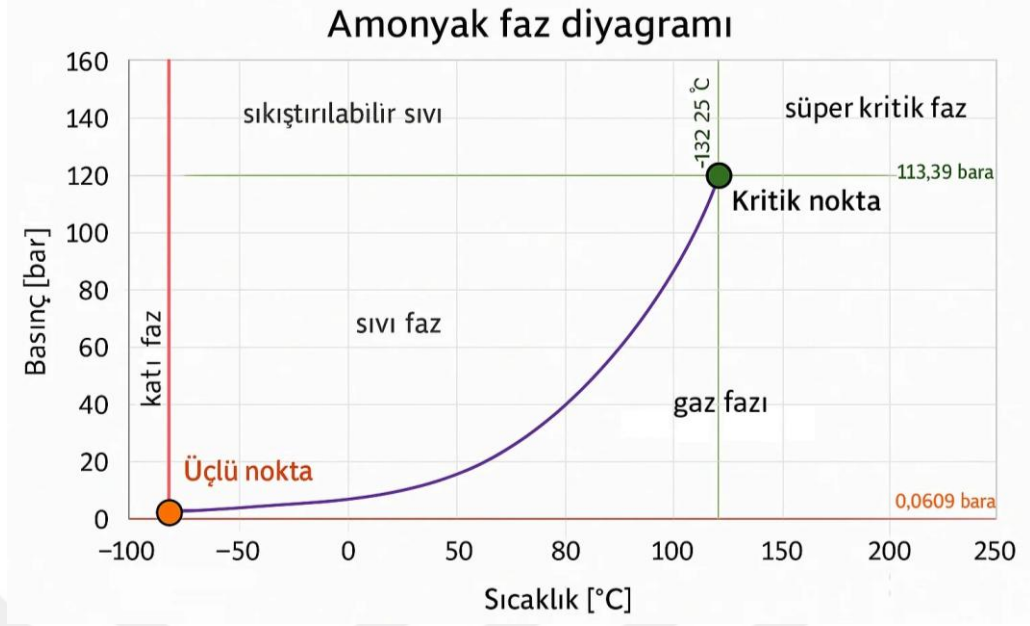
Bununla birlikte, metanolün enerji yoğunluğunun düşük olması önemli bir sınırlama oluşturmaktadır. Aynı menzile ulaşabilmek için, dizel yakıtı kıyasla yaklaşık iki katı hacimde tanka ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, geminin yük kapasitesinde azalmaya

veya menzilde kısaltmaya yol açabilmektedir. Ayrıca, metanolün düşük parlama noktası, yangın ve patlama riski açısından tasarım ve işletme prosedürlerinde çok daha dikkatli olunmasını gerektirmektedir. Metanolün görünmez alev özelliği, yangın güvenliği eğitimlerinde ve yangın algılama/önleme ekipmanlarında özel önlemler alınmasını zorunlu kılmaktadır. Son olarak, metanolün bazı metaller ve elastomerler üzerinde korozyon etkisi dikkate alınmalıdır. Bu nedenle uygun malzeme seçimi, özellikle paslanmaz çelik, alüminyum ve uygun conta tiplerinin kullanılması gerekmektedir [16,20,21].

2.2.2. Amonyak (NH₃)

Amonyak, normal koşullarda (1 atm, 25 °C) gaz fazında bulunan, keskin kokulu ve renksiz bir kimyasal yakıttır. Sıvı halde depolanabilmesi için ya sıcaklığı düşürülüp basıncı atmosfer seviyesinde tutulur (örneğin, -33.4 °C’de 1 atm’de sıvılaşır) ya da ortam sıcaklığında basınç artırılır (25 °C’de yaklaşık 9 bar basınç altında sıvı halde kalır). Amonyağın kaynama noktası -33.3 °C (1 atm), donma noktası -77.7 °C ve kritik noktası ise 132.4 °C sıcaklık ve yaklaşık 11.3 MPa (111 atm) basınçtır. Üçlü noktasında (-77.7 °C, 6.06 kPa) katı, sıvı ve gaz fazları dengede bulunmaktadır; bu faz geçişleri ve sınırları Şekil 2.3’te gösterilmektedir. Amonyak, suda kısmen çözünebilen (20 °C’de suda çözünürlüğü yaklaşık 530 g/L) ve polar karakterli bir moleküldür. Sıvı amonyağın yoğunluğu -33 °C’de yaklaşık 0.68 g/mL civarındadır ve bu nedenle hacimsel olarak metanol ile petrol kökenli yakıtlardan daha düşüktür. Gemilerde yakıt olarak kullanılan amonyak, genellikle su içermeyen anhidroz NH₃ formunda ve sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) benzeri yöntemlerle taşınmaktadır [25,26].

Şekil 2.3’te amonyağın katı (çeşitli kristal fazlar), sıvı ve gaz hallerinde denge koşulları, basınç-sıcaklık eksenlerinde gösterilmektedir. Yeşil nokta üçlü faz dengesini, kırmızı eğri sıvı-buhar denge hattını ve bu eğrinin sonlandığı nokta ise kritik noktayı (C) temsil etmektedir.



Şekil 2.3 Amonyak faz diyagramı.

Amonyak, karbon içermeyen bir bileşik olduğu için kütle başına enerji içeriği hidrokarbon yakıtlara kıyasla daha düşüktür. Anhidroz amonyağın alt ısı değeri yaklaşık 18.6 MJ/kg'dır. Bu değer, metanolün (19.9 MJ/kg) ve tipik petrol türevi yakıtların (~40 MJ/kg) altında kalmaktadır. Sıvı amonyağın hacimsel enerji yoğunluğu da düşüktür: -33 °C'de ve 1 atm basınç altında sıvı amonyak yaklaşık 682 kg/m³ yoğunluğa sahip olup, alt ısı değeri bazında yaklaşık 12.7 MJ/L enerji içerir. Eğer ortam sıcaklığında, yani 25 °C'de ve yaklaşık 9 bar basınçta depolanırsa, yoğunluğu ~626 kg/m³'ye iner ve hacimsel enerji yoğunluğu da yaklaşık 11.6 MJ/L olur. Bu nedenle, aynı enerji miktarı için amonyak yakıt tanklarının hacminin petrol kökenli yakıtlara göre yaklaşık üç kat daha büyük olması gerekmektedir. Örneğin, LNG ile karşılaştırıldığında amonyağın hacimsel enerji yoğunluğu LNG'nin yalnızca yaklaşık %50'si seviyesindedir; benzer enerji depolamak için iki kat daha fazla tank hacmine ihtiyaç duyulur. Amonyak, birim kütlede yüksek oranda hidrojen içermesine rağmen (kütlece %17.8 H₂), hem gravimetrik hem de volumetrik enerji yoğunluğu hidrojenin kendisine göre oldukça düşüktür (örneğin, sıvı hidrojenle kıyaslandığında yaklaşık 1.3 katı hacim gerekir) [25,26,34].

2.2.2.1. Depolama ve taşıma koşulları

Gemilerde amonyak yakıtı depolama uygulamaları, teknik olarak LPG taşıyan gemilerin kargo sistemleriyle benzerlik göstermektedir. Amonyak, hem toksik hem de kimyasal olarak reaktif bir madde olduğundan, yakıt tanklarının seçiminde genellikle bağımsız tip basınçlı tanklar (Type C tankerlerinde olduğu gibi) tercih edilmektedir. Böylece, -33°C 'de atmosferik basınç altında tamamen soğutulmuş veya ortam sıcaklığında yaklaşık 10–12 bar basınçta yarı basınçlı olarak sıvı halde tutulabilmektedir. Yakıt tanklarının mümkün olduğunca açık güvertede veya iyi havalandırılan, korunaklı tank bölmelerinde konumlandırılması önerilmektedir.

IGF Kodu'nun mevcut hükümleri kapsamında, amonyak düşük flaş noktalı yakıt kategorisine girmemektedir; çünkü amonyak, yüksek parlama sıcaklığına ve dar tutuşma sınırlarına sahip olduğundan kolayca alevlenmez. Ancak, özel düzenlemeler gerekmektedir. 2024 yılında IMO tarafından kabul edilen MSC.1/Circ.1687 geçici yönergesi ile amonyağın yakıt olarak kullanımına ilişkin çeşitli güvenlik tedbirleri getirilmiştir. Bu kapsamda, yakıt tanklarının çift bariyerli yapıda olması, tank çevresinde uygun bir cofferdam bulunması ve gaz sızıntısı durumunda hızlı inertleme veya su perdesi sistemlerinin devreye alınabilmesi önerilmektedir.

Amonyak depolama tanklarının imalatında genellikle paslanmaz çelik veya nikel alaşımlı çelikler tercih edilmektedir. Bunun nedeni, karbon çeliklerinin düşük sıcaklıklarda gevrekleşmeye ve amonyak ile temasta stres çatlağı korozyonuna maruz kalabilmesidir. Taşıma ve depolama süreçlerinde tank üstü boşluklar çoğunlukla inert gaz (azot) ile doludur; böylece olası sızıntı durumlarında amonyak-hava karışımının oluşması ve patlayıcı atmosfer riskinin önüne geçilmektedir. Ayrıca, amonyak yakıtının depolandığı bölmelerde soğutma sistemleri, basınç emniyet valfleri ve gaz detektörlerinin bulundurulması zorunlu ekipmanlar arasında yer almaktadır [34,35].

2.2.2.2. Güvenlik ve toksisite değerlendirmesi

Amonyak yakıtı, güvenlik açısından en zorlu alternatiflerden biri olarak değerlendirilmektedir. En belirgin risk, bu maddenin son derece yüksek toksisitesidir. Amonyak gazı, solunum yolları ve gözler üzerinde aşındırıcı etkiye sahip olup, yüksek konsantrasyonda solunması halinde ölümcül sonuçlara yol açabilmektedir. Yaklaşık 300 ppm düzeyindeki amonyak, kısa süreli maruziyetlerde dahi insan sağlığı için

tehlike oluşturur. 2500 ppm üzerinde ise 30 dakika içinde ölümcül etki gösterebilir. İş ortamlarında izin verilen maruziyet sınırları oldukça düşüktür; örneğin NIOSH 10 saat için 25 ppm, 15 dakika için 35 ppm sınırını önermektedir. Bu nedenle, amonyak yakıt sistemlerinde gaz kaçağı tespiti, sürekli izleme ve alarm sistemleri yaşamsal önemdedir.

Amonyak, cilt ve gözle temasta kostik etki gösterir. Sıvı amonyak, temas ettiğı dokularda donmaya ve soğuk yanığına neden olabilmektedir. Bu yakıtla çalışan gemilerde mürettebatın özel eğitim alması ve tam yüz maskeli solunum cihazı ile kimyasal koruyucu giysi gibi uygun kişisel koruyucu donanım kullanması gerekmektedir.

Yangın ve patlama açısından ise amonyak kendine özgü bir profile sahiptir. Alt patlama sınırı yaklaşık %15 hacim ile oldukça yüksektir ve tutuşma enerjisi (680 mJ) de yüksektir. Bu nedenle amonyağın hava ile karışımlarının kolay alevlenmesi beklenmez. Otomatik tutuşma sıcaklığı da çeşitli kaynaklarda 651 °C civarında belirtilmektedir. Bu özellikleriyle, amonyak metanol veya LNG gibi kolay tutuşan yakıtlardan daha düşük yangın riskine sahip olmakla birlikte, patlayıcı ortam ve toksik yayılım riski daha baskındır.

Amonyak sızıntısı durumunda yangın tehlikesinden çok, zehirlenme ve korozyon hasar riski ön plana çıkar. Güvenlik sistemleri de bu nedenle toksisite odaklı tasarlanmaktadır. Kaçak durumunda su perdelerinin devreye girerek amonyak gazını absorbe etmesi ve havalandırma sisteminin gazı seyrelterek güvenli bir alana tahliye etmesi gibi önlemler uygulanır. Ayrıca, amonyak ile çalışan bölümlerde elektronik ekipmanların patlama kıvılcım korumalı tipte olması, potansiyel sızıntı noktalarında ise çift contalı vana ve bağlantıların kullanılması gerekmektedir. Sonuç olarak, amonyak yakıtı yüksek toksisite ve reaktivite özellikleri nedeniyle gemilerde son derece kontrollü koşullar altında muhafaza edilmelidir [35,36,38,40].

Amonyağın gemi yakıtı olarak öne çıkan en büyük avantajı, yanma sürecinde karbon içermediğı için karbon dioksit (CO₂) emisyonu oluşturmamasıdır. Bu özelliğı, denizcilik sektöründe sera gazı emisyonlarının azaltılması hedefleri doğrultusunda amonyağı son derece cazip ve “karbonsuz” bir yakıt seçeneğı haline getirmektedir. Ayrıca, amonyak dünya genelinde yaygın olarak üretilen ve büyük hacimlerde taşınan bir kimyasal olduğı için, tedarik zinciri ve fiyat istikrarı açısından da uzun vadede

avantaj sunabilmektedir. Mevcut LPG tankerleri ve terminallerinin bir kısmının amonyak taşımaya uygun altyapıya sahip olması, yakıt geçişlerinde önemli bir kolaylık olarak değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte, amonyağın bazı önemli dezavantajları dikkatle ele alınmalıdır. Öncelikle, yüksek zehirliliği operasyonel güvenlik üzerinde ciddi kısıtlamalar getirmektedir. Gemi personelinin korunması ve olası sızıntıların çevreye etkisi büyük bir endişe kaynağıdır. Amonyak, su ile birleştiğinde amonyum hidroksit oluşturur ve bu madde deniz ortamında toksik etki göstererek sucul canlılar için zararlı olabilmektedir. Bir başka sınırlama ise, amonyağın düşük yanma reaktivitesidir. Amonyağın tutuşma hızının düşük olması (yaklaşık 0.07 m/s) ve yüksek ateşleme enerjisi gerektirmesi, motorlarda yakıt karışımının tutuşmasını zorlaştırır. Bu nedenle, amonyak yakıtlı motorlarda ateşlemeyi iyileştirmek için karışıma hidrojen eklemek ya da çift yakıtlı sistemler kullanmak gereklidir.

Ek olarak, amonyağın enerji yoğunluğunun düşük olması menzil kaybı ve daha sık yakıt ikmali ihtiyacı doğurur. Yakıt tanklarının büyük hacimde olması, geminin yük kapasitesinde azalmaya neden olabilmektedir. Son olarak, amonyak yakıtı denizcilikte henüz yeni uygulanmaya başlanan bir teknoloji olduğu için endüstriyel deneyim sınırlıdır ve güvenlik ile işletme prosedürleri halen geliştirilme aşamasındadır. Bu belirsizlikler nedeniyle, yakın vadede amonyak kullanımı büyük ölçüde pilot projelerle ve belirli gemi tipleriyle sınırlı kalmaktadır [28,31].

2.2.3. Uluslararası kurallar ve regülasyonlar

Denizcilikte metanol ve amonyak gibi alternatif yakıtların kullanımına ilişkin uluslararası düzenlemeler, IMO (Uluslararası Denizcilik Örgütü) çatısı altında geliştirilmektedir. Özellikle IGF Kodu düşük flaş noktalı yakıt kullanan gemiler için asgari güvenlik gereklerini tanımlamaktadır. Halihazırda IGF Kodunun temel kapsamı LNG gibi gaz yakıtlarını içermektedir. Metanol ve amonyak için ise ek kılavuzlar ve geçici düzenlemeler oluşturulmuş durumdadır. Aşağıda, metanol ve amonyağın gemi yakıtı olarak kullanımına dair mevcut kısıtlar, depolama ve güvenlik sistemleri ile yakıt ikmal ve sızıntı yönetimiyle ilgili başlıca kurallar özetlenmektedir. Bu kapsamda, uluslararası mevzuat ve uygulamaların gelişimi yakından takip edilmekte ve yeni teknolojilere uygun esnek düzenlemeler yapılmaktadır. Her bir düzenleme, denizcilikte güvenli ve sürdürülebilir bir yakıt dönüşüm sürecini teşvik etmektedir.

2.2.3.1. Amonyak ve metanol yakıtlarının kullanım kısıtları

Metanol, düşük parlama noktası nedeniyle IGF Kodunun kapsamına girer. 2020’de IMO tarafından yayımlanan MSC.1/Circ.1621 sayılı “Methyl/ethyl alcohol as fuel” geçici kılavuzu, metanolün gemilerde emniyetli kullanımına ilişkin ayrıntıları ortaya koymuştur. Bu kılavuza göre, metanol yakıtlı gemilerin tasarım ve işletmesi, konvansiyonel yakıtlı gemilerle en az eşdeğer güvenliği sağlamalıdır. Özellikle yakıt sistemlerinin çift duvarlı olması, tank ve makine dairelerinde gaz algılama, havalandırma ve yangın güvenlik sistemlerinin bulunması şarttır. Metanolün IGF Koduna entegrasyonu için bu geçici kılavuzlar baz alınarak fonksiyonel gereksinimler tanımlanmıştır. Sonuç olarak günümüzde klas kuruluşları (DNV, LR vb.) metanol yakıtlı gemilere dair kendi kurallarını da yayınlamıştır ve fiilen metanol yakıtlı gemi inşası mümkün hale gelmiştir [37,38,39].

Amonyak ise, teknik olarak yüksek parlama sıcaklığı nedeniyle IGF Kodunun mevcut tanımlarında “düşük flaşlı yakıt” olarak kabul edilmemektedir. Bu nedenle, amonyağın yakıt olarak kullanımını kısıtlayan bazı SOLAS ve IGC Kod hükümleri bulunmaktaydı. Örneğin, bir geminin kendi taşıdığı amonyağı yakıt olarak kullanması IGC Koduna göre yasaklanmıştır. Ancak endüstrinin de talebi doğrultusunda, IMO 2024 yılı sonunda düzenlenen MSC 109 toplantısında amonyak yakıtlı gemilere ilişkin geçici yönergeleri onaylamıştır. MSC.1/Circ.1687 numaralı bu kılavuz, amonyak yakıtlı gemilerin tasarımı, donanımı ve işletilmesine yönelik yüksek seviyeli ve hedefe yönelik gereklilikler getirmektedir. Bu gereklilikler bağlayıcı olmamakla birlikte, idareler ve armatörler için amonyak yakıtlı gemi projelerinde yol gösterici nitelikte olacaktır. Ayrıca MSC 109 toplantısında, IGF Kodunun amonyağı da kapsayacak şekilde revize edilmesine ve SOLAS değişikliklerine başlanmıştır. 2026 yılı itibarıyla amonyak yakıtlı gemilerin kod üzerinde resmen tanınması beklenmektedir. Şu anda bir amonyak yakıtlı gemi inşa edilmek istenirse, bayrak devleti onayı ve klas kuruluşu kuralları çerçevesinde, MSC.1/Circ.1687 kılavuzundaki şartlar yerine getirilerek alternatif tasarım onayı yoluyla süreç yürütülmektedir [37,38,40].

Metanol yakıtı için uluslararası standartlar büyük ölçüde mevcut ve uygulanabilir durumdadır (geçici kılavuzlar ve klas kuralları ile). Amonyak yakıtı için ise regülasyonlar yeni şekillenmektedir ve 2025 itibarıyla henüz deneysel/gönüllü uygulama aşamasındadır. Her iki yakıt için de temel kısıt, geminin en az

konvansiyonel yakıt kullanan gemiler kadar güvenli olduğunun kanıtlanması ve onaylanması gereğidir [31,38].

2.2.3.2. Yakıt tankı standartları ve güvenlik sistemleri

Metanol yakıtı ikmal, prensip olarak konvansiyonel sıvı yakıtların (HFO, MDO) ikmaline oldukça benzer bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Metanol, ortam koşullarında sıvı halde bulunduğu için özel kriyojenik pompalar veya gaz kompresörleri gerektirmemektedir. Mevcut liman yakıt tesisleri, malzeme uyumluluğu ve güvenlik revizyonları yapılarak metanol yakıt ikmaline uygun hale getirilebilmektedir. İkmal sırasında dikkat edilmesi gereken başlıca fark, metanolün düşük flaş noktası ve toksisitesidir. Bu nedenle metanol yakıt ikmal işlemlerinde kıvılcım çıkarmayan bağlantı elemanlarının kullanılması, topraklama önlemlerinin alınması ve olası sızıntı durumunda tava veya bariyerlerin bulundurulması gerekmektedir. Metanolün cilt ile teması toksik etki yarattığı için personelin asit geçirmez eldiven, yüz siperi gibi koruyucu ekipman kullanması zorunlu olmaktadır. Bir diğer önemli husus, metanol alevinin görünmez olması nedeniyle ikmal alanında uygun tipte (UV/IR) alev dedektörlerinin bulundurulmasının tavsiye edilmesidir. Metanol ikmal sırasında ortaya çıkabilecek buharların tespiti için noktasal aspirasyonlu gaz dedektörleri veya taşınabilir ölçüm cihazlarıyla sürekli ölçüm yapılması güvenliği artırmaktadır. İkmal bağlantı noktalarında kuru bağlantı valflerinin kullanılması, hortumun ayrılması sırasında damlama ve buhar sızıntısının en aza indirilmesini sağlamaktadır. Günümüzde birçok metanol yakıtlı gemi, mevcut tanker filosunun tecrübesinden de yararlanarak limanlarda ve hatta denizde barçtan gemiye (STS) metanol yakıt ikmal gerçekleştirebilmektedir. Yakıt ikmal prosedürleri için Lloyd's Register ve Methanol Institute tarafından yayımlanan rehberler bulunmaktadır ve bu süreçte kontrol listeleri ile eğitim programları uygulanmaktadır [27,28,37,40].

Amonyak ikmal işlemi, metanol yakıt ikmalıyla kıyaslandığında çok daha katı güvenlik protokolleri altında yürütülmektedir. Henüz dünya genelinde yaygın bir amonyak yakıt ikmal altyapısı bulunmamaktadır, ancak LPG terminallerinde ve tankerlerinde edinilen tecrübeler bu alana temel teşkil etmektedir. İkmal sırasında görev alan personel, tam koruyucu kıyafet ve solunum cihazı kullanmak zorundadır. Amonyak transferi için kullanılan hortum ve manifoldlar, paslanmaz çelik ve uygun

conta malzemelerinden üretilmektedir ve çift valf sistemleriyle donatılmaktadır. Bu valflerin biri gemide, diğeri ise ikmal tesisinde yer almakta ve böylece çift emniyet sağlanmaktadır. İkmal başlamadan önce, gemi ile ikmal tesisi arasında iletişim kurulmakta ve kapsamlı bir Güvenlik İkmal Planı oluşturulmaktadır. Bu planda, acil kesme, kaçak tespiti ve acil tahliye prosedürleri ayrıntılı biçimde belirlenmektedir.

Amonyak zehirli bir madde olduğundan, ikmal sırasında gaz sızıntısı ihtimaline karşı su perdesi veya sis nozulları hazır bulundurulmaktadır. Örneğin, hortum bağlantı noktalarında sürekli su sisi kullanılması olası bir sızıntının anında absorbe edilmesine olanak sağlamaktadır. İkmal hattı, işlemlere başlamadan önce inert gaz (azot) ile purj edilmekte ve hattın içerisinde hava bulunmaması garanti altına alınmaktadır. Sonrasında sıvı transferi yavaşça başlatılmaktadır. İkmal işlemi tamamlandığında, hat yine inert gazla temizlenmekte, böylece boru hattında amonyak kalmaması sağlanmaktadır. Kalan gaz emniyetli bir şekilde ya tankere geri basılmakta ya da falken sistemine yönlendirilmektedir.

Amonyak ikmalı sırasında çevrede güvenlik bölgesi oluşturulmakta, rüzgar yönü dikkate alınarak iskele ve gemi üzerinde gerekli alanlar tahliye edilmektedir. IMO henüz amonyak yakıt ikmalı için özel bir kılavuz yayımlamamıştır; ancak MSC.1/Circ.1687 genel hatlarıyla amonyak ikmalı sırasında ortaya çıkabilecek risklere karşı gemide alınması gereken tedbirleri tanımlamaktadır. Bu tedbirler arasında acil durum durdurma valfleri, otomatik kapatma sistemleri ve iletişim protokolleri yer almaktadır. Sızıntı yönetimi açısından, amonyak ikmal sahalarında döküntü toplama havuzlarından ziyade gaz kaçaklarına yönelik önlemler öne çıkmaktadır. Kaçak meydana geldiği anda alarm verilmesi, bölgenin tahliye edilmesi, suyla nötralizasyon yapılması ve gazın seyreltilerek rüzgarla uzaklaştırılması temel güvenlik yöntemleri arasında bulunmaktadır [32,37,38].

Her iki yakıt için de sızıntı yönetimi hayati önem taşımaktadır. Metanol sızıntıları, parlama ve yangın riski oluşturduğu için hızla tespit edilmelidir. Böyle bir durumda yakıtın tutuşma kaynaklarından uzak tutulması gerekmektedir. Gemilerde metanol kaçağı meydana geldiğinde, sintine suyu sistemine karışmayı önlemek amacıyla ilgili vanalar kapatılmaktadır. Döküntü oluşmuşsa, metanolün suyla tamamen karışabilen yapısından faydalanılarak köpük veya su ile seyreltilmesi sağlanmaktadır. Bu şekilde yanıcı konsantrasyonu düşürülmektedir.

Amonyak sızıntılarında ise en büyük öncelik, oluşan toksik gaz bulutunun yayılmasını engellemektir. Kaçak yapan bölmeye anında azot basılarak daha fazla amonyak çıkışı durdurulmaktadır. Açığa çıkan gaz için gemide sabit su spreyi sistemleri devreye alınmaktadır. Amonyak, suyla reaksiyona girerek amonyum hidroksit oluşturmakta ve gaz fazından uzaklaştırılmaktadır. Bu işlem sonucunda oluşan hafif bazik çözeltinin çevreye zarar vermesini en aza indirmek için biriktirme ve nötralizasyon işlemleri yapılmaktadır. Personel, amonyak kaçağı halinde önceden belirlenmiş güvenli bölgelere çekilmekte ve müdahale ekipleri solunum cihazlarıyla görev yapmaktadır.

Metanol ve amonyak yakıtlı gemilerde Acil Durum Durdurma (ESD) sistemleri bulunmakta ve bu sistemler ana yakıt beslemesini, pompaları ve ilgili valfleri uzaktan tetikleme ile devre dışı bırakmaktadır. Böylece sızıntının büyümesi önlenmektedir. Ayrıca gemilerdeki Acil Durum Müdahale Planları, bu yeni yakıt türlerine göre güncellenmektedir. İtfaiye ekipleri metanol yangınlarına alkol köpüğüyle müdahale etmekte, amonyak kaçaklarında ise su perdesi oluşturarak buhar bulutunu güvenli bir alana yönlendirmektedir.

Metanol ve amonyak gibi alternatif yakıtların gemilerde kullanımı, fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle konvansiyonel yakıtlardan farklı mühendislik ve emniyet tedbirleri gerektirmektedir. Metanol, sıvı fazda depolanabilmesi ve mevcut altyapıya yakın özellikleri sayesinde geçiş sürecinde daha kolay benimsenmektedir. Amonyak ise yüksek toksisitesi ve düşük reaktivitesi nedeniyle daha temkinli ve kademeli bir yaklaşımla değerlendirilmelidir. Uluslararası düzenlemeler de bu doğrultuda gelişmektedir. IGF Kodu ve ilgili IMO kılavuzları kapsamında her iki yakıtın emniyetli kullanımını temin etmeye yönelik standartlar belirlenmektedir. Bu standartlara uyum sağlanarak, alternatif yakıtların denizcilikte güvenli ve çevreye duyarlı bir şekilde yaygınlaşması amaçlanmaktadır [29-39].

2.3. Yeşil Yakıt Besleme Sistemi

Yeşil yakıt besleme sistemi, amonyak (NH_3) ve metanol (CH_3OH) gibi kimyasal hidrojen taşıyıcılarını kullanarak enerji üretim zincirinin ilk adımını oluşturmaktadır. Bu kimyasallar yeşil olarak adlandırılmaktadır, çünkü yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilebilmektedir ve hidrojen taşıyıcısı görevi görmektedir. Amonyak ve metanol, hidrojen elementini kimyasal olarak depolayarak yüksek enerji yoğunluğu sağlamaktadır. Metanol, doğal olarak yüksek hidrojen içeriğine sahip olduğu için

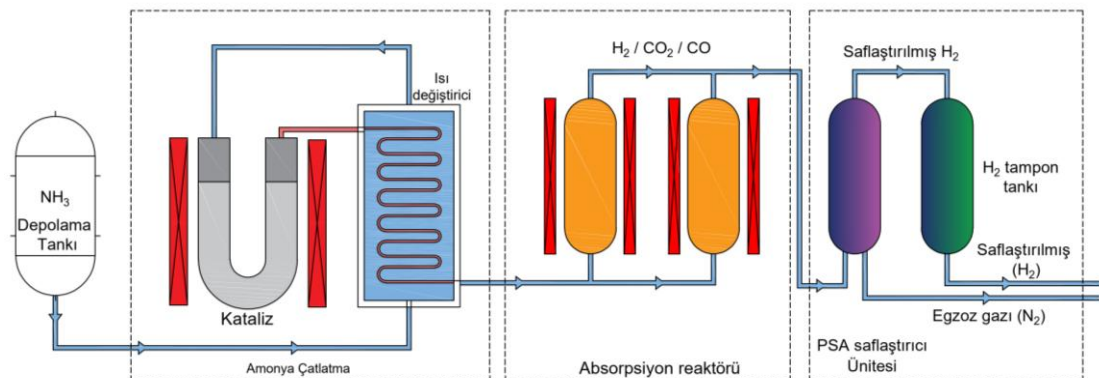
düşük sıcaklıklarda hidrojen elde etmek amacıyla reforme edilebilmektedir. Amonyak ise karbon içermeyen bir yakıt olarak depolanabilmekte ve taşınabilmektedir. Oda koşullarında kolaylıkla sıvılaştırılabilmesi ve mevcut altyapıyla güvenli şekilde taşınabilmesi önemli avantajlar sunmaktadır. Yeşil yakıt besleme sistemi, bu sıvı taşıyıcıların depolanmasını ve kontrollü bir şekilde reaksiyon sistemine beslenmesini sağlamaktadır. Sonraki adımlarda, bu yakıtlardan hidrojen gazı üretilmekte ve enerji dönüşüm zincirine aktarılmaktadır.

2.3.1. Amonyak parçalanması ile hidrojen eldesi

Amonyakın termal ve katalitik parçalanması, hidrojen üretmenin karbon içermeyen bir yoludur. Temel reaksiyon denklem 2.1'deki gibi tanımlanmaktadır.



Bu reaksiyon sonucunda her 2 molekül amonyaktan 3 molekül hidrojen açığa çıkar ve yan ürün olarak azot (N_2) gazı oluşmaktadır. Reaksiyonun gerçekleşebilmesi için genellikle yüksek sıcaklık ve uygun katalizör gereklidir. Endotermik (ısı gerektiren) bir reaksiyon olduğu için sisteme ısı enerjisi girişi sağlanmalıdır. Endüstriyel amonyak parçalama prosesleri, tipik olarak 600–900 °C sıcaklık ve 20–40 bar basınç aralığında, metal bazlı katalizörler (örneğin demir, nikel veya rutenyum katalizörleri) kullanılarak yürütülmektedir. Amonyak gazı bir ısıtıcıda buhar fazına geçirilir ve reaktöre beslenir. Burada katalizör yüzeyinde NH_3 molekülleri hidrojen ve azota ayrıştırılır. Bu sürecin şematik gösterimi Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Amonyak parçalanmasına dayalı hidrojen üretim prensibi.

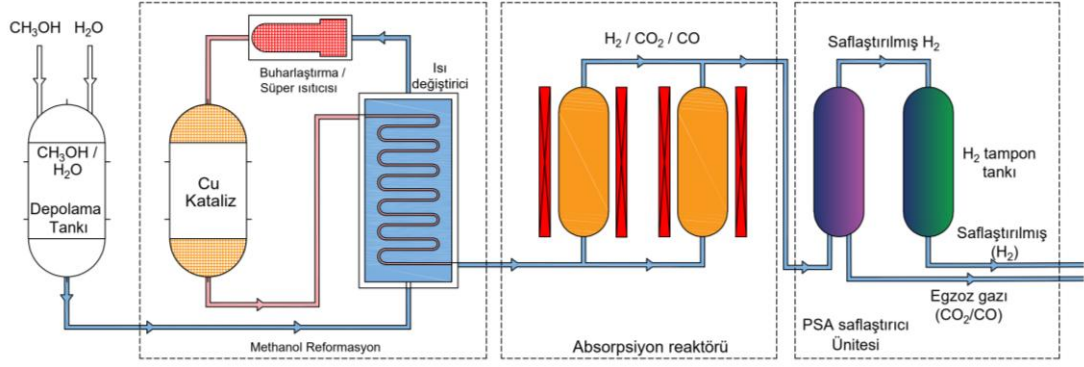
Reaktörden Reaktörden çıkan gaz karışımı büyük oranda hidrojen ve azottan oluşmaktadır. Amonyakın tam dönüşümü için yeterli sıcaklık ve temas süresi sağlanmaktadır; ancak pratikte az miktarda dönüşmemiş NH_3 kalabilmektedir. Oluşan karışım, ilerleyen aşamada soğutularak veya uygun ayırma teknikleriyle işlenerek saf hidrojen elde edilmek üzere hazırlanmaktadır [41,42].

Amonyak kaynaklı hidrojen üretiminin avantajı, sürecin karbon emisyonu oluşturmamasıdır; yan ürün olarak yalnızca azot gazı açığa çıkmaktadır. Ancak, amonyakta depolanmış hidrojenin serbest bırakılması sürecin bir miktar enerji tüketmesini gerektirmektedir. Amonyak parçalama reaksiyonunun endotermik karakteri nedeniyle, amonyağın kimyasal enerji içeriğinin yaklaşık yüzde 10 ila 15'i kadar ek ısı enerjisi dönüşüm esnasında kullanılmaktadır. Uygun ısı geri kazanım tasarımlarıyla, örneğin yakıt hücresinden çıkan atık ısının değerlendirilmesiyle bu enerji kaybı kısmen telafi edilmektedir [41,42].

Buna ek olarak, reaktörden çıkan azot gazı, çoğunlukla inert ve tepkisiz bir gaz olması nedeniyle, gemi uygulamalarında değerli bir yan ürün olarak değerlendirilme potansiyeline sahiptir. Kimyasal tankerlerde yaygın olarak uygulanan inertleme (yüklerin yanıcılığını ve patlama riskini azaltmak amacıyla yükün üzerine inert gaz verilmesi) işlemi için bu azot gazının kullanılması, hem maliyet etkinliği sağlar hem de kaynak verimliliğini artırır. Dolayısıyla, amonyak parçalama sisteminden elde edilen azotun, uygun depolama ve dağıtım altyapısıyla gemide inert gaz olarak kullanılmak üzere yönlendirilmesi teknik ve operasyonel açıdan değerlendirilmeye değerdir.

2.3.2. Metanol reformasyonu ile hidrojen eldesi

Metanol, bünyesindeki hidrojenleri açığa çıkarmak için reformasyon adı verilen kimyasal süreçten geçirilir. Saf metanol veya su ile karıştırılmış metanol buharı, katalitik bir reformasyon ünitesine beslenir ve burada hidrojen açısından zengin bir sentez gazına dönüştürülür. Bu sürece dayalı hidrojen üretim prensibi Şekil 2.5'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Metanol reformasyonuna dayalı hidrojen üretim prensibi.

Metanolün su buharıyla reformasyonu ise denklem 2.2’de belirtilen reaksiyona göre gerçekleşmektedir.



Denklem 2.2, iki aşamalı bir süreçle elde edilmektedir. İlk aşamada, metanolün termal bozunması sonucu denklem 2.3’teki gibi karbonmonoksit (CO) ve hidrojen gazı (H₂) açığa çıkmaktadır.



Ardından, açığa çıkan karbonmonoksit, eklenen su buharı ile su-gaz kaydırma reaksiyonuna girerek karbon dioksit (CO₂) oksitlenmekte ve ilave hidrojen üretilmektedir. Bu ikinci adım denklem 2.4’te gösterilmektedir. Sonuç olarak, bir metanol molekülünden toplam üç hidrojen molekülü üretilmekte ve yan ürün olarak karbon dioksit (CO₂) gazı oluşmaktadır [43].



Metanol reformasyonunda uygun katalizörler (örneğin bakır-çinko bazlı) ve işlem koşulları kullanılmaktadır. Reaksiyon, amonyak parçalanmasına kıyasla daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşebilmektedir. Tipik bir metanol buhar reformasyonunda sıcaklık 250–300°C civarındadır ve işlem genellikle atmosferik ya da hafif basınç altında yürütülmektedir. Reaksiyon endotermik olduğu için reaktöre ısı sağlanması gerekmektedir. Pratikte bu ısı, dış bir ısıtıcıyla veya metanolün kısmi oksidasyonu ile sağlanabilmektedir. Kısmi oksidasyon yönteminde, metanolün bir kısmı oksijen ile yakılarak ısı üretilmekte ve bu sırada denklem 2.5’te gösterilen reaksiyon gerçekleşmektedir.



Bu ekzotermik (ısı açığa çıkaran) reaksiyon, reformasyon sürecinin ısı ihtiyacını karşılamaya yardımcı olmaktadır. Isı yönetimi açısından, metanol reformasyonu bazen bu endotermik ve ekzotermik adımların birleşimi olan ototermal reforming şeklinde tasarlanmaktadır. Reformasyon sistemi çıkışında hidrojen zengin bir gaz karışımı elde edilmektedir. Bu karışım çoğunlukla H_2 , CO_2 ve az miktarda yan ürün gazları (CO , metan ve su buharı gibi) içermektedir. Elde edilen gaz karışımının, özellikle yakıt hücrelerinde kullanılacaksa, saf hidrojen olarak ayrıştırılması gerekmektedir. Karbonmonoksit, düşük seviyelerde kalsa bile, proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin katalizörlerini zehirleyebileceğinden bu gazın uzaklaştırılması kritik öneme sahiptir [43,44,45].

2.3.3. Hidrojen saflaştırılması

Metanol reformasyonu ve amonyak parçalanması çıkışından elde edilen hidrojen zengini karışım gazının, yakıt hücresinde kullanılmadan önce saflaştırılması gerekmektedir. Bu saflaştırma adımı, metanol reformasyonuna ve amonyak parçalanmasına dayalı sistemlerde gösterildiği gibi, Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te yer alan PSA ünitesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu süreçte, karışım içindeki hidrojen dışı bileşenlerin uzaklaştırılmasıyla %99'dan yüksek saflıkta H_2 elde edilmesi hedeflenmektedir. Yaygın olarak kullanılan teknik, Basınç Salınımlı Adsorpsiyon (PSA) yöntemidir [42,44,46].

Hidrojen saflaştırmada Basınç Salınımlı Adsorpsiyon (PSA) yöntemi, hidrojen bakımından zengin bir gaz akımındaki hidrojen dışı bileşenlerin yüksek basınç altında seçici olarak katı bir yüzeye tutundurulması esasına dayanmaktadır. Bu amaçla genellikle zeolit, aktif karbon veya moleküler elek gibi gözenekli adsorban malzemeler kullanılmaktadır. Yüksek basınç uygulandığında karışımındaki CO_2 , CO , CH_4 , N_2 , H_2O buharı ve dönüşmemiş NH_3 gibi safsızlık gazları adsorban gözeneklerinde tutulur. Hidrojen molekülleri ise küçük boyutları ve uygun difüzyon özellikleri sayesinde adsorban tarafından tutulmaz ve yataktan serbestçe geçerek ürün akışına katılır. Bu sayede PSA kolonunun çıkışında yüksek saflıkta hidrojen gazı elde edilmektedir.

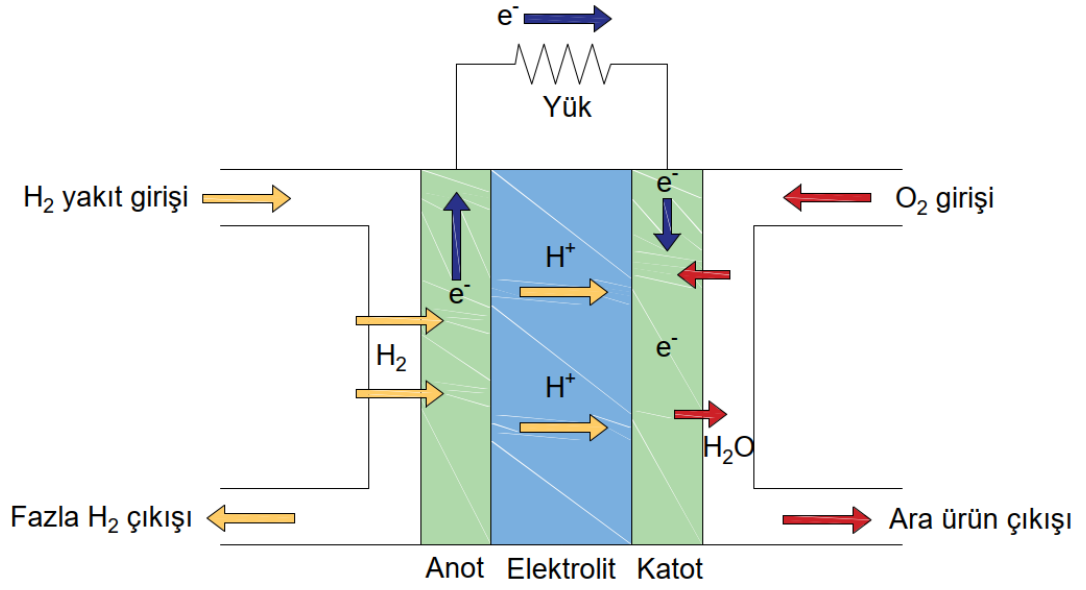
Sürecin bir sonraki adımında, doymuş hale gelen adsorban yatağının yenilenmesi gerekmektedir. Bunun için kolondaki basınç düşürülür ve adsorbe edilen gazlar serbest

bırakılır. Düşük basınç altında çıkan bu atık gaz akımı sistemden temizleme gazı olarak uzaklaştırılır ve adsorban malzeme yeniden kullanılabilir duruma getirilir. Genellikle sürekli ve kesintisiz bir saflaştırma sağlamak amacıyla birden fazla PSA kolonu paralel olarak çalışmakta; kolonlar dönüşümlü şekilde yüksek basınçta adsorpsiyon ve düşük basınçta desorpsiyon adımlarını gerçekleştirmektedir [46,47].

PSA sistemi doğru şekilde tasarlandığında, %99.9 ve üzeri saflıkta hidrojen üretimi mümkün olmaktadır. Elde edilen saf hidrojen içindeki kalan safsızlıkların toplamı çoğunlukla birkaç ppm mertebesindedir. Özellikle proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücrelerinde, CO içeriğinin 10 ppm'in altına indirilmesi gerekmektedir. PSA sistemleri bu hassasiyeti karşılayacak şekilde planlanmaktadır. Saflaştırma işlemi sırasında hidrojenin küçük bir bölümü temizleme gazı ile birlikte sistemden uzaklaşabilmektedir. Ancak, PSA sistemlerinde hidrojen geri kazanım verimi çoğunlukla %70-90 aralığında gerçekleşmektedir. Saflaştırma ünitesinden çıkan atık gaz akımı, hidrojen dışındaki adsorplanan bileşenleri ve bir miktar hidrojeni içermektedir. Bu gaz, yakıt hücresi sisteminin genel verimliliğini artırmak amacıyla enerji geri kazanımı için değerlendirilebilmektedir. Uygulamada bu atık gaz, bir yanma odasında yakılarak reformasyon veya parçalama prosesleri için gerekli ısının bir kısmını karşılamakta veya başka bir ısıl işlemde kullanılmaktadır. Sonuç olarak, PSA saflaştırması ile yüksek saflıkta hidrojen elde edilirken, sistem genelinde enerji geri kazanımı da sağlanabilmektedir [41,45].

2.3.4. Hidrojenden elektrik üretimi

Saf hidrojen gazı, yakıt hücresi sistemine beslenerek kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü aşamaya ulaşmaktadır. Yakıt hücresi, hidrojen gibi bir yakıt ile oksijen arasında elektrokimyasal reaksiyon gerçekleştirerek doğrudan elektrik üreten bir cihazdır. Bu sistemin yapısı ve çalışma prensibi Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Yakıt hücresi, elektrolit tarafından ayrılmış iki elektrot bölgesinden oluşmaktadır. Anot (negatif elektrot, yakıt tarafı) ve katot (pozitif elektrot, oksitleyici taraf) olarak adlandırılan bu bölgelerde, hidrojen gazı sürekli olarak anot tarafına, oksijen içeren hava ise katot tarafına beslenmektedir [48]. Yakıt hücresinin içerisinde yer alan katalizörler yardımıyla anot ve katot reaksiyonları gerçekleşmektedir.



Şekil 2.6 Proton değişim membranlı yakıt hücresi (PEMFC) yapısı.

Anot reaksiyonu, denklem 2.6'da gösterildiği gibi gerçekleşmektedir. Hidrojen molekülü, katalizör etkisiyle iki proton ve iki elektrona ayrılmaktadır.



Katot reaksiyonu, denklem 2.7'de gösterildiği gibi gerçekleşmektedir. Katotta, oksijen molekülü, gelen protonlar ve elektronlarla birleşerek su buharı oluşturmaktadır.



Anot tarafında ortaya çıkan elektronlar, harici bir devre üzerinden katoda doğru akarken elektrik akımını oluşturmaktadır. Böylece bir elektrik yükü dolaşımı sağlanmaktadır. Protonlar ise yarı geçirgen elektrolit (proton değişim membranı) üzerinden geçerek katoda ulaşmaktadır. Katotta oksijen ile birleşen proton ve elektronlar sonucunda su üretimi gerçekleşmektedir. Bu elektrokimyasal süreç sonucunda açığa çıkan elektrik enerjisi doğru akım şeklindedir ve harici yüklerde kullanılabilir [49,50]. Yakıt hücresinin toplam reaksiyonu, denklem 2.8'de gösterildiği gibi, konvansiyonel yanma tepkimesiyle aynıdır.



Hidrojen yakıt hücresi çalışırken temel ürün su olmaktadır, bu nedenle karbon emisyonu veya zararlı atık gaz oluşmamaktadır. Yakıt hücreleri, yakıtın enerjisini termik bir çevrime girmeden doğrudan elektrik enerjisine dönüştürdüğü için oldukça

verimli sistemlerdir. Proton değişim membranlı yakıt hücresi, kimyasal enerjinin yaklaşık %50-60'ını elektrik enerjisine çevirebilmektedir [51]. Bu değer, konvansiyonel içten yanmalı motorların yaklaşık %20-30 seviyesindeki verimleriyle karşılaştırıldığında oldukça yüksek bir performans sunmaktadır. Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücresi (SOFC tipi) ise %60 civarına varan elektriksel verimlere ulaşabilmektedir. Yakıt hücresi sistemleri modüler yapıda hücre yığınlarından oluşmaktadır ve istenen güç düzeyine göre kolayca ölçeklendirilebilmektedir. Sürekli hidrojen ve oksijen beslemesi yapıldığı sürece reaksiyonlar kesintisiz devam etmektedir; bu özelliğiyle yakıt hücresi, teorik olarak yakıt bitmediği müddetçe aralıksız elektrik üretebilmektedir [50,51].

Bir yakıt hücresi sisteminde, hücre yığını dışında BoP (Balance of Plant) olarak adlandırılan yardımcı alt sistemler de yer almaktadır. Hidrojen ve hava akışını düzenleyen kompresör, fan ve pompalar, reaksiyon sırasında ortaya çıkan ısıнын yönetimi için soğutucular veya ısı değiştiriciler ile üretilen doğru akım elektriğin kullanılabilir forma getirilmesini sağlayan güç dönüştürücüler (DA/DA veya DA/AA) bu kapsamda yer almaktadır. Hidrojenin yakıt hücresine girişinden önce uygun basınç ve nem seviyesine getirilmesi (gerektiğinde nemlendirme, basınç regölasyonu) de BoP fonksiyonları arasında bulunmaktadır. Tüm bu bütünleşik sistem sayesinde, yeşil yakıt kaynaklı kimyasal enerji nihai olarak elektrik enerjisi olarak kullanıma sunulmaktadır [51,52].

2.3.5. Enerji dönüşüm verimliliği ve entegrasyon

Amonyak veya metanol yakıttan elektriğe uzanan bu çok aşamalı enerji dönüşüm zincirinde, her bir adım sistemin toplam verimliliğini belirlemektedir. Hidrojen üretimi aşaması, yani amonyak parçalama veya metanol reformasyonu, belirli bir termokimyasal verimle çalışmaktadır. En ideal koşullarda dahi, endotermik reaksiyonların gerektirdiği ısı enerjisi, yakıtın kimyasal enerji stoğunun bir kısmını tüketmektedir. Örneğin, metanolün hidrojen ve karbondioksit'e dönüştürölmesi sürecinde, gerekli reaksiyon ısısı genellikle metanolün bir bölümünün yanmasıyla sağlanmaktadır; böylece metanolün sahip olduğu enerjinin yaklaşık %70-80'i hidrojenin kimyasal enerjisi olarak geri kazanılabilmektedir. Geri kalan enerji ise sistemden ısı kaybı olarak çıkmaktadır. Benzer şekilde, amonyak parçalama sürecinde de amonyakın kimyasal enerjisinin bir kısmı, hidrojenin kimyasal enerjisine

dönüşmeden ısı olarak kaybedilmektedir. PSA saflaştırması, yüksek saflıkta hidrojen elde etmek için zorunlu olmakla birlikte, bu aşamada da küçük miktarda hidrojen kaybı yaşanabilmektedir. Bu kayıp, adsorpsiyon sırasında tutulan hidrojenin temizleme gazı ile sistemden uzaklaştırılması nedeniyle oluşmaktadır ve genellikle toplam hidrojenin %5-15'i kadardır. Bu nedenle PSA'nın hidrojen geri kazanım verimi %85-95 aralığında olabilmektedir. Ancak, PSA saflaştırmasından çıkan atık gazın enerjisi uygun entegrasyonla ısı olarak geri kazanılabilmektedir; bu sayede verim kayıplarının etkisi azaltılabilmektedir [46-52].

Yakıt hücresinin elektriğe dönüşüm verimi ise sınırlı olup, tipik bir PEM yakıt hücresinde alt ısı değer (LHV) baz alındığında %50 civarında, üst ısı değer (HHV) baz alındığında %40 civarındadır. Yüksek sıcaklıklı yakıt hücrelerinde bu oran biraz daha yüksek olabilir. Yakıt hücresinde kullanılmayan enerji çoğunlukla düşük sıcaklıklı atık ısı olarak açığa çıkar. Eğer sistem tasarımında bu atık ısı kullanılır (örneğin birleşik ısı-güç sistemi ile ısının da kullanılması, yani kojenerasyon), toplam enerji verimliliği önemli ölçüde artabilir (elektrik + ısı birlikte %80-90'a çıkabilir). Fakat burada bahsedilen elektriksel verim, yalnızca elektrik üretimini esas alan değerlerdir.

Tüm bu adımların ardışık etkisiyle, yakıtın kimyasal enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünde, sistemin genel verimi, her bir aşamanın bireysel verimlerinin çarpımıyla hesaplanmaktadır. Örneğin, amonyaktan hidrojen üretiminin %75 verimle gerçekleştiği, PSA ile hidrojenin %90 oranında geri kazanıldığı ve yakıt hücresinin %50 elektrik verimi sağladığı bir durumda, genel enerji dönüşüm verimi $0.75 \times 0.90 \times 0.50 \approx \%34$ seviyesinde olmaktadır. Bu oran, doğrudan elektrolizle elde edilen ve doğrudan kullanılan hidrojene göre daha düşük olmakla birlikte, amonyak veya metanol gibi kimyasal taşıyıcıların kullanılmasının sağladığı operasyonel kolaylık ve güvenlik avantajları dikkate alındığında kabul edilebilir düzeydedir. Özellikle hidrojenin sıvı taşıyıcılar içerisinde depolanıp uzak mesafelere taşınması, doğrudan basınçlı hidrojen taşımaya kıyasla daha az enerji kaybıyla ve daha güvenli olarak gerçekleştirilebilmektedir. Bu sebeple, bazı uygulamalarda yeşil yakıtlar kullanılarak toplam elektrik verimliliği %30-50 aralığında kalsa da, yenilenebilir enerjinin taşınması ve elektrik enerjisine dönüştürülmesi süreci tercih edilebilmektedir [42-52].

BÖLÜM 3. ALARM, İZLEME VE KONTROL SİSTEMLERİNDE VERİ YÖNETİMİ VE MÜDAHALE SÜREÇLERİ

3.1. Giriş

E-yakıt sisteminin (metanol reformeri, amonyak parçalama ünitesi, PSA saflaştırma ünitesi, yakıt hücresi ve batarya sistemi gibi) tüm bileşenleri, yüksek düzeyde güvenlik ve kontrol sistemleri gerektiren entegre bir yapı oluşturmaktadır. Bu sistemlerde, olası tehlikeli durumların önceden tespit edilip önlenmesi ve herhangi bir anomali durumunda derhal müdahale edilebilmesi operasyon güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, veri toplama, işleme, dönüştürme ve iletim mekanizmalarının verimliliği, doğrudan gemi emniyetini etkilemektedir. Özellikle yeni nesil yakıt ve güç teknolojilerinin kullanılması ile birlikte, verinin gerçek zamanlı olarak yönetilmesi ve ilgili güvenlik protokollerinin hızlı bir şekilde uygulanabilmesi zorunlu hâle gelmiştir [53,54,55].

Bu kapsamda, sistemde üretilen tüm sensör verilerinin (sıcaklık, basınç, gaz sızıntısı, batarya durumu, hücre sağlığı gibi) bir veri toplama ve işleme ünitesi tarafından sürekli olarak izlenmesi gerekmektedir. Elde edilen veriler, ilgili kontrol birimlerine (merkezi alarm izleme panelleri, uzaktan izleme sistemleri gibi) iletilir ve burada önceden tanımlı eşik değerlere göre analiz edilerek sistemin çalışma durumu anlık olarak değerlendirilir. Verinin sürekli erişilebilir ve güvenli olması, kritik alarm ve müdahale gerektiren durumların operatöre veya otomasyon sistemine zamanında aktarılması için elzemdir [53].

Acil Durum Durdurma (ESD) kontrol fonksiyonu, bu entegre sistemin en kritik güvenlik unsurlarından biridir. ESD fonksiyonu, geminin karmaşık alt sistemlerinin güvenli ve kontrollü şekilde devreden çıkarılmasını sağlayan merkezi bir koruma mekanizmasıdır. Acil Durdurma, Alt Sistem Durdurma Sinyali, Durdurma Komutu ve Sıfırlama gibi farklı giriş sinyallerini işleyen bu sistem, olası bir acil durumda

operasyonel riskleri asgari seviyeye indirmeyi hedefler. ESD'nin etkinliği, hem manuel hem de otomatik tetikleme koşullarının doğru ve hızlı bir şekilde uygulanmasına bağlıdır. Ayrıca ESD prosedürleri kapsamında, sistemin güvenli şekilde durdurulması, alt sistemlerin birbirini tetikleyerek zincirleme bir şekilde güvenli konuma alınması ve yeniden başlatma senaryolarının güvenilir biçimde yönetilmesi sağlanmaktadır [37,38,53,55,56].

Yeni teknolojilerin entegre edilmesiyle birlikte, sistem karmaşıklılığının artması, ESD kontrol algoritmalarının daha esnek ve uyarlanabilir olmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, ESD sisteminin her bir bileşenle uyumlu şekilde çalışması, verilerin anında işlenip iletilmesi ve gerekli durumlarda müdahalenin gecikmeden gerçekleşmesi sağlanmalıdır. Sonuç olarak, güvenlik ve kontrol sistemlerinin veri işleme, iletim ve eylem mekanizmaları, operasyonel riskleri en aza indirmek ve sistem güvenilirliği ile gemi emniyetini en üst düzeyde tutmak için bütüncül bir yaklaşımla tasarlanmalıdır [53,57].

3.2. Sistem Ön Koşulları ve Başlangıç Durumları

Bu bölümde, sistem bütünlüğünün ve operasyonel güvenliğin sağlanması amacıyla, farklı alt sistemler için gerekli ön koşullar, başlangıç durumları, alınacak aksiyonlar ve beklenen sonuçlar ele alınmaktadır. Alarm ve kontrol sistemlerinde herhangi bir aktif alarmın bulunmaması ve tüm alt sistemlerin tam kapasiteyle çalışıyor olması kritik öneme sahiptir. Sistem bütünlüğünü korumak için düzenli kontrol ve onay işlemleri gerçekleştirilmektedir. Potansiyel arızalara hızla müdahale edilmesi sistemin sürekliliğini sağlamaktadır.

Güç kaynağı açısından, kontrol ve izleme bileşenlerinin sürekli ve güvenli şekilde enerji ile beslenmesi zorunludur. Bu tip birimlerin enerji beslemesinde herhangi bir kesinti veya arıza meydana geldiğinde, hızla müdahale edilmekte ve sistemin normal çalışma koşullarına döndürülmesi sağlanmaktadır. Alarmların da aynı şekilde giderilmesi gerekmektedir. İletişim ağı, veri aktarımı ve sistemler arası kontrolün sürekliliği açısından bir diğer kritik unsur olarak öne çıkmaktadır. Ethernet döngü arızası veya alt sistemler arasında iletişim kopukluğu gibi durumlarda, veri bütünlüğünün ve kontrol fonksiyonlarının kesintiye uğramaması için sorunlara anında müdahale edilmektedir.

Batarya paketi, yakıt hücresi sistemleri, amonyak parçalama, metanol reformatörü, PSA saflaştırıcı ve PV panel sistemleri gibi tüm ana enerji ve üretim alt sistemlerinin güvenli, verimli ve kararlı çalışabilmesi için önemli parametrelerin sürekli izlenmesi gerekmektedir. Batarya ve yakıt hücresi sistemlerinde SoC, sıcaklık, hidrojen besleme basıncı ve güç çıkışı gibi değişkenler dikkatle takip edilmektedir. Sapmalar tespit edildiğinde, şarj veya deşarj hızlarının ayarlanması ya da ilgili bileşenlerin kontrol edilmesi gibi düzeltici aksiyonlar alınmaktadır. Benzer şekilde, amonyak parçalama ve metanol reformatörü gibi hidrojen üretiminde görevli sistemlerde operasyonel basınç, sıcaklık ve akış oranları kontrol altında tutulmaktadır. Herhangi bir sapmada, hidrojen üretim istikrarı sağlanana kadar parametreler yeniden düzenlenmektedir. PSA saflaştırıcı ünitesinde ise hidrojenin saflığı ve basıncı izlenmektedir. Anormallikler hızla düzeltilmekte ve yüksek saflıkta hidrojen temini ile güvenli operasyon sürdürülmektedir [56,57,59].

Bu yaklaşım, tüm alt sistemlerin güvenilir ve tutarlı biçimde çalışmasını, olası arızaların veya sapmaların belirgin protokollerle tespit edilmesini ve hızla müdahale edilmesini mümkün kılmaktadır. Böylece genel sistem performansı ve operasyon güvenliği etkin şekilde korunmaktadır.

3.3. Arıza Türleri ve Etkileri Analizi

Bu bölümde, PV sistemleri, yakıt hücreleri, hidrojen saflaştırıcıları, amonyak parçalayıcıları ve metanol reformer sistemlerini içeren bir yapının ön değerlendirme niteliğinde arıza türleri ve etkileri analizi sunulmaktadır. Analiz süreci, öncelikle sistem sınırlarının tanımlanması ve tüm kritik bileşenlerin belirlenmesi ile başlamaktadır. Her bir bileşenin potansiyel arıza modları (örneğin PV sisteminde invertör arızası, metanol reformer sisteminde katalizör bozulması, yakıt hücresinde membran sorunları gibi) detaylı şekilde tespit edilmektedir. Bu arıza modlarının güvenlik, operasyonel işlevsellik ve çevresel sonuçlar üzerindeki olası etkileri değerlendirilmekte ve analiz edilmektedir. Her bir arıza için kök nedenler (örneğin termal stresler) belirlenmekte, arızaların oluşma olasılığı ve şiddeti analiz edilerek risk derecelendirmesi yapılmaktadır. Bu risk seviyelerine bağlı olarak etkili azaltma stratejileri geliştirilmektedir. Önleyici bakım çalışmaları, kritik bileşenler için yedekli sistemler ve çevresel izleme prosedürleri gibi uygulamalar planlanmaktadır [32,54,55].

Bu arıza türleri ve etkileri analizi kapsamında, sistemdeki her bir alt birim için potansiyel arıza modları ve ilişkili riskler aşağıda özetlenmiştir:

- PV sistemleri, elektriksel arıza, ark oluşumu, fiziksel hasar ve aşırı sıcaklık gibi riskler taşımaktadır. Bu arızalar sonucunda güç kaybı, verimsizlik veya yangın riski ortaya çıkmaktadır. Önleyici bakım, koruyucu muhafaza, sıcaklık izleme ve acil kapama sistemleriyle riskler azaltılmaktadır.
- Yakıt hücresi sistemleri, yakıt sızıntısı, aşırı ısınma, elektromanyetik girişim ve hidrojen saflığı kaybı gibi başlıca riskler içermektedir. Bu tür arızalar, yangın, patlama veya verimlilik kaybına yol açabilmektedir. Düzenli izleme, acil kapama sistemleri, uygun koruma ve periyodik bakım uygulamaları gereklidir.
- PSA saflaştırıcı birimleri için basınç artışı, hidrojen saflığı sorunları ve vana arızaları risk oluşturmaktadır. Patlama ve verim kaybı tehlikesi ortaya çıkabilmektedir. Basınç tahliye sistemleri, saflık sensörleri ve düzenli denetimler ile güvenlik sağlanmaktadır.
- Amonyak parçalayıcılar, katalizör bozulması, gaz sızıntısı ve aşırı basınç gibi riskler barındırmaktadır. Bu riskler, verim azalması ve patlama tehlikesi oluşturabilmektedir. Düzenli bakım, havalandırma ve basınç tahliye sistemleri ile önlemler alınmaktadır.
- Metanol reformer sistemlerinde termal kaçak, katalizör bozulması ve metanol sızıntısı önemli arıza modlarıdır. Bu durumlar yangın veya verimlilik kaybına sebep olabilmektedir. Termal sensörler, otomatik kapama ve periyodik bakım önlemleri alınmaktadır.
- Batarya sistemleri ve ana dağıtım panosu, elektromanyetik girişim, aşırı şarj ve termal kaçak gibi risklerle karşı karşıyadır. Bu durumlar, sistem kararlılığını ve güvenliğini tehdit etmektedir. İzleme, koruma, soğutma ve elektromanyetik girişimi önleyici tedbirlerle riskler azaltılmaktadır.
- Kontrol ve izleme sistemlerinde ise iletişim veya sensör arızaları kontrol kaybına yol açabilmektedir. Yedekli iletişim altyapısı, ağ bakımı ve sensör yedekliliği gibi uygulamalar bu tür risklere karşı önem taşımaktadır.

Bu analiz ile, sistemin her bir bileşeninde ortaya çıkabilecek potansiyel arızalar ve bunların olası etkileri bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, sistemin güvenli ve sürdürülebilir işletimi için alınması gereken önlemleri ortaya koymaktadır.

- Farklı konfigürasyonlarda hibrit sistemin fonksiyonel testi yapılmaktadır.
- Farklı güç kaynakları arasında aktif yük paylaşımının doğrulanması sağlanmaktadır.
- Reaktif yük paylaşımının kontrolü gerçekleştirilmektedir.
- Ani yük ayrılması ve yük artışı ile batarya sisteminin sına testi yapılmaktadır.
- Bataryaların maksimum şarj kapasitesinin testi tamamlanmaktadır.
- Arıza anında sistem kararlılığının değerlendirilmesi gereklidir.
- Evirici yeniden bağlandığında pre-charge sisteminin kontrolü sağlanmaktadır.
- Alarmların doğru çalışmasının testi düzenli olarak yapılmaktadır.
- Farklı işletim modlarında güç kalitesinin değerlendirilmesi gerçekleştirilmektedir.

Tüm bu kontroller, sistem güvenilirliğini ve emniyetini sağlamak için periyodik olarak gerçekleştirilir. Sonuç olarak, bu arıza türleri ve etkileri analizi çalışmasında, tüm sistemlerin bütünleşik şekilde güvenli ve güvenilir çalışması garanti altına alınmakta ve her türlü koşul altında operasyonel bütünlük korunmaktadır [32,37,38,56,57].

3.4. Güvenlik ve Kontrol Sistemlerinde Veri İşleme, İletim ve Eylemler

E-yakıt, PV paneli ve batarya sistemi için tasarlanan güvenlik ve kontrol sistemleri, öncelikli olarak operasyonel güvenlik ve verimliliğin sağlanmasına odaklanmaktadır. Her bir konteyner, hidrojen, amonyak ve metanol buharı gibi tehlikeli gazların birikmesini önlemek amacıyla havalandırma, gaz algılama ve sıcaklık kontrol sistemleriyle donatılmıştır. Bu sistemler, sürekli hava sirkülasyonunu sağlamak için HVAC kullanarak, riskleri azaltmakta ve konteyner içinde güvenli koşulların korunmasını temin etmektedir [62,63].

Gaz algılama sistemleri, sıcaklık kontrolü ve yangın koruma; konteyner bazlı E-yakıt ve batarya sistemlerinin güvenliğinde temel unsurlardır. Sensörler, hidrojen ve amonyak gibi tehlikeli gazları tespit ederek otomatik kapatma vanalarını devreye alır

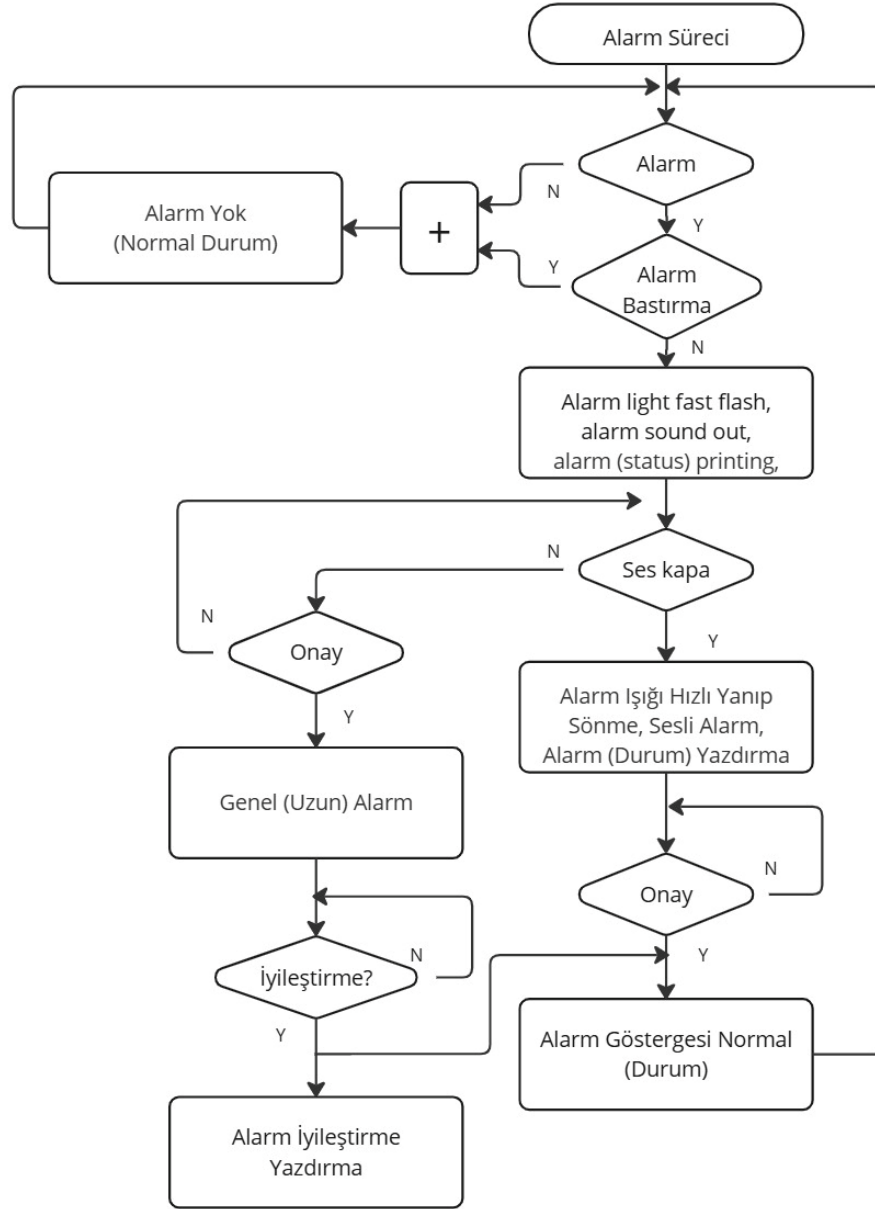
ve havalandırmayı artırır; böylece tehlikeli maddelerin yayılımı engellenir. Gelişmiş termal yönetim sistemleriyle yapılan sıcaklık düzenlemesi, metanol reformer, amonyak parçalayıcı ve PSA saflaştırıcı birimlerinin verimli çalışmasını güvence altına alır. Yangın koruma, her bir konteynerin ihtiyacına özel olarak köpük bazlı, CO₂ veya çoklu ajanlı sistemlerle sağlanmakta; bu sayede kimyasal ve termal riskler etkin biçimde yönetilmektedir. Dağıtım panosu üzerindeki elektriksel izleme cihazları da gerçek zamanlı veri sağlayarak sistemlerin güvenli işletim sınırları içinde kalmasını ve gerekli durumlarda anında müdahale edilmesini mümkün kılmaktadır [63,63,65].

Bu güvenlik sistemlerinden elde edilen gaz dedektörleri, sıcaklık sensörleri ve elektriksel izleme cihazlarından alınan veriler, gerçek zamanlı olarak geminin merkezi kontrol sistemine iletilmekte ve işlenmektedir. Önceden tanımlanmış eşik değerlerine ulaşıldığında, otomatik olarak havalandırma ayarı, sistemlerin kapatılması veya yangın söndürme sisteminin devreye alınması gibi güvenlik eylemleri tetiklenmektedir. Veri işleme ve yanıt mekanizmalarının bu kesintisiz entegrasyonu, hızlı ve etkili müdahale imkânı sunarak, geminin ve mürettebatın güvenliğini her an en üst düzeyde tutmaktadır [64,66].

3.4.1. Alarm süreci, veri dönüştürme, iletim ve erişilebilirlik yönetimi

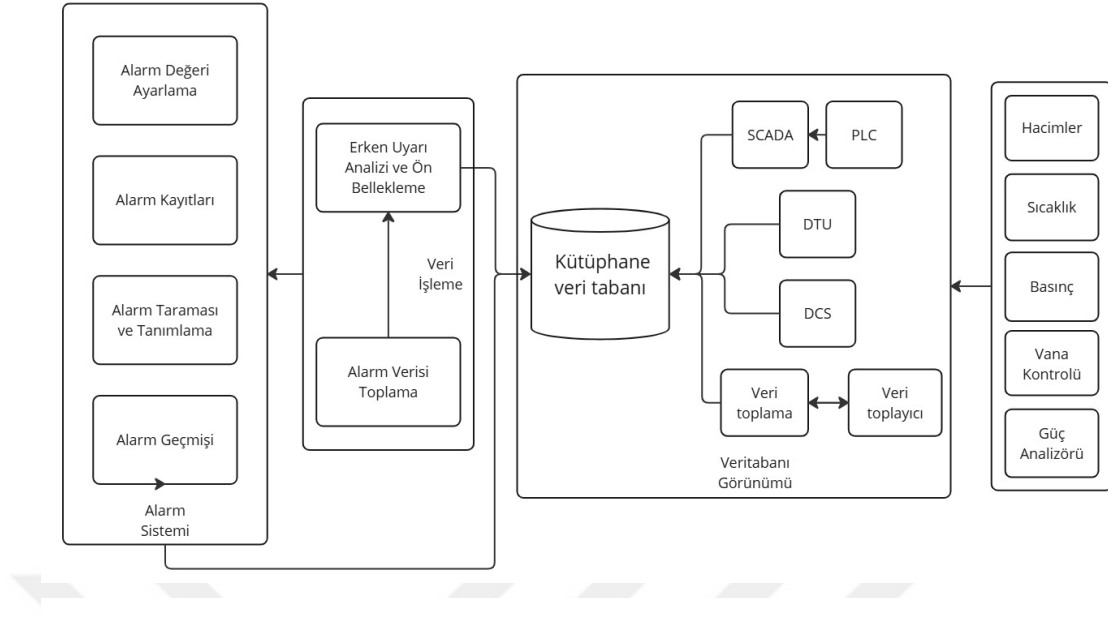
Süreç, olağandışı bir durumun tespitiyle başlamaktadır ve bu tespit bir alarmı tetiklemektedir. Ardından sistem, alarmın bastırılıp bastırılmadığını kontrol etmektedir. Eğer alarm bastırılmamışsa, alarm ışığı hızlı şekilde yanıp sönmekte, sesli alarm devreye girmekte ve alarm durumu kaydedilmektedir. Operatörden alarmı onaylaması istenmektedir. Alarm onaylanır fakat anormal durum devam ederse, sistem genel (uzun süreli) alarm durumuna geçmektedir. Sonrasında ise, sistemi tekrar normal çalışma koşuluna döndürmek amacıyla iyileştirme süreci başlatılmaktadır. İyileştirme durumu da kaydedilmekte ve başarılı olunursa sistem normal çalışma durumuna geri dönmektedir.

Alarmlar sistematik bir şekilde yönetilmesini ve operatörlerin izleyeceği net protokollerin tanımlanmasını sağlamaktadır. Bu yapı, gemi emniyeti ve operasyonel verimlilik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Şekil 3.1’de verilen akış diyagramı, geminin güvenlik ve kontrol sistemlerindeki alarm sürecini göstermektedir.



Şekil 3.1: Alarm akış diyagramı.

Havalandırma sistemleri, gaz dedektörleri, sıcaklık kontrol üniteleri ve yangın koruma sistemleri gibi çeşitli bileşenlerden toplanan veriler, veri kütüphanesinde saklanıp işlenebilecek standart bir formata dönüştürülmektedir. Bu adım, metanol reformer, amonyak parçalama, PSA ünitesi, yakıt hücresi, PV paneli ve batarya bölmesi gibi farklı sistemlerin yönettiği verilerin, geminin kontrol ağı içinde uyumlu ve kullanılabilir olmasını sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Şekil 3.2’de, geminin güvenlik ve kontrol sistemlerinde veri dönüştürme, iletim ve erişilebilirlik yönetimine ilişkin süreç gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Güvenlik ve kontrol sistemi veri akış diyagramı.

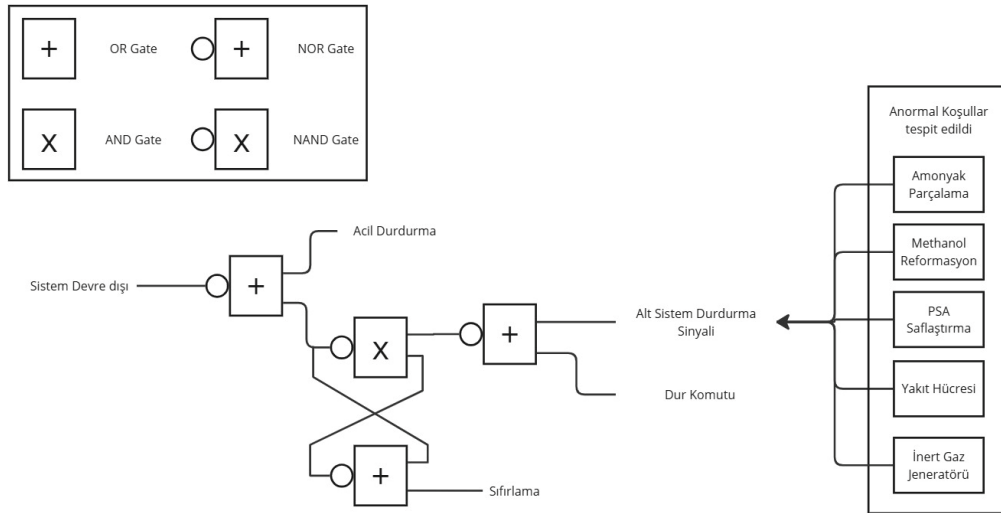
Bu verilerin iletimi, DTU, DCS ve diğer kontrol üniteleri gibi sistemler aracılığıyla sağlanmaktadır ve sensörlerden gelen bilgilerin kesintisiz bir şekilde veri kütüphanesine akışı garanti altına alınmaktadır. Güvenilir veri iletimi, gerçek zamanlı izleme ve kontrolün sürdürülmesi açısından hayati öneme sahiptir. Herhangi bir gecikme veya veri kaybı, geminin güvenliğini ve operasyonel verimliliğini tehlikeye atmaktadır. Gaz dedektörleri ve sıcaklık sensörlerinden gelen verilerin anında iletilmesi gereklidir. Bu sayede, tespit edilen anormalliklerde havalandırma ayarlarının değiştirilmesi veya yangın söndürme sistemlerinin devreye alınması gibi otomatik güvenlik aksiyonları derhal tetiklenmektedir [66,67].

Erişilebilirlik Yönetimi, ihtiyaç duyulan tüm verilerin her zaman erişilebilir olmasını garanti altına almak için kritik bir rol üstlenmektedir. Tüm veriler gemi kütüphanesinde depolanmaktadır ve bu sayede gerçek zamanlı karar alma süreçlerinden sorumlu SCADA, PLC ve diğer kontrol sistemleri tarafından erişilebilir hale gelmektedir. Olası veri kayıplarının önüne geçmek ve sistem arızalarında dahi sürekliliği sağlamak amacıyla, erken uyarı analizleri ve ön bellekleme gibi yedeklilik mekanizmaları devreye alınmaktadır. Bu durum, özellikle konteyner bazlı E-yakıt sistemlerinde güvenlik protokollerinin yönetimi açısından kritik öneme sahiptir. Zamanında veri erişimi sağlanabildiğinde, kontrollü bir güvenlik müdahalesi ile kritik bir arıza arasındaki fark önceden belirlenmektedir ve sistem güvenliği etkin şekilde korunmaktadır [66,67,68].

Tüm bu sistemlerin entegrasyonu, güvenlik ve kontrol sistemlerinin gemi üzerinde çeşitli durumları izleme, analiz etme ve tepki verme süreçlerinde uyum içinde çalışmasını sağlayan güvenilir bir altyapı sunmaktadır. Gaz algılama, sıcaklık kontrolü ve yangın koruma sistemlerinin gerçek zamanlı veri işleme ve iletim sistemleriyle kesintisiz bağlantısı sayesinde, gemi operasyonları güvenli bir şekilde sürdürülebilir ve olası acil durumlara hızlıca müdahale edilebilir. Bu yaklaşım, mürettebatın, geminin ve çevrenin korunmasına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır [65].

3.4.2. ESD kontrol fonksiyonu

Kapatma kontrol fonksiyonu, amonyak parçalama, metanol reformer, PSA saflaştırıcı ve yakıt hücresi gibi çeşitli alt sistemleri içeren karmaşık bir sistemin güvenli çalışmasını sağlamak amacıyla tasarlanmış kritik bir emniyet mekanizmasıdır. Bu fonksiyon, aşağıda belirtilen temel sinyallerden alınan girdilere göre çalışır: Acil Durdurma, Alt Sistem Kapatma Sinyali, Durdurma Komutu ve sıfırlama. Bu kontrol fonksiyonlarının mantığı Şekil 3.3'te gösterilmektedir [62,67,68].



Şekil 3.3: ESD mantık diyagramı.

Acil Durdurma (E-Stop), operatöre tüm otomatik kontrol fonksiyonlarını derhal devre dışı bırakıp tam sistem kapatmasını tetikleme imkânı sunan manuel bir müdahale seçeneğidir. Bu mekanizma, otomatik sistemler tarafından henüz tam olarak tespit edilemeyen fakat acil tehlike arz eden anormal durumların operatör tarafından gözlemlendiği senaryolarda hayati önem taşımaktadır. E-Stop, sadece otomatik

verilere güvenmekten daha hızlı bir tepki sunar ve hızla kötüleşen durumlarda kazaların önlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

Alt Sistem Kapatma Sinyali (SSS), amonyak parçalama, metanol reformer, PSA saflaştırıcı veya yakıt hücresi gibi kritik alt sistemlerde anormal bir durum tespit edildiğinde otomatik olarak devreye giren bir kontrol unsurudur. Bu sinyal, ilgili alt sistemin kontrollü şekilde kapatılmasını tetikleyerek daha fazla hasarın ya da tehlikeli durumların oluşmasını engellemektedir. SSS, her alt sistemin bağımsız şekilde güvenli hale getirilebilmesini sağlayarak, tüm sistemin bütünlüğünü ve emniyetini korumaktadır.

Durdurma Komutu (SC), hem operatör tarafından manuel olarak hem de sistem tarafından otomatik olarak, gereklilik durumunda verilen genel bir kapatma komutudur. Acil Durdurma'dan farklı olarak, Durdurma Komutu tüm alt sistemlerde daha kontrollü ve düzenli bir kapatma sürecine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle, acil müdahalenin gerektirilmediği durumlarda tercih edilmektedir.

Reset fonksiyonu, bir kapatma sebebinin giderilmesinin ardından sistemi tekrar normal çalışma koşullarına döndürmek amacıyla yapılandırılmıştır. Altta yatan sorun çözüldüğünde, Reset seçeneği ile operatör aktif alarmları temizleyip ilgili alt sistemleri kontrollü biçimde yeniden başlatabilmektedir. Bu sayede sistem, güvenli ve verimli bir şekilde tekrar çalışmaya alınabilmektedir.

Tablo 3.1'de ESD mantık tablosu yer almaktadır. Tablo, Acil Durdurma, Alt Sistem Kapatma Sinyali veya Durdurma Komutunun tetiklenmesi gibi farklı giriş koşullarının sistemin kapatma davranışı üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir.

Tablo 3.1: ESD durumları.

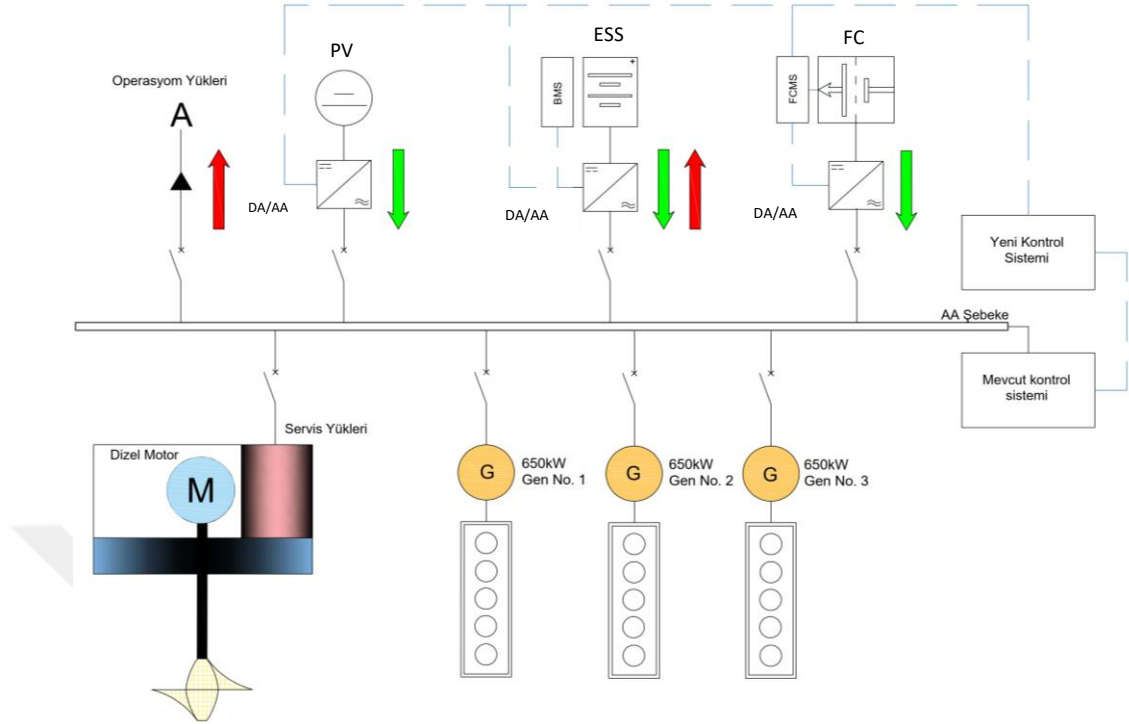
Giriş Koşulları	Acil Durdurma (E-Stop)	Alt Sistem Kapatma Sinyali (SSS)	Durdurma Komutu (SC)	Reset	Çıktı – Sistem Kapatma
Durum 1: Normal Operasyon	0	0	0	1	0
Durum 2: Acil Durdurma Aktif	1	0	0	X	1
Durum 3: Alt Sistem Kapatma Sinyali	0	1	0	X	1
Durum 4: Durdurma Komutu Verildi	0	0	1	X	1
Durum 5: Acil Durdurma ve Alt Sistem	1	1	0	X	1
Durum 6: Alt Sistem ve Durdurma Komutu	0	1	1	X	1
Durum 7: Tüm Koşullar Aktif	1	1	1	X	1
Durum 8: Alarm Çözümü Sonrası Reset	0	0	0	1	0

BÖLÜM 4. AA MİKRO ŞEBEKE SENKRONİZASYON VE KONTROL YÖNTEMLERİ

4.1. Giriş

Mikro şebekeler, yenilenebilir ve dağıtık enerji kaynaklarını entegre ederek küçük ölçekli ancak esnek yapıya sahip modern elektrik sistemleri oluşturmayı amaçlamaktadır. Geleneksel şebekeden bağımsız (ada modunda) ya da ona bağlı olarak çalışabilen bu sistemler, güneş panelleri, rüzgar türbinleri, batarya sistemleri ve yakıt hücreleri gibi çeşitli kaynakları bünyesinde barındırmaktadır. Bu bölümde, batarya ve yakıt hücresi gibi doğru akım (DA) temelli enerji kaynaklarının alternatif akım (AA) mikro şebekelere entegrasyonunda kullanılan evirici sistemleri ve kontrol algoritmaları ele alınmaktadır. Sunulan yapı, yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş paneli, batarya ve yakıt hücresi) gemi üzerindeki hotel yüklerine güvenilir ve optimize edilmiş güç sağlamak amacıyla geliştirilmiş hibrit bir enerji dönüşüm sistemine dayanmaktadır. Özellikle batarya ve yakıt hücresi kaynaklarının kontrol algoritmaları, gerilim ve frekans kararlılığının sağlanması açısından detaylı biçimde incelenmiştir [69,70].

Gemiye entegre edilen bu hibrit enerji sistemi, mevcut dizel jeneratörlerin yanı sıra batarya enerji depolama sistemi (ESS), fotovoltaiik (PV) panel ve yakıt hücresi modülleriyle desteklenmiştir. Tüm bu kaynaklar, gemideki ortak alternatif akım (AA) barası etrafında yapılandırılan mikro şebekeye bağlanmaktadır [72]. Bu mimaride, hem mevcut jeneratörler hem de yeni entegre edilen yeşil enerji kaynakları alternatif akım baraya paralel şekilde dahil edilmektedir. Enerji yönetimi ve geçiş kontrolü ise hem mevcut hem de yeni kontrol sistemleri aracılığıyla sağlanmaktadır. Sistem bileşenlerinin genel entegrasyonu ve enerji akış yapısı Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.4.1: AA şebeke tek hat şeması.

Mikro şebeke operasyonunda şebeke senkronizasyonu, farklı kaynakların uyum içinde çalışabilmesi ve güç alışverişinin güvenli şekilde gerçekleşebilmesi için kritik bir gerekliliktir. Özellikle batarya ve yakıt hücresi gibi enerji depolama ve üretim elemanlarının devreye alınması veya şebekeden ayrılması süreçlerinde, şebekeyle senkron bağlantı şartlarının sağlanması hayati önem taşır. Bu bölümünde, söz konusu senkronizasyon ihtiyacının önemi vurgulanmakta ve temel gereksinimleri ele alınmaktadır. Ayrıca batarya ve yakıt hücresi tabanlı eviricili kaynakların mikro şebeke içindeki rolü açıklanmaktadır [71,72,73].

Mikro şebekelere entegre edilen evirici tabanlı enerji sistemlerinin senkronizasyon süreçleri, hem sistem kararlılığı hem de güvenli enerji alışverişi açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle batarya enerji depolama sistemleri ve yakıt hücresi temelli güç kaynaklarının şebekeyle uyumlu çalışabilmesi için doğru senkronizasyon yöntemlerinin ve kontrol stratejilerinin uygulanması gerekmektedir [69].

Mikro şebekelerdeki evirici tabanlı dağıtık enerji kaynaklarının şebekeye bağlantı koşulları ve senkronizasyon süreci teorik açıdan ele alınmaktadır. Öncelikle senkronizasyon kavramı tanımlanacak ve mikro şebeke ortamında bu kaynakların üstlendiği roller açıklanacaktır. Takip eden kısımda, senkronizasyonun temel prensipleri olan faz, frekans ve gerilim uyumu gibi gereksinimler detaylandırılacaktır. Son olarak, yetersiz senkronizasyonun sistem performansı üzerindeki olumsuz etkileri değerlendirilecektir.

Bu doğrultuda, batarya ve yakıt hücresi kaynaklarının entegre edildiği mikro şebeke uygulamalarında karşılaşılan senkronizasyon zorluklarının daha iyi anlaşılması ve bu zorluklara karşı geliştirilebilecek çözümlere teknik bir altyapı sunulması amaçlanmaktadır. Şebeke senkronizasyonu, mikro şebeke ve ana şebeke etkileşiminde bir dizi nedenden ötürü hayati öneme sahiptir:

- a. *Güvenlik:* Eviricinin ana şebeke ile senkronize edilmesi, bakım veya arıza durumlarında ada moduna geçildiğinde kontrolsüz enerji geri beslemesini önlemektedir. Doğru senkronizasyon sağlanmadığında, şebeke elektriği kesildiğinde eviricinin enerji vermeye devam etmesi ekipmanlarda hasara ve bakım personeli açısından tehlikeli durumlara yol açabilir. Senkronizasyonun başarılı olması, ters güç akışını engelleyerek hem şebeke çalışanlarının hem de cihazların güvenliğini korumaktadır.
- b. *Şebeke Kararlılığı:* Mikro şebekedeki dağıtık kaynakların ana şebeke ile uyum içinde çalışması, sistem kararlılığının sürdürülebilmesi için kritiktir. Doğru faz ve frekansta bağlanan evirici, şebekedeki diğer üretim birimleriyle senkron şekilde güç sağlamakta veya çekmektedir. Bu sayede frekans ve gerilim dalgalanmaları en aza indirilmekte, paralel çalışma koşulları sağlıklı biçimde sürdürülmektedir. Özellikle bir mikro şebeke, ana şebekeye yeniden bağlanırken senkronizasyonun düzgün şekilde yapılması ani güç dalgalanmalarını ve koruma elemanlarının istenmeyen açmalarını önlemekte, sistemin stabilitesini güvence altına almaktadır.

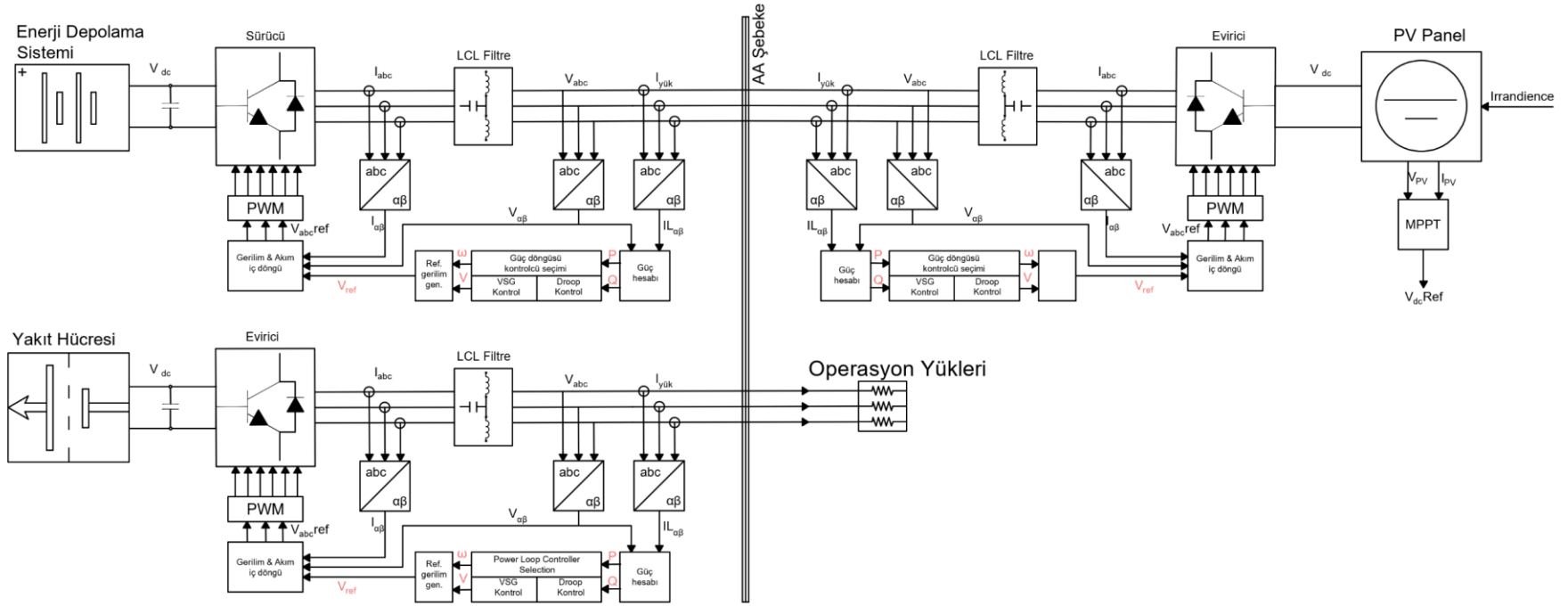
- c. *Verimlilik ve Güç Kalitesi*: Senkronizasyon, güç alışverişinin en verimli noktada gerçekleşmesine olanak tanımaktadır. Eviricinin şebeke ile senkron çalışması, aktif ve reaktif güç akışının kontrolünü kolaylaştırmakta ve enerji kaynaklarının etkin kullanımını mümkün kılmaktadır. Uyumlu gerilim ve frekans sayesinde harmoniğin bozulması ve titreşimler azaltılmakta, böylece güç kalitesi yükselmektedir. Sonuç olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin maksimum oranda değerlendirilmesi ve sistem kayıplarının en aza indirilmesi mümkün olmaktadır.

Şebeke senkronizasyonunun başarılı bir şekilde sağlanması; emniyetli işletme, kararlı mikro şebeke operasyonu ve kaliteli/verimli enerji yönetimi için temel bir gerekliliktir. Özellikle mikro şebekelerde birden fazla evirici tabanlı kaynağın senkronize şekilde çalışması, sistemin kararlılığı açısından vazgeçilmezdir. Bu nedenle, evirici destekli dağıtık kaynakların mikro şebeke içerisindeki rolü ve bu rolün gerektirdiği senkronizasyon koşulları dikkatle incelenmelidir [69-74].

4.1.1. Mikro şebekelerde evirici tabanlı kaynakların rolü

Mikro şebekelerde evirici tabanlı enerji kaynakları (güneş paneli, batarya sistemleri ve yakıt hücreleri), hem enerji üretimi hem de depolama işlevi açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Bu tür kaynaklar, doğru akım (DA) elektrik üretmekte veya depolamaktadır. Bu nedenle, alternatif akım (AA) şebekeye bağlanabilmeleri için ürettikleri elektrik enerjisinin eviriciler aracılığıyla dönüştürülmesi gerekmektedir. Eviriciler yalnızca bir güç dönüştürücü değil, aynı zamanda şebeke ile etkileşimi yöneten bir kontrol birimi olarak da görev yapmaktadır. Bataryalar ve yakıt hücreleri, evirici kontrol sistemleri sayesinde şebekeye aktif güç sağlayabilmektedir. Gerekliğinde reaktif güç desteği sunularak şebeke kararlılığına katkı sağlanmaktadır [71,72].

Batarya ve yakıt hücresi kaynaklarının mikro şebekeye nasıl entegre edildiği, LCL filtreler ve PWM sinyalleriyle kontrol edilen evirici yapısı üzerinden çalıştıkları sistem mimarisıyla birlikte Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2: DA kaynaklı sistemlerin kontrolcü yapısı.

Bu kısımda özellikle batarya ve yakıt hücresi eviricilerinin kontrol sistemlerine odaklanılmış, PV paneli ise yalnızca temsili olarak dahil edilmiştir. PV panel, günün belirli saatlerinde aktif olduğu ve sabit maksimum güç noktası takibi (MPPT) ile çalıştığı için detaylı analiz bir sonraki bölümde, operasyon modları kapsamında ele alınacaktır. Buradaki temel odak, sürekli çalışabilen ve şebeke stabilitesinde aktif görev üstlenen batarya ve yakıt hücresi evirici kontrolcüleridir.

Bataryalar, hızlı tepki süreleriyle mikro şebekede ani yük değişimlerini dengeleyen ve ani güç dalgalanmalarını bastıran elemanlar olarak görev yapmaktadır. Mikro şebekede güneş veya rüzgâr gibi değişken üretim kaynakları bulunduğunda, batarya tabanlı eviriciler frekans ve gerilim regülasyonuna yardımcı olmakta ve bu dalgalanmaları yumuşatmaktadır. Yakıt hücreleri ise daha yavaş dinamiklere sahip olmakla birlikte, uzun süreli ve istikrarlı bir temel güç üretimi sağlayıcısı olarak kullanılmaktadır. Yakıt hücresi sistemleri, eviricileriyle sürekli ve temiz (emisyonuz) güç üreterek mikro şebekenin yük taleplerini karşılamakta veya şebekeye destek vermektedir. Evirici tabanlı bu kaynaklar, mikro şebekenin işletim moduna göre farklı roller üstlenmektedir. Şebekeden bağımsız operasyonda, batarya veya yakıt hücresi eviricileri şebeke oluşturan (GFM) modda çalışmakta ve mikro şebekenin referans frekans ile gerilimini belirlemektedir [74,77,78].

Bu tür eviriciler, droop kontrolü gibi algoritmalar kullanarak aktif ve reaktif güç dengesine göre çıkış frekansını ve gerilimini ayarlayabilmektedir. Böylece mikro şebeke, şebekeden bağımsız olarak kararlı bir şekilde çalışabilmektedir. Şebekeye bağlı normal çalışma koşullarında ise bu eviriciler genellikle şebekeye uyan (GFL) modda çalışmaktadır. Çıkışlarını ana şebekenin frekansına ve fazına senkronize ederek enerji alışverişini yönetmektedir. Batarya eviricisi, şebekeyle senkron halde fazla üretimi depolayabilmekte ya da ihtiyaç anında depoladığı enerjiyi şebekeye verebilmektedir. Yakıt hücresi eviricisi de üretimini şebekenin talebine göre ayarlayarak senkron şekilde akım enjekte etmektedir. Sonuç olarak, batarya ve yakıt hücresi gibi evirici tabanlı dağıtık kaynaklar, mikro şebekelerin esnekliğini ve dayanıklılığını artıran unsurlar olmaktadır.

Bu kaynakların mikro şebekeye sorunsuz entegrasyonu, büyük ölçüde doğru şebeke senkronizasyonuna bağlıdır. Eviricilerin şebekeyle senkronize çalışması sayesinde birden fazla enerji kaynağı mikro şebeke içinde koordineli biçimde görev paylaşımı yapabilmektedir. Bu kısımda, mikro şebekelerde evirici tabanlı enerji kaynaklarının taşıdığı öneme değinilmiştir. Sonraki kısımda ise bu kaynakların başarılı bir şekilde entegre edilebilmesi için gerekli olan şebeke senkronizasyonunun temel kavramları ele alınacaktır.

4.2. AA Şebeke Senkronizasyonunun Temelleri

Mikro şebeke içindeki birden fazla güç kaynağı arasında senkronizasyon sağlamak, paralel bağlı AA güç sistemlerinde sorunsuz güç iletiminin temel şartıdır. Senkronizasyonun temelinde, bir kaynağın şebekeye bağlanmadan önce elektriksel parametrelerinin uyumlu hale getirilmesi yatar. Bu bölümde, şebeke senkronizasyonunun tanımı ve bu sürecin gerektirdiği teknik koşullar ile yetersiz senkronizasyon durumunda ortaya çıkabilecek problemler ele alınmaktadır.

4.2.1. Şebeke senkronizasyonunun tanımı

Şebeke senkronizasyonu, bir elektrik kaynağının elektrik şebekesiyle aynı frekans, faz ve gerilimde olacak biçimde hizalanması işlemi olarak tanımlanmaktadır. Başka bir ifadeyle, senkronizasyon sürecinde dağıtık kaynağın çıkış dalga formu, ana şebekenin dalga formuyla üst üste bindirilmektedir. Bu sayede iki sistem birbirine bağlandığında aralarında göreceli bir fark oluşmamakta ve güç alışverişinin kesintisiz gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Üç fazlı bir sistemde senkronizasyon, kaynağın faz sırasının şebekeyle aynı olmasını ve fazlar arası açı farkının minimize edilmesini de kapsamaktadır. Jeneratör veya eviricinin şebekeye senkron bağlanması sırasında, her bir fazın şebekedeki ilgili fazla aynı sıraya sahip olması gerekmektedir. Aksi durumda fazlar karışabilmekte ve bu durum ciddi arızalara yol açabilmektedir. Senkronizasyon esnasında dikkat edilen bir diğer husus da dalga şekillerinin uyumluluğu olmaktadır. Genellikle şebeke gerilimi sinüzoidal olduğundan, kaynağın da çıkışının sinüzoidal olması ve harmonik bozulma seviyesinin düşük tutulması gerekmektedir [75,76,78].

Senkronizasyon işlemi, pratikte ölçüm ve kontrol devreleri aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Modern evirici sistemlerinde, şebeke geriliminin anlık faz açısı ve frekansını tespit eden faz kilitli döngü (PLL) tabanlı algoritmalar yaygın şekilde kullanılmaktadır. PLL, şebeke gerilimini referans alarak eviricinin çıkış fazını kilitlemekte ve bu sayede evirici, şebekenin dalga formunu takip edebilmektedir. Senkron Referans Çerçevesi PLL (SRF-PLL) yapısında, üç fazlı şebeke gerilimi dönen dq eksenine dönüştürülmekte ve faz hatası hesaplanmaktadır. Eviricinin referans sinyali, bu hata sıfıra çekilecek şekilde sürekli olarak ayarlanmaktadır [82,84].

4.2.2. Senkronizasyon gereksinimleri (Faz, Frekans, Gerilim)

Bir mikro şebeke kaynağının mevcut bir AA şebekeye veya ada modundaki mikro şebekeye paralel bağlanabilmesi için belirli koşulların sağlanması gerekmektedir. Bu koşullar, senkronizasyon kriterleri olarak adlandırılmaktadır ve temel olarak frekans uyumu, faz uyumu ve gerilim genliği uyumu olmak üzere üç ana başlıkta toplanmaktadır:

- a. *Frekans Uyumu:* Eviricinin ürettiği çıkış frekansı ile şebeke frekansı arasında tutarlılık bulunmalıdır. Frekanslar arasında büyük farklar olması durumunda faz farkı zamanla artmaktadır ve senkronizasyon mümkün olmamaktadır. Bu nedenle senkronizasyon öncesinde frekans farkı belirli bir tolerans aralığında tutulmaktadır.
- b. *Faz Açısı Uyumu:* Bağlantı anında evirici çıkış gerilimi ile şebeke gerilimi arasında minimum faz farkı bulunmalıdır. İdeal koşullarda iki sinüzoidal dalga aynı fazda çalışmaktadır. Pratikte ise küçük bir faz sapmasına izin verilebilmektedir, ancak büyük faz farkları bağlantı sırasında geçici akımların oluşmasına yol açmaktadır. Bu yüzden, senkron bağlantı öncesinde faz açısı dikkatle izlenmektedir.
- c. *Gerilim Genliği Uyumu:* Eviricinin AA çıkış geriliminin genliği, şebeke gerilim seviyesine yakın olmalıdır. Gerilim farklarının çok büyük olması durumunda bağlantı anında ani güç akışları, harmonik bozulmalar ve dengesiz yük dağılımları oluşmaktadır. Bu sebeple evirici çıkış gerilimi, şebeke koşullarına uygun şekilde regüle edilmektedir.

Bunlara ek olarak, faz sırası uyumu da üç fazlı sistemlerde gerekliliktir. Eviricinin faz sırası ile şebekenin faz sırasının aynı olması gerekir. Farklı faz sıraları ciddi akım dengesizliklerine ve donanım arızalarına yol açmaktadır. Bu nedenle, senkronizasyon öncesinde faz sırası ölçüm cihazları veya senkroskop kullanılarak doğrulama yapılmaktadır [74-79].

Tüm bu koşulların (a–c) senkronizasyon öncesinde sağlanıp sağlanmadığı, genellikle otomatik kontrol algoritmaları tarafından gerçek zamanlı olarak denetlenmektedir. Özellikle PLL, evirici çıkışını şebeke fazına ve frekansına senkronize ederken; gerilim genliği kontrolü, ayrı bir kontrol döngüsü aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu yapılar sayesinde eviricinin şebeke ile eş fazda, eş frekansta ve uygun genlikte çalıştığı doğrulandıktan sonra, güvenli paralel bağlantı gerçekleştirilmekte ve ani güç geçişlerinden kaynaklanabilecek sistem kararsızlıkları önlenmektedir.

4.2.3. Yetersiz senkronizasyonun etkileri

Senkronizasyon koşulları uygun şekilde sağlanmadan bir güç kaynağı şebekeye bağlanırsa veya mikro şebeke ana şebekeyle yanlış bir anda birleştirilirse, çeşitli olumsuz etkiler ortaya çıkmaktadır:

- a. Aşırı dengeleme akımları oluşmaktadır. Frekans veya faz açısı uyumsuzluğu durumunda, iki sistem birbirine bağlandığı anda aradaki farkları dengelemek için büyük geçici akımlar akmaktadır. Faz açısı farkı yüksekse, evirici ile şebeke arasında aniden çok yüksek genlikli bir akım dolaşmaktadır. Bu akım, eviricinin yarı iletken devrelerine ve transformatör gibi ara ekipmanlara aşırı yük bindirerek zarar verebilmektedir. Aynı şekilde frekans farkı mevcutsa, evirici şebekeye bağlandığında senkron olmaya zorlanmakta ve titreşimli bir güç alışverişi yaşanmakta; bu da dalgalı akımlara neden olmaktadır. Sonuç olarak, senkronize olmadan yapılan bağlantılar hem eviricinin hem de şebekenin ekipmanlarında termal zorlanmalara ve aşınmalara yol açmaktadır.

- b. Gerilim dalgalanmaları ve güç kalitesi problemleri yaşanmaktadır. Gerilim büyüklüğü uyumsuzluğu ile senkron bağlanma gerçekleşirse, şebekede ani gerilim çökmesi veya yükselmesi gözlemlenmektedir. Evirici gerilimi şebekeden daha yüksekse, bağlandığı anda şebeke gerilimini anlık olarak yükseltmektedir; bu da hassas yüklerde arızaya sebep olabilmektedir. Ters durumda, evirici gerilimi düşükse, bağlanma anında şebeke geriliminde çökme yaşanabilmektedir. Ayrıca, senkronizasyon hataları harmonik içerik ve güç faktöründe bozulmalara da neden olmaktadır. Bu tür güç kalitesi problemleri, geniş bir şebeke alanını etkileyerek diğer bağlı cihazların performansını düşürmektedir.
- c. Koruma ve sistem kararlılığı sorunları ortaya çıkmaktadır. Uyumlu olmayan bir şekilde şebekeye bağlanmaya çalışmak, koruma sistemlerinin devreye girmesine yol açmaktadır. Birçok modern evirici ve şebeke koruma rölesi, belirli büyüklükteki frekans, faz veya gerilim sapmalarında bağlantıyı otomatik olarak kesmektedir. Bu koruma tetiklenmesi, sistem kararlılığı açısından istenmeyen kesintilere sebep olmaktadır. Daha kötüsü, eğer koruma sistemleri doğru ayarlanmadıysa ve senkronizasyon hatasıyla bağlantı yapılırsa, mikro şebeke ile ana şebeke arasında senkronizm kaybı ortaya çıkmaktadır. Bu durumda iki sistem birbirini çekiştirmekte; frekans kontrolü zorlaşmakta ve tüm entegre sistem bir salınım hali almaktadır. Aşırı durumlarda, bu salınımlar ve dengesizlik jeneratörlerde mekanik zorlanmalara veya invertörlerde tetikleme hatalarına yol açarak ekipman arızalarına sebebiyet vermektedir.
- d. Yeniden senkronize olmada zorluk yaşanmaktadır. Mikro şebekelerin ana şebekeden ayrılıp tekrar bağlanması süreçlerinde, hatalı senkronizasyon girişimi sonraki denemeleri de olumsuz etkilemektedir. Eğer mikro şebeke ada modunda çalışırken frekansı veya gerilimi şebekeden önemli ölçüde sapmışsa, yeniden senkronize olmak için uzun bir hazırlık süresi gerekebilmektedir. Bu da kesinti süresini uzatmakta ve enerji arzında güvenilirliği azaltmaktadır.

Yukarıda belirtilen etkiler (a-d) dikkate alındığında, senkronizasyon hatalarının önlenmesi için kapsamlı teknik önlemlerin alınması zorunlu hâle gelmektedir. Bu nedenle, evirici tabanlı kaynakların senkronizasyonunda PLL tabanlı hızlı algılama sistemleri, gelişmiş kontrol algoritmaları ve uygun koruma eşikleri kullanılmaktadır.

Şebeke koşullarındaki değişimleri hızlıca tespit eden bir PLL, senkronizasyon hatalarını engellemek amacıyla eviricinin fazını anında ayarlayabilmektedir. Ayrıca, senkronizasyon öncesi ve sonrasında senkroskop ve benzeri izleme cihazları kullanılarak bağlanma anının doğru şekilde seçilmesi sağlanmaktadır. Sonuç olarak, yetersiz senkronizasyonun potansiyel olarak yıkıcı etkilerinden kaçınmak için mikro şebeke kontrol sistemleri senkronizasyon süreçlerini titizlikle yönetmektedir [74-84].

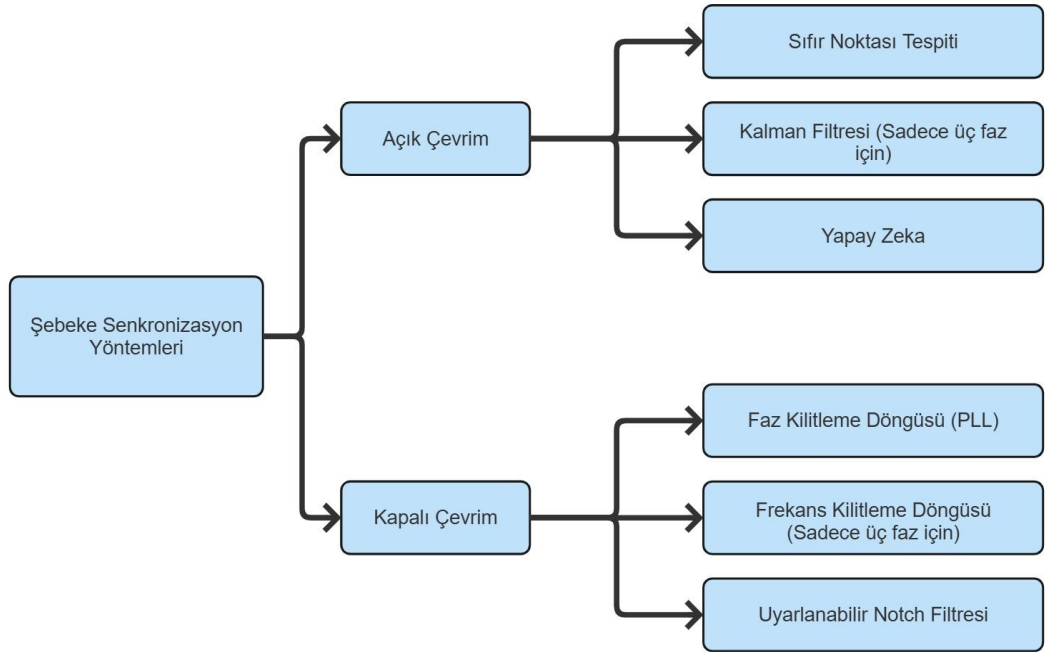
Mikro şebeke ortamında batarya ve yakıt hücresi gibi evirici tabanlı kaynakların başarılı bir şekilde kullanılabilmesi, yukarıda belirtilen senkronizasyon prensiplerine uygun hareket edilmesine bağlıdır. Doğru şekilde uygulanan senkronizasyon, farklı enerji kaynaklarının bir arada güvenli ve verimli çalışmasını mümkün kılmaktadır. Aksi durumda ise sistem bütünlüğü risk altına girmektedir. Bu nedenle, dağıtık enerji sistemlerinin tasarımında ve işletilmesinde şebeke senkronizasyonunun temellerine hakim olunması ve gerekli şartların sağlanması, sürdürülebilir ve kararlı bir mikro şebeke için temel bir gerekliliktir.

4.3. Senkronizasyon yöntemleri

Elektrik şebekesine bağlantı yapan güç elektroniği dönüştürücüler için senkronizasyon, yani şebekenin gerilim faz açısı ve frekansına uyum sağlama süreci, önemli bir kontrol konusudur. Senkronizasyon yöntemleri, genel olarak açık çevrim (geri besleme içermeyen) ve kapalı çevrim (geri beslemeli) yaklaşımlar olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır.

Açık çevrim yöntemlerde, dönüştürücü doğrudan şebeke sinyalini ölçerek basit kurallarla faz eşleştirmesi yapmaktadır. Sıfır geçiş algılama yöntemi, tek fazlı sistemlerde gerilimin sıfır noktasından geçiş anlarını tespit ederek faz senkronizasyonunu sağlamaktadır. Üç fazlı sistemlerde ise giriş sinyali filtrelenmeden işlenebilmekte veya faz tespiti için Kalman filtresi gibi istatistiksel yöntemler ya da yapay zekâ tabanlı öngörü modelleri kullanılabilir. Bu tür açık çevrim teknikler, yapısal olarak sade ve düşük maliyetli olmalarına rağmen, geri besleme içermedikleri için şebekedeki ani dalgalanmalara ve bozulmalara karşı daha hassas olmaktadır [75,76].

Kapalı çevrim yöntemlerde ise, ölçülen şebeke gerilimine dayalı geri besleme kontrolü aracılığıyla dönüştürücünün iç osilatörü şebekeyle kilitlenmektedir. Bu gruptaki en yaygın teknikler arasında PLL, üç fazlı sistemler için geliştirilen frekans kilitlemeli döngü (FLL) ve adaptif çentik filtreleri yer almaktadır. Şekil 4.3'te gösterildiği üzere, güncel literatürde şebeke senkronizasyon yöntemleri açık çevrim ve kapalı çevrim olmak üzere iki ana kategori altında sınıflandırılmaktadır. Açık çevrim yaklaşımlar, basit uygulamalar için tercih edilebilmektedir. Ancak pratikte yüksek güvenilirlik ve kararlılık gerektiren sistemlerde, kapalı çevrim PLL tabanlı yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. [75,76].

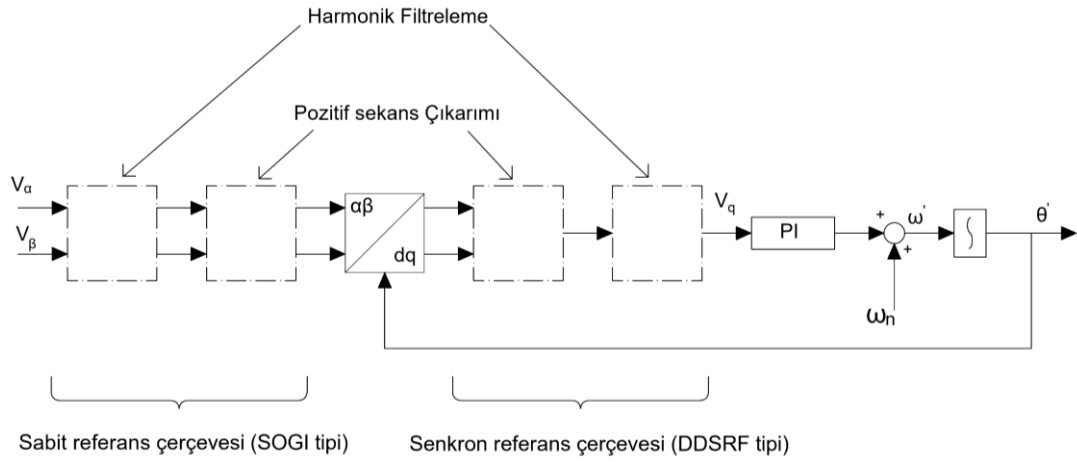


Şekil 4.3: Konvansiyonel şebeke senkronizasyon yöntemlerinin sınıflandırması.

4.3.1. Senkronizasyon yöntemlerinin sınıflandırılması

Şebeke ile senkronize çalışmayı sağlamak amacıyla geliştirilen yöntemler, fonksiyonel olarak farklı prensiplere dayanmaktadır. En temel ayrım yukarıda belirtildiği gibi geri besleme kullanımına göre yapılmaktadır. Özellikle kapalı döngü yöntemlerin kendi içinde çeşitli alt türleri bulunmaktadır. PLL tabanlı teknikler, şebeke koşullarındaki bozulmalara dayanıklılığı artırmak amacıyla farklı yapısal iyileştirmelerle sınıflandırılmaktadır [81].

Klasik üç fazlı PLL yöntemi, senkron dönen referans çerçevesi kullanarak faz açılarını hesaplamaktadır. Ancak şebekede dengesizlikler (fazlar arası genlik ve faz eşitsizlikleri) veya harmonik bozulmalar mevcutsa, temel PLL yaklaşımının performansı azalabilmektedir. Bu nedenle PLL yöntemleri için geliştirilmiş ön işlemci ve kontrol modifikasyonları mevcuttur. Şekil 4.4'te bu modifikasyonların genel bir yapısı gösterilmektedir.



Şekil 4.4: SRF-PLL üzerine yapılan iyileştirmeler.

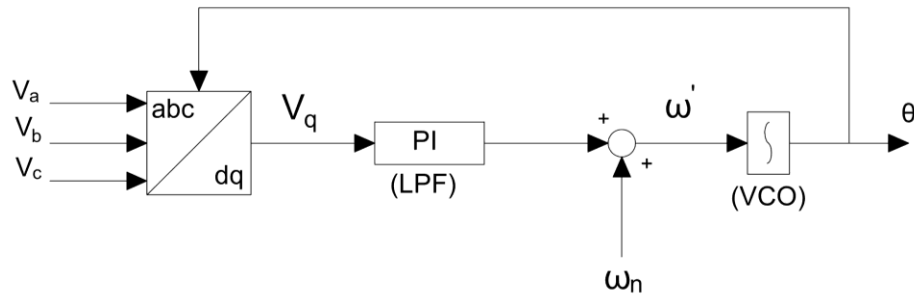
Gerçekleştirilen geliştirmeler, iki temel yaklaşıma dayanmaktadır. Birincisi, sabit referans çerçevesinde çalışan filtreleyici yapıların kullanılmasıdır (SOGI tipi). Bu yaklaşımda şebeke gerilimleri $\alpha\beta$ ekseninde işlenmekte ve gerekli faz kaydırılmış sinyaller elde edilerek harmonikler bastırılmaktadır. İkinci yaklaşım ise senkron referans çerçevesinde pozitif bileşenin ayrıştırılması esasına dayanmaktadır (DDSRF tipi). Bu sayede dengesiz gerilim durumlarında pozitif sekans bileşeni ortaya çıkarılmakta ve PLL'nin yalnızca bu bileşene kilitlenmesi sağlanmaktadır. Her iki yöntemde de amaç, PLL döngüsüne girmeden önce sinyali mümkün olduğunca ideal hale getirmek, harmonikleri filtrelemek ve gerekirse negatif bileşenlerin etkisini ortadan kaldırmak, böylece PLL'nin kararlılığını korumaktır. Sonuç olarak, kapalı döngü senkronizasyon teknikleri açık döngü yöntemlere kıyasla daha karmaşık ancak şebeke koşullarına karşı daha sağlam çözümler sunmaktadır. Bu kısımda, en yaygın PLL tabanlı senkronizasyon yöntemleri ve bunların türevleri ayrıntılı olarak incelenecektir [81,82,84].

4.3.2. PLL tabanlı senkronizasyon teknikleri

Kapalı çevrim senkronizasyon yöntemlerinin merkezinde PLL yapıları bulunmaktadır. Üç fazlı güç sistemlerinde PLL, dönüştürücünün dahili osilatörünün fazını ve frekansını şebeke ile uyumlu hale getirmek için geri beslemeli bir kontrol döngüsü kullanmaktadır. Bu yöntemde, senkronizasyon için şebekeden alınan gerilimler belirli dönüşümlerden geçirilmekte, hata sinyalleri oluşturulmakta ve bu sinyaller kontrol yapıları ile işlenerek dönüştürücü şebekeye faz ve frekans açısından kilitlenmektedir. PLL temelli senkronizasyon tekniklerinin en temel örneği Senkron Referans Çerçevesi PLL (SRF-PLL) yapısıdır. Ancak SRF-PLL yalnızca ideal şebeke koşullarında, yani denge ve harmonik açısından temiz gerilim profillerinde etkili şekilde çalışabilmektedir. Gerçek şebekelerde karşılaşılabilen dengesizlik ve harmonik bozulma gibi durumlarda ise bu yapı bazı sınırlamalarla karşılaşılabilmektedir. Bu nedenle SRF-PLL üzerine çeşitli iyileştirme ve modifikasyonlar geliştirilmiştir. Bu bölümde yaygın olarak kullanılan PLL yapıları ayrıntılı olarak ele alınacaktır [81,82,86].

4.3.2.1. SRF-PLL (Senkron Referans Çerçevesi PLL)

SRF-PLL, üç fazlı dengeli elektrik şebekelerinde en yaygın kullanılan ve referans kabul edilen PLL yapısıdır. Bu yapı, dönüştürücünün faz açısını ve frekansını şebekeye kilitlemek amacıyla geri besleme temelli bir kontrol yapısı sunmaktadır. SRF-PLL'nin temelinde, şebeke gerilimlerinden elde edilen $\alpha\beta$ bileşenlerinin, referans faz açısına göre dönen dq çerçevesine dönüştürülmesi yer almaktadır. Bu dönüşüm sonucunda q eksenindeki gerilim bileşeni (V_q), sistemin şebekeye ne kadar senkron olduğunu gösteren bir hata sinyali olarak kullanılmaktadır [81,82].



Şekil 4.5: SRF-PLL temel prensibi.

Bu yapı, Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Senkronizasyon sürecinde üç fazlı gerilimler (V_a , V_b , V_c) önce Clarke dönüşümü ile $\alpha\beta$ düzlemine aktarılmakta, ardından mevcut faz tahmini θ kullanılarak Park dönüşümüyle dq düzlemine çevrilmektedir. Bu iki dönüşüm süreci, denklem 4.1 ile ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Elde edilen V_q bileşeni, faz farkı nedeniyle oluşan hata sinyalidir ve bu değer bir PI denetleyiciye girerek işlenmektedir. PI denetleyici, bu hatayı sıfıra çekmek amacıyla bir kontrol sinyali üretir. Bu kontrol sinyali, dönüştürücünün iç osilatörünün frekansını ayarlamak üzere kullanılmaktadır. Bu süreç, denklem 4.2 ile gösterilmektedir.

$$\omega' = K_p V_q + K_i \int V_q dt \quad (4.2)$$

Elde edilen ω' kontrol işareti, nominal açısal frekans ω_n ile toplanmakta ve gerilim kontrollü bir osilatöre aktarılmaktadır. Bu osilatör, toplam frekansı entegre ederek güncel faz açısı θ' 'yi üretmektedir. Böylece sistem, sürekli olarak güncellenen θ açısıyla şebekeye kilitlenmiş olmaktadır ve bu durum denklem 4.3 ile ifade edilmektedir.

$$\theta = \int (\omega_n + \omega') dt \quad (4.3)$$

SRF-PLL'nin temel hedefi, $V_q=0$ olacak şekilde sistemin referans çerçevesini sürekli olarak şebeke geriliminin faz açısıyla hizalamaktır. Bu durumda dönüştürücü, şebekeye senkronize biçimde çalışmaktadır ve senkronizasyon başarısı, PLL döngüsünün kararlılığına bağlıdır [81-84].

SRF-PLL yapısı ideal koşullar altında oldukça başarılıdır. Şebeke gerilimleri simetrik ve harmonikten arınmış olduğunda, bu yapı hızlı, kararlı ve yüksek doğrulukta faz takibi sağlamaktadır. Ayrıca devresel olarak basit olması ve kontrol açısından iyi belgelenmiş bir yapıya sahip olması nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir.

Ancak, SRF-PLL'nin bazı zayıf yönleri de bulunmaktadır. Özellikle şebeke geriliminde fazlar arası genlik farklılığı (dengesizlik) veya harmonik bozulmalar mevcutsa, sistemin hata sinyali olan V_q değeri salınımlar içermektedir. Bu durum, PI denetleyicinin kararsız tepkiler vermesine ve senkronizasyonun zayıflamasına yol açabilir. Özellikle ikinci harmonik bileşenli salınımlar PLL döngüsünde belirginleşmekte ve dengeyi bozmaktadır. Bu nedenlerle, SRF-PLL yapısını daha zorlu şebeke koşullarında da kararlı hale getirmek için çeşitli iyileştirmeler önerilmiştir. Bu iyileştirmeler arasında öne çıkanlar DDSRF-PLL ve DSOGI-PLL yapılarıdır. Bu yapılar bir sonraki bölümlerde detaylı biçimde ele alınacaktır [83-86].

4.3.2.2. DDSRF-PLL (Çift Dengelenmiş Senkron Referans Çerçevesi PLL)

DDSRF-PLL, SRF-PLL yapısının yetersiz kaldığı asimetrik (dengesiz) şebeke koşullarında doğru faz takibi yapabilmek amacıyla geliştirilmiştir. Temel farkı, pozitif ve negatif sekans bileşenlerini birbirinden ayırarak yalnızca pozitif bileşeni PLL döngüsüne dahil etmesidir. Bu kapsamda, şebeke gerilimleri iki farklı dönüşüm çerçevesine aktarılmaktadır: Biri şebeke frekansı yönünde döner (pozitif sekans), diğeri ise ters yönde (negatif sekans) olarak tanımlanmaktadır. Pozitif sekans bileşenleri, standart SRF-PLL yapısındaki dönüşüme benzer şekilde, şebeke faz açısı yönünde dönen referans çerçevesine aktarılmaktadır. Bu dönüşüm, denklem 4.4 ile ifade edilmekte olup, V_q^+ bileşeni PLL döngüsüne iletilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_d^+ \\ V_q^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Negatif sekans bileşenler, ters yönde dönen referans çerçevesine aktarılmaktadır. Bu dönüşüm, denklem 4.5 ile ifade edilmekte olup, negatif bileşenlerin PLL üzerinde bozulma yaratmasının önüne geçilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_d^- \\ V_q^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Bu iki dönüşüm sonucunda elde edilen pozitif sekans bileşeni, PLL denetleyiciye giren hata sinyali olarak değerlendirilmektedir.

Böylece, dengesiz gerilim durumlarında bile PLL yalnızca temel (pozitif) bileşene kilitlenerek faz ve frekans takibini kararlı şekilde sürdürebilmektedir. SRF-PLL'de karşılaşılan 2ω bileşenli salınımlar bu yöntemle bastırılmaktadır [84,85]. Denklem 4.6 ve denklem 4.7'de gösterildiği üzere, kontrol döngüsü güncellenerek yalnızca V_q^+ bileşenine göre çalışan PI denetleyiciyle hata giderilmektedir.

$$\omega' = K_p V_q^+ + K_i \int V_q^+ dt \quad (4.6)$$

$$\theta = \int (\omega_n + \omega') dt \quad (4.7)$$

DDSRF-PLL, faz-toprak arızaları, gerilim çökmesi veya dengesiz yükleme gibi asimetrik şebeke koşullarında yüksek faz doğruluğu ile güvenilir senkronizasyon sağlamaktadır. Bu gelişmiş performans, çift dönüşüm yapıları ve pozitif-negatif bileşen ayrıştırması sayesinde elde edilmektedir. Ancak bu yapı, daha uzun hesaplama süresi, filtre kaynaklı gecikmeler ve yazılımsal karmaşıklık gibi bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Tüm bu özellikleriyle DDSRF-PLL, özellikle dengesiz gerilim koşullarında klasik SRF-PLL'ye kıyasla daha sağlam bir çözüm sunmaktadır [84,85,86].

4.3.2.3. DDSRF-PLL (Çift Dengelenmiş Senkron Referans Çerçevesi PLL)

DSOGI-PLL yapısı, PLL sistemine ikinci mertebeden geliştirilmiş integratör (SOGI) tabanlı bir filtreleme mekanizması entegre ederek, şebeke sinyalinin harmonik içeriğini azaltmayı hedeflemektedir. Bu sayede, PLL döngüsü yalnızca temel bileşene odaklanarak daha doğru faz takibi yapılabilmektedir [84].

DSOGI-PLL'de şebeke gerilimleri sabit referans çerçevesinde işlenmektedir. α ve β eksenindeki gerilim bileşenleri için SOGI modülü, 90° faz kaydırılmış sanal ikinci sinyali oluşturmaktadır. Böylece, tek fazlı sistemlerde bile α - β ekseninde iki ortogonal bileşen elde edilerek SRF dönüşümüne uygun giriş sağlanmaktadır. Üç fazlı uygulamalarda ise SOGI filtreleri hem α hem β bileşenleri üzerinde çalışmakta ve her fazın temel frekans bileşenini ile faz kaydırılmış eşleniğini üretmektedir. SOGI yapısının temel geçiş fonksiyonu denklem 4.8 ile ifade edilmektedir.

$$G(s) = \frac{k \cdot \omega_0 s}{s^2 + k \cdot \omega_0 s + \omega_0^2} \quad (4.8)$$

Denklem 4.8’de k parametresi, geçici yanıtı şekillendiren kazanç katsayısını ifade etmektedir. ω_0 hedeflenen sinyalin açısal frekansını göstermektedir. $G(s)$, şebekede temel frekans dışındaki bileşenlerin (örneğin harmonikler ve bozulmaların) etkin şekilde bastırılmasını sağlar. SOGI modülü, giriş sinyalinin 90° faz kaydırılmış bileşenini de üretmektedir. Bu bileşen $Q(s)$ ile gösterilmekte olup denklem 4.9’da ifade edilmektedir.

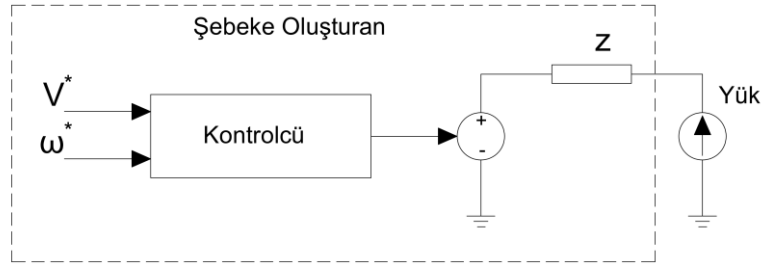
$$Q(s) = \frac{k \cdot \omega_0 s}{s^2 + k \cdot \omega_0 s + \omega_0^2} \quad (4.9)$$

Elde edilen temel bileşenler ve faz kaydırılmış sinyaller, pozitif sekans ayrıştırması için kullanılmaktadır ve bu işlemten sonra SRF dönüşümüne aktarılmaktadır. Bu yapı sayesinde, SRF-PLL ile aynı kontrol yapısı korunmakta; ancak giriş sinyalinin filtrelenmiş haliyle daha kararlı bir senkronizasyon sağlanmaktadır.

DSOGI-PLL yapısı, SRF-PLL’ye kıyasla harmonik bozulmalar ve gerilim bozuklukları altında daha hızlı ve hassas senkronizasyon sağlayabilmektedir. Ayrıca, tek fazlı sistemlerde de uygulanabilir olması nedeniyle SSI-PLL ile benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte, şebekede doğru akım ofseti oluştuğunda bu yapı olumsuz etkilenebilir. Genel yapısı itibarıyla DSOGI-PLL, dengeli ve dengesiz arızalı koşullarda temel bileşen faz bilgisini başarıyla izleyebilen, uygulanabilirliği yüksek, kararlı ve hızlı tepki veren bir PLL çözümüdür [81-86].

4.4. Şebeke Oluşturan (GFM) ve Şebeke Takip Eden (GFL) Eviriciler

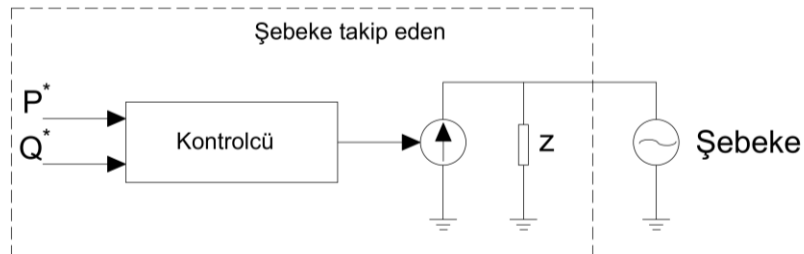
Güç dönüştürücülerinin şebeke ile etkileşimi yalnızca faz takibiyle senkron olmakla sınırlı değildir. Aynı zamanda hangi kontrol modunda çalıştıklarına göre senkronizasyon yöntemleri ve sistem davranışı değişiklik göstermektedir. Bu bağlamda, literatürde şebekeye bağlı çalışan eviriciler iki temel grupta sınıflandırılmaktadır: şebeke oluşturan (GFM) ve şebeke takip eden (GFL) yapılardır [74].



Şekil 4.6: GFM tipi evirici yapısı.

Şebeke oluşturan bir evirici, ideal bir gerilim kaynağı gibi davranmakta ve şebekenin genliğini (V^*) ile frekansını (ω^*) kendisi belirlemektedir. Bu özellik sayesinde, ada modunda çalışan mikro şebekelerde referans şebeke koşullarını oluşturabilmektedir. Tipik bir şebeke oluşturan evirici yapısı Şekil 4.6'da gösterilmektedir.

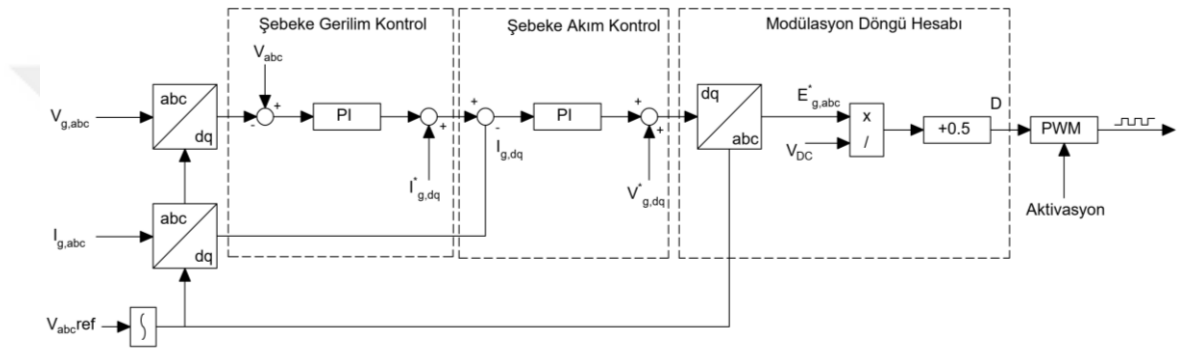
Şebeke takip eden bir evirici, akım kaynağı gibi davranmakta; çıkışını mevcut bir şebeke gerilimi ve frekansına senkronize etmektedir ve aktif (P^*) ile reaktif (Q^*) güç akışını çıkış akımını kontrol ederek sağlamaktadır. Bu yapı, yalnızca şebeke sinyalinin mevcut olduğu durumlarda çalışabilmektedir. Tipik bir şebeke takip eden evirici yapısı Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



Şekil 4.7: GFL tipi evirici yapısı.

4.4.1. Şebeke oluşturan evirici

Şebeke oluşturan eviriciler, özellikle adalanmış mikro şebeke uygulamalarında, merkezi bir senkron jeneratör bulunmaksızın sistemin gerilim ve frekans referanslarını oluşturmak üzere tasarlanmış güç dönüştürücüleridir. Bu eviriciler, bağlı bulundukları noktada belirli bir gerilim genliği V^* ve frekans ω^* üretmektedir; böylece mikro şebekede çalışan diğer kaynaklar için referans görevi üstlenmektedir. GFM evirici yapısı, ideal bir gerilim kaynağı gibi davranmakta ve şebekenin kararlı bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır [75]. Şebeke oluşturan evirici kontrol yapısı Şekil 4.8’de gösterilmektedir.



Şekil 4.8 GFM evirici kontrol yapısı.

GFM yapılarında kontrol genellikle iki döngüden oluşmaktadır: dış gerilim kontrol döngüsü ve iç akım kontrol döngüsü. Dış döngü, şebeke çıkışındaki alternatif akım gerilimini referans değere yaklaştırmayı hedeflemektedir. Bu döngüde ölçülen gerilim ile referans gerilim arasındaki hata, bir PI gerilim denetleyicisine iletilir ve buradan elde edilen çıktı, akım kontrol döngüsü için referans oluşturur. İç döngü ise eviricinin alternatif akım çıkışına uyguladığı akımı bu referans değere göre hassas biçimde düzenlemektedir [75,76]. Bu çift döngülü kontrol yapısının transfer fonksiyonları denklem 4.10 ve denklem 4.11’de gösterilmektedir.

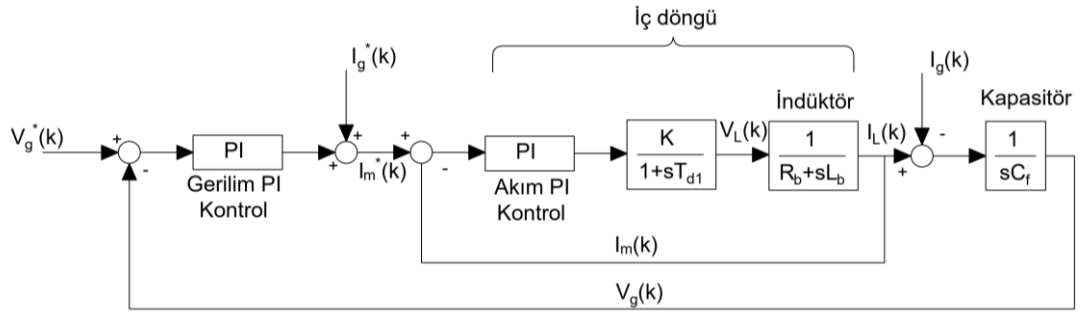
İç akım kontrol döngüsünün transfer fonksiyonu, denklem 4.10’da verilmiştir.

$$G_1(s) = \frac{K}{1 + sT_{d1}} \cdot \frac{1}{R_b + sL_b} \quad (4.10)$$

Denklem 4.10’da K kontrol kazancını, T_{d1} ise sistemdeki içsel gecikme süresini ifade etmektedir. R_b ve L_b , evirici çıkışında yer alan empedans parametrelerini temsil etmektedir. Dış gerilim kontrol döngüsünün transfer fonksiyonu ise denklem 4.11’de gösterilmektedir.

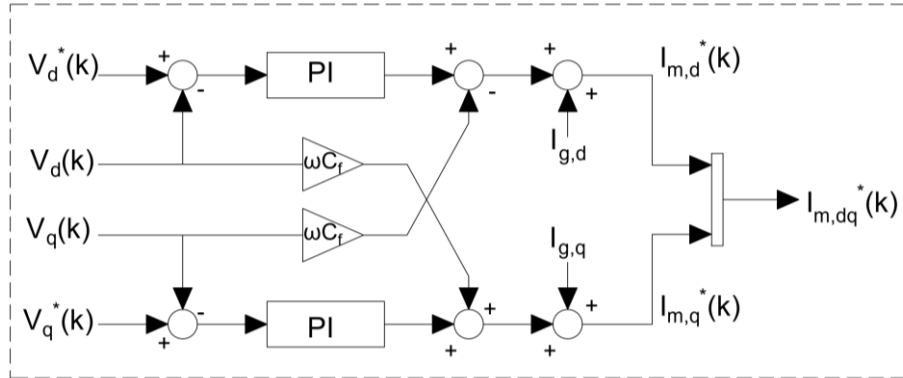
$$G_2(s) = \frac{K}{1 + sT_{d,eq}} \cdot \frac{1}{sC_f} \quad (4.11)$$

Denklem 4.11’de C_f , şebeke çıkışındaki filtre kapasitansını; $T_{d,eq}$ ise iç döngüden kaynaklanan eşdeğer gecikmeyi temsil etmektedir. Bu kontrol yapısının genel sistemi, Şekil 4.9’da verilen model üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 4.9: Sistemin dinamik modeli.

Gerilim kontrolü sırasında, dq eksenlerinde doğal olarak meydana gelen eksenler arası bağlaşıklıkları azaltmak amacıyla denetleyici çıkışına ek bir çözümleme terimi eklenmektedir. Bu sayede, örneğin d-ekseninde bir gerilim artışı talep edildiğinde, q-ekseninde oluşabilecek istenmeyen sapmalar bastırılmaktadır [74,75]. Bu durum, Şekil 4.10’da verilen gerilim denetleyici şemasıyla gösterilmektedir.



Şekil 4.10: DQ ekseninde gerilim kontrolüne ait şematik yapı.

Denetleyici parametrelerinin belirlenmesi sürecinde, simetrik optimum yöntemi kullanılarak dış döngüdeki PI parametreleri tanımlanır. Bu yönteme göre kullanılan bağlantılar, denklem 4.12 ve denklem 4.13'te gösterilmiştir.

$$T_2 = C_f, T_{i2} = a^2 T_{d,eq} \quad (4.12)$$

$$K_{p,v} = \frac{T_2}{a \cdot T_{d,eq}}, \quad K_{i,v} = \frac{K_{p,v}}{T_{i2}} \quad (4.13)$$

Denklem 4.12 ve denklem 4.13'te a , ayar katsayısı olarak seçilmekte ve dış gerilim kontrolcüsünün dinamik yanıtı bu parametreler yardımıyla optimize edilmektedir. Ayrıca, eşdeğer gecikme süresi iç döngüdeki gecikmelerin yaklaşık 10 katı olarak tanımlanmakta ve bu durum denklem 4.14 ile ifade edilmektedir [75].

$$T_{d,eq} = 10T_{d1} \quad (4.14)$$

4.4.2. Şebeke takip eden evirici (GFL)

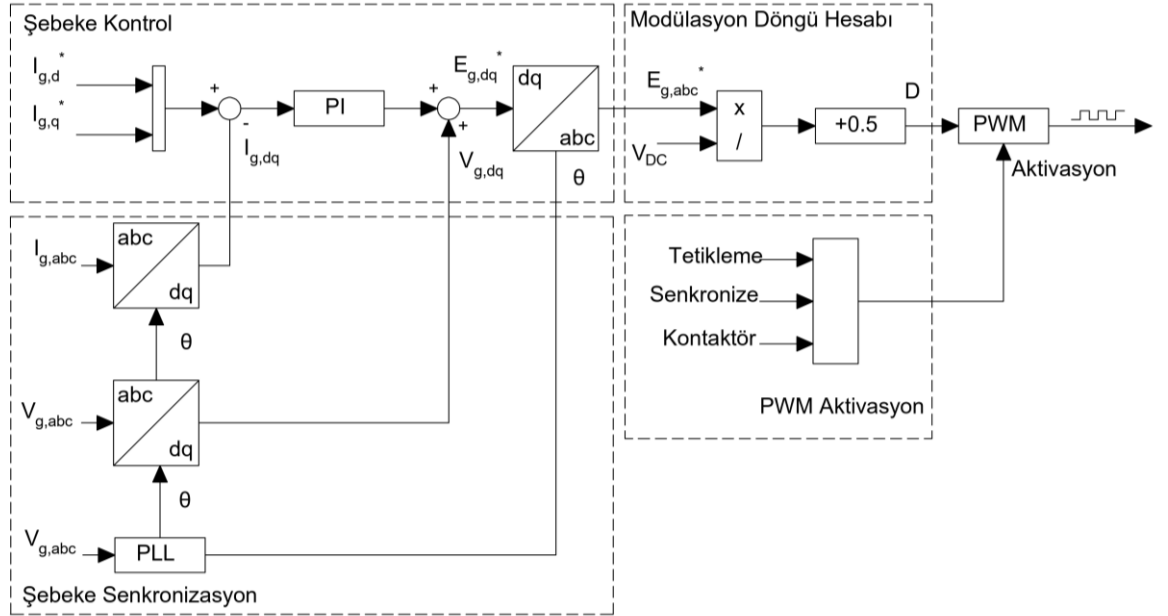
GFL eviriciler, mevcut bir AA şebekesine bağlı çalışacak şekilde tasarlanmış ve senkronizasyon açısından şebekeyi “takip eden” yapılar olarak tanımlanmaktadır. Bu tür eviriciler, çıkışlarını bir akım kaynağı gibi kontrol ederek aktif (P) ve reaktif (Q) güç enjekte eder veya emer. Temel farkları, gerilim referansını kendileri oluşturmamaları, bunun yerine dış bir AA gerilim kaynağını temel almalarıdır.

GFL eviricili (GFLI) kontrol sistemlerinde, şebeke frekansını ve faz açısını doğru şekilde izlemek üzere bir PLL bulunur. PLL modülü, şebeke gerilim bileşenlerini analiz ederek referans faz açısı üretir ve bu açı üzerinden dq dönüşümüne dayalı kontrol gerçekleştirilir. Şebeke gerilimiyle senkron dq referans çerçevesine dönüştürülen akım bileşenleri üzerinden aktif ve reaktif güç kontrolü sağlanır. Bu çerçevede, aktif güç P ve reaktif güç Q değerleri denklem 4.15 ve denklem 4.16'da gösterilmektedir.

$$P = \frac{3}{2} \cdot V_{g,d} \cdot I_{g,d} \quad (4.15)$$

$$Q = \frac{3}{2} \cdot V_{g,q} \cdot I_{g,q} \quad (4.16)$$

Burada $V_{g,d}$ ve $V_{g,q}$, şebeke geriliminin dq bileşenlerini; $I_{g,d}$ ve $I_{g,q}$ ise evirici çıkış akımının dq bileşenlerini ifade etmektedir. Eğer $V_{g,d}$ sabit kabul edilirse, sistemin aktif ve reaktif güç kontrolü doğrudan $I_{g,d}$ ve $I_{g,q}$ akım bileşenleri üzerinden yürütülebilmektedir. Bu durum, akım denetimi temelli bir iç kontrol döngüsü oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Şebeke gerilim ve akım sinyalleri, abc bileşenlerinden dq dönüşümüyle elde edilmektedir. PLL modülü, bu gerilim bileşenlerinden faz açısı θ üretmektedir. Bu açı sayesinde kontrolcü, hedeflenen referans akım bileşenlerine göre çıkışı ayarlamakta ve akım regülasyonunu sağlamaktadır. Elde edilen referans gerilim $E_{g,dq}^*$ bileşenleri, darbelik oranı hesaplama birimine iletilmekte ve burada oluşturulan PWM sinyalleriyle eviricinin anahtarlama komutları üretilmektedir. GFL kontrol yapısı Şekil 4.11’de gösterilmektedir.



Şekil 4.11: GFL evirici kontrol yapısı.

GFL evirici sistemleri, düşük maliyetli olmaları, basit yapıları ve hızlı dinamik tepki süreleri nedeniyle özellikle şebeke bağlantılı PV sistemler ve enerji depolama ünitelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [78]. Ayrıca, paralel çalışan çoklu evirici uygulamalarında, GFL yaklaşımı senkronize güç enjeksiyonunu mümkün kıldığı için tercih edilmektedir. Bununla birlikte, şebeke mevcut olmadığında senkronizasyon yeteneği ortadan kalkmaktadır. Bu durum, ada modunda çalışma senaryolarında GFL yaklaşımının sınırlayıcı bir unsur haline gelmesine yol açmaktadır.

PLL tabanlı senkronizasyon birimi, aktif kontrol sisteminin temelini oluşturmaktadır ve şebeke koşullarındaki ani değişimlere olan duyarlılığı, kontrol yapısının dinamik performansını doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda, önceki bölümlerde ayrıntılı biçimde açıklanan SRF-PLL yapısı, üç fazlı sistemlerde yaygın olarak kullanılan, basit ve etkili bir senkronizasyon çözümüdür. Alternatif olarak, tek fazlı sistemlerde daha yüksek dinamik performans sağlayabilen fakat uygulaması daha karmaşık olan SOGI-PLL yöntemi de tercih edilebilmektedir [78].

Şebeke akım kontrolü, dq eksenlerindeki aktif ve reaktif güç bileşenlerinin doğrudan kontrolü ile sağlanmaktadır. Bu doğrultuda, şebeke akımı bileşenleri $I_{g,d}$ ve $I_{g,q}$, dq ekseninde tanımlanan iki ayrı PI denetleyici ile düzenlenmektedir. Bu kontrol yapısı, vektör akım kontrolü yöntemi kapsamında uygulanmaktadır. Akım kontrol döngüsünün dinamik modeli, sisteme çok kademeli filtre ve pasif elemanların eklenmesiyle birlikte karmaşık bir hal alabilir. Ancak, kontrol parametrelerinin belirlenmesi ve ayarlanması açısından bu model çoğunlukla basitleştirilmektedir. Sistem, birinci dereceden bir gecikme elemanı ve tek bir endüktans ile tanımlanan temel bir yapı olarak modellenmektedir. Bu yaklaşım sonucunda sistemin transfer fonksiyonu denklem 4.17’de tanımlanmaktadır.

$$G_m(s) = \frac{1}{1 + sT_d} \cdot \frac{1}{R_g + sL_g} \quad (4.17)$$

Bu modele dayalı olarak, PI kontrolcü kazançları MO (Magnitude Optimum) yöntemine göre denklem 4.18 ve denklem 4.19’da gösterildiği şekilde ayarlanabilmektedir.

$$K_{p,I} = \frac{L_g}{2T_d} \quad (4.18)$$

$$K_{i,I} = \frac{R_g}{2T_d} \quad (4.19)$$

Denklem 4.18 ve denklem 4.19’da, T_d parametresi sistemdeki küçük gecikmelerin toplamını temsil etmektedir. Bu gecikmelere hesaplama süresi, örnekleme süresi ve modülasyon süresi gibi bileşenler dahildir.

Gecikme süresi T_d 'nin doğru şekilde hesaplanması, kapalı çevrim kontrol performansının kararlılığı açısından kritik öneme sahiptir. Bu gecikme süresi belirlenirken, taşıyıcı üçgen dalga formu kullanıldığı ve örnekleme periyodunun yarısından kısa gecikmelerin $T_{cy} < 0.5T_s$ söz konusu olduğu kabul edilmektedir.

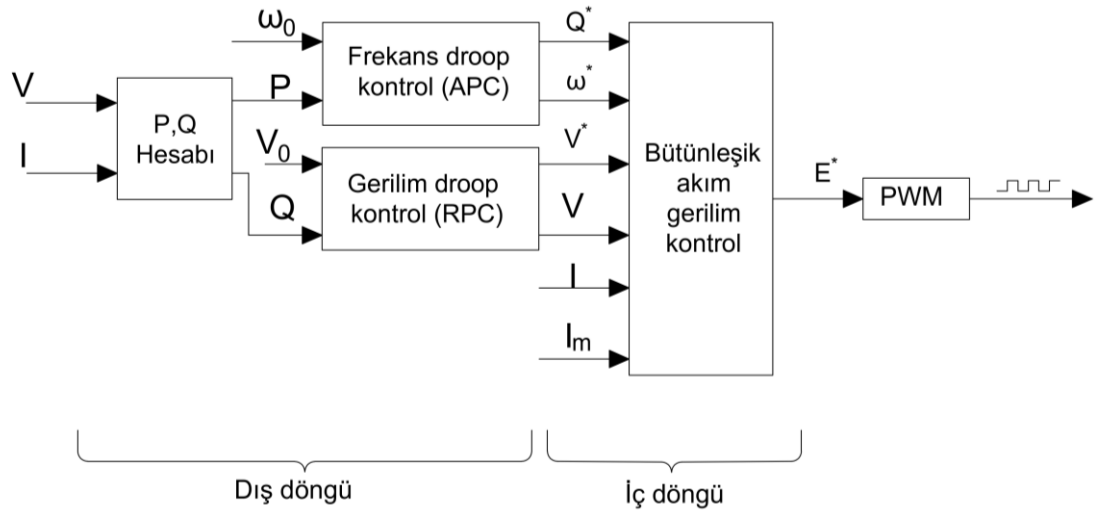
4.5. Droop Kontrol ve Paralel GFMI Senkronizasyonu

4.5.1. Droop kontrolü

Droop kontrolü, bir mikro şebekede paralel çalışan şebeke oluşturan eviriciler (GFMI's) arasında aktif (P) ve reaktif (Q) gücün otomatik ve merkezi bir yapıya bağlı olmaksızın paylaşılmasını, ayrıca her bir kaynağın bağımsız şekilde kontrol edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu yöntem sayesinde, şebeke gerilimi ve frekansı sürekli olarak kontrol altında tutulmaktadır. Droop kontrolü, yalnızca eviriciye yerel olarak ölçülebilen değişkenler üzerinden geri besleme sağladığı için, GFMI's arasında herhangi bir kontrol sinyali iletişimine gerek duymaz ve bu özelliğiyle mikro şebeke güvenilirliğini artırmaktadır [89].

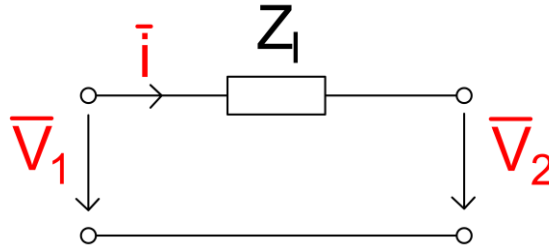
Frekans regülasyonu, şebeke kararlılığı açısından kritik bir gerekliliktir. Uluslararası standartlar ve regülasyonlar, maksimum izin verilen gerilim (V) ve frekans (ω) değişimlerini, ayrıca değişim oranını (RoCoF) sınırlandırarak sistem parametrelerinin güvenli sınırlar içinde tutulmasını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, ani frekans ve gerilim dalgalanmalarını önlemek amacıyla GFM eviricilerin dinamik tepkilerinin kontrollü ve yavaş biçimde gerçekleşmesi gerekmektedir. Droop kontrolünün genel yapısı Şekil 4.12'de gösterilmektedir.

Droop kontrol yaklaşımı, genellikle ardışık yapıdaki alternatif akım (AA) gerilim kontrolcülerinde dış kontrol döngüsü olarak uygulanmakta ve şebeke oluşturan (GFM) sistemler kapsamında detaylandırılmaktadır. Bu dış döngü, aktif güç kontrolü (APC) ve reaktif güç kontrolü (RPC) alt yapılarından oluşmakta olup, referans sinyal üretimi için düşük frekanslı bileşenleri öne çıkaracak şekilde alçak geçiren filtreler (LPF) ile sınırlandırılmaktadır. Böylece iç döngü, dış döngüden gelen referans gerilim vektörünü yüksek bant genişliğinde ve hassasiyetle takip edebilecek şekilde tasarlanmaktadır [89,90].



Şekil 4.12: Droop kontrol yapısının genel görünümü.

Simetrik bir üç fazlı iletim hattı, güç akışının incelenebilmesi amacıyla Şekil 4.13’de gösterildiği gibi tek faza indirgenmiş eşdeğer devre ile modellenmektedir [89].



Şekil 4.13: İletim hattının genel tek fazlı eşdeğer devresi.

Bu yapıda, güç evirici ana şebekeye hat empedansı Z_1 üzerinden bağlı ideal ve kontrol edilebilir bir gerilim kaynağı olarak kabul edilmektedir. Bu durumda, aktif güç (P) ve reaktif güç (Q), sırasıyla denklem 4.20 ve denklem 4.21’de gösterildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$P = \frac{V_1}{R_1^2 + X_1^2} \cdot [R_1(V_1 - V_2 \cos \delta) + X_1 V_2 \sin \delta] \quad (4.20)$$

$$Q = \frac{V_1}{R_1^2 + X_1^2} \cdot [X_1(V_1 - V_2 \cos \delta) + R_1 V_2 \sin \delta] \quad (4.21)$$

Burada V_1 , evirici gerilimini; V_2 ise şebeke gerilimini ifade etmektedir. δ , bu iki gerilim arasındaki faz açısını göstermektedir. R_1 ve X_1 , hattın sırasıyla direnç ve reaktans bileşenleridir. Bu ifadeler, iki temel varsayım altında sadeleştirilmektedir

- Birinci varsayım, faz açısı δ yeterince küçük olduğunda sinüs ve kosinüs ifadelerinin Taylor açılımı ile yaklaşık olarak $\sin(\delta) \approx \delta$ ve $\cos(\delta) \approx 1$ şeklinde kabul edilmesidir.
- İkinci varsayım ise, hattın esas olarak endüktif davranış göstermesidir. yani $R_1 \ll X_1$ kabul edilir.

Bu kabuller altında aktif ve reaktif güç denklemleri, denklem 4.22 ve denklem 4.23 ile ifade edilmektedir.

$$P \approx \frac{V_1 V_2}{X_1} \delta \quad (4.22)$$

$$Q \approx \frac{V_1 (V_1 - V_2)}{X_1} \quad (4.23)$$

Bu denklemler, yukarıda belirtilen varsayımların sağlandığı durumda aktif ve reaktif güç akışlarının birbirinden ayrık olarak kontrol edilebildiğini göstermektedir. Aktif güç akışı esas olarak hat üzerindeki gerilimlerin faz farkına, reaktif güç akışı ise gerilim genlikleri arasındaki farka bağlıdır.

4.5.1.1. Droop eğrileri

Droop kontrolü, adını kontrol stratejisinde kullanılan eğim (droop) karakteristiklerinden almaktadır. Droop eğrileri, her bir şebeke oluşturan eviricinin (GFMI), yük talebindeki değişimlere karşı frekans ve gerilim değerlerini nasıl ayarlaması gerektiğini tanımlar. Sisteme yavaş dinamikler ve belirlenmiş droop eğrileri kazandırılarak, birden fazla GFMI'nın aynı anda aynı şebeke gerilimini düzenlemeye çalıştığı paralel bağlantı senaryolarında olası çatışmaların önüne geçilmektedir. Bu yöntem sayesinde, her bir evirici otomatik olarak kendi çıkışını uyarlayarak sistemin kararlılığı sağlanıncaya kadar koordineli şekilde çalışmaktadır.

Aktif güç kontrolü (APC) droop eğrisi, aktif güç ile frekans ($P-\omega$) arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Burada frekans değeri, dolaylı olarak faz açısını da denetlemektedir. Reaktif güç kontrolü (RPC) droop eğrisi ise, reaktif güç ile gerilim genliği ($Q-V$) arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Bu durumda, reaktif güçteki değişiklikler doğrudan gerilim genliğini etkilemektedir. APC ve RPC arasındaki doğrusal ilişkiler, denklem 4.24 ve denklem 4.25'te ifade edilmektedir [92].

$$\omega^* = \omega_0 - mP \quad (4.24)$$

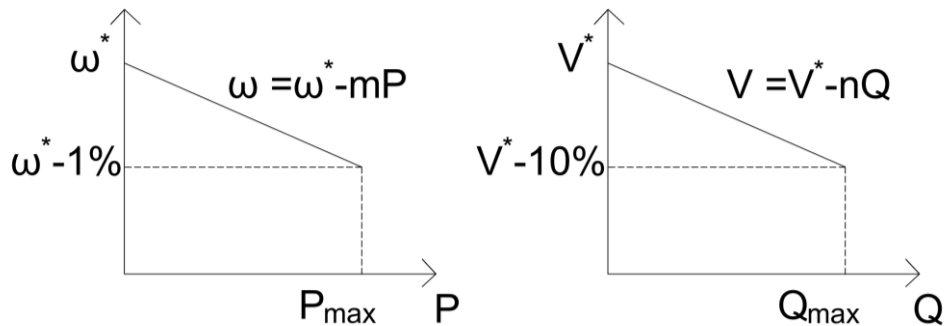
$$V^* = V_0 - nQ \quad (4.25)$$

Burada m ve n , sırasıyla frekans ve gerilim genliği için statik droop katsayılarını; ω_0 ve V_0 ise nominal frekans ve gerilim değerlerini ifade etmektedir. Statik droop katsayıları, sistemin kararlı durumda izin verilen maksimum frekans ve gerilim sapmalarını karşılamak üzere belirlenmektedir ve bu katsayılar denklem 4.26 ve denklem 4.27'de hesaplanmaktadır [92].

$$m = \frac{\Delta\omega}{P_{max}} \quad (4.26)$$

$$n = \frac{\Delta V}{Q_{max}} \quad (4.27)$$

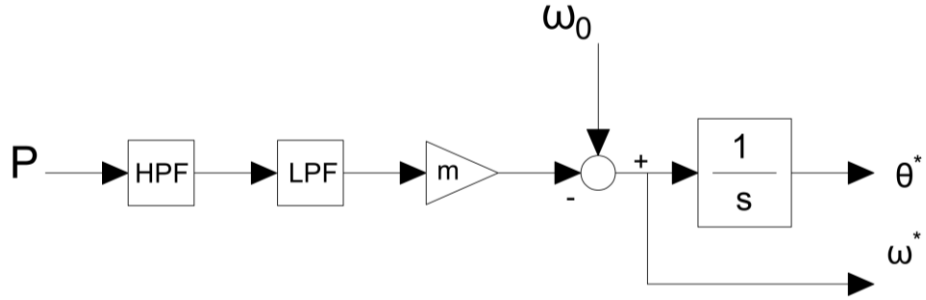
Şekil 4.14'te frekans ve gerilim droop karakteristikleri gösterilmektedir. Burada doğrusal droop eğrilerinin eğimleri, sistemin statik droop katsayılarını ifade etmektedir.



Şekil 4.14: Frekans ve gerilim droop karakteristikleri.

4.5.1.2. Droop kontrolünün uygulanması

Aktif güç kontrolcüsünün genel yapısı Şekil 4.15'te gösterilmektedir. Bu yapıda, kontrol dinamiklerinin yavaşlatılması ve maksimum RoCoF gereksiniminin karşılanabilmesi amacıyla bir alçak geçiren filtre sisteme entegre edilmektedir [93].



Şekil 4.15: APC genel yapısı.

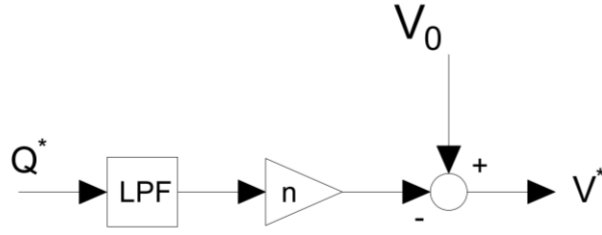
Maksimum izin verilen RoCoF (ρ) değeri ve maksimum aktif güç (P_{maks}) göz önüne alındığında, alçak geçiren filtrenin gecikme süresi (τ_{LPF}), denklem 4.28 ile hesaplanabilmektedir.

$$\tau_{LPF} = \frac{m}{\rho} P_{max} \quad (4.28)$$

Denklem 4.28'de m ifadesi, aktif güç droop katsayısını göstermektedir. Ayrıca, ada modunda çalışan bir şebekede nominal frekansın yeniden sağlanabilmesi amacıyla yapıya bir yüksek geçiren filtre (HPF) de dahil edilmektedir. Droop karakteristiği, denklem 4.29 ile tekrar ifade edilmektedir.

$$\omega_{ref} = \omega_0 - mLPF(s)HPF(s)P \quad (4.29)$$

Bu yapıda, güç değişimi sabit olduğunda (kararlı durumda), denklemin ikinci terimi sıfıra yaklaşmakta ve ω_{ref} nominal frekans (ω_0) değerine geri dönmektedir. Böylece şebeke frekansında uzun vadede sapma oluşmasının önüne geçilmektedir. Reaktif güç kontrolcüsünün genel yapısı ise Şekil 4.16'da gösterilmektedir. Burada, gerilim genliği ile reaktif güç arasında doğrudan bir ilişki bulunduğu için yüksek geçiren bir filtre kullanılmasına gerek duyulmamaktadır.



Şekil 4.16: RFC genel yapısı.

Sistem dinamiklerinin kontrollü bir biçimde yönetilebilmesi için, yalnızca alçak geçiren filtre (LPF) kullanılması yeterli olmaktadır. Böylece kontrolcü, kararlı ve güvenli bir güç paylaşımı sağlamaktadır.

4.5.2. Şebeke oluşturan eviricilerin paralel çalışması

Mikro şebeke sistemlerinde yaygın olarak kullanılan eviriciler genel olarak şebeke oluşturan ve şebeke takip eden olarak ikiye ayrılmaktadır. GFL eviriciler, hızlı dinamik tepkileri sayesinde şebekeye kolayca senkron olabilen akım kaynakları şeklinde çalışır. Dolayısıyla bu tip eviricilerin paralel olarak devreye alınması genellikle basit ve ek maliyet gerektirmeyen bir çözümdür. GFM ise gerilim kaynağı karakteristiğine sahip olup, nispeten yavaş dinamik davranışlar sergilemektedir [92].

GFM eviricilerin paralel çalışmasında dikkate alınması gereken birtakım önemli hususlar ortaya çıkmaktadır. GFM eviriciler çıkış gerilimlerini ayrı ayrı kontrol ettiğinden, birden fazla gerilim kontrolcüsü ortak bağlantı noktasına (PCC) paralel bağlandığında her bir kontrolcü PCC gerilimini kendi referansına çekmeye çalışmaktadır. Bu durum şebekede istenmeyen gerilim salınımlarına ve kararsızlığa yol açabilmektedir [93].

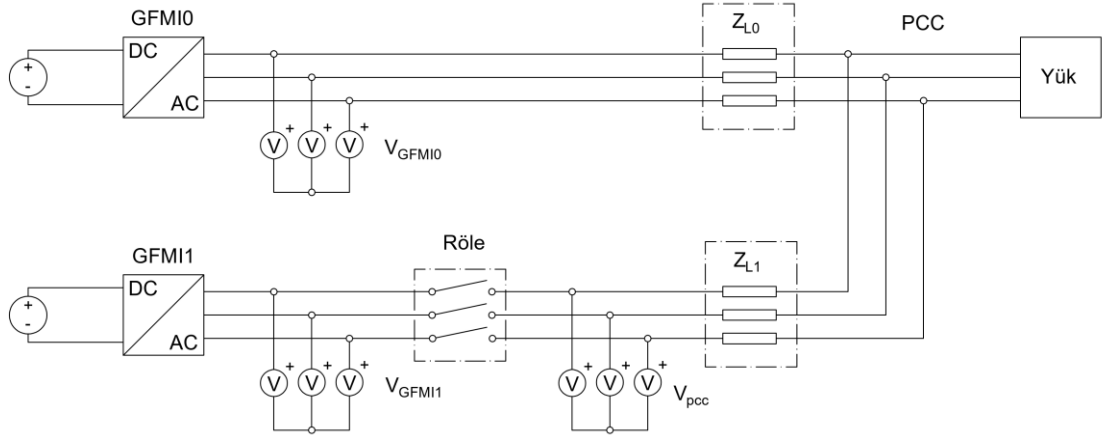
Ada modunda çalışan her GFM evirici, kendi fazı, frekansı ve genliği ile farklı bir çıkış gerilimine sahip olabilmektedir. Ancak paralel bağlantı durumunda, tüm eviricilerin aynı PCC gerilimine tam olarak uyum sağlaması gerekmektedir. Bu nedenle, fiziksel bağlantıdan önce mutlaka bir ön senkronizasyon süreci uygulanmalıdır.

Ön senkronizasyon olmadan yapılan bağlantı, PCC’de yüksek ve potansiyel olarak tehlikeli bir aşırı akıma yol açabilir ve gerilim kontrolcülerinin kararsız hale gelmesine neden olabilir. Ayrıca, şebeke fazı ve frekansındaki ani değişimler, izin verilen RoCoF sınırlarını aşarak şebekeye bağlı diğer cihazlarda hasara yol açabilmektedir. Paralel çalışan GFM eviriciler arasında güç paylaşımının etkin biçimde gerçekleştirilmesi de kritik önemdedir. Özellikle farklı güç kapasitelerine sahip GFM eviricilerde, aktif ve reaktif gücün adil şekilde paylaşılması gerekmektedir. Bu paylaşım, temel olarak eviricilerin çıkış gerilimi fazı ve genliğini ayarlayabilme yeteneklerinden kaynaklanmaktadır. Güç paylaşımının hassas şekilde düzenlenebilmesi için eviriciler arasında doğrudan iletişim kurulabilmektedir. Ancak bu durum, sistem karmaşıklığını artırmaktadır [95].

Konvansiyonel olarak senkron jeneratörlerin paralel çalışmasında uygulanan yöntemler, GFM eviricilere de adapte edilebilmektedir. İletişimsiz, güvenilir ve yaygın bir yaklaşım olarak droop kontrolü öne çıkmaktadır. Droop kontrolü, paralel gerilim kontrolcülerindeki çatışmaları engellerken, GFM eviriciler arasında aktif ve reaktif güç paylaşımını droop katsayılarının seçimiyle düzenleme imkânı sunmaktadır [93]. Bu bölümde daha önce detaylandırılan droop kontrol yapısı, ön senkronizasyon işlevi eklenerek genişletilecek ve droop katsayılarının güç paylaşımı üzerindeki etkileri incelenecektir.

4.5.2.1. GFM eviricilerin ön senkronizasyonu

Paralel çalışan şebeke oluşturan eviricilerde, sistem kararlılığı ve güvenliği için ön senkronizasyon süreci kritik bir rol oynamaktadır. Bu süreci açıklamak amacıyla, iki adet GFM evirici ve bir yükten oluşan bir mikro şebeke senaryosu göz önüne alınabilir. Burada, ortak bağlantı noktasındaki (PCC) şebeke gerilimi zaten ilk evirici (GFMI0) tarafından belirlenmiş durumdadır. İkinci evirici (GFMI1) ise şebekeye bağlanmadan önce, çıkış gerilimini PCC gerilimiyle tam olarak uyumlu hâle getirmelidir. Özellikle gerilim kontrolcülerinin nispeten yavaş dinamik yapısı nedeniyle, GFMI1’in anlık olarak çıkış gerilimini PCC’ye uyarlaması mümkün değildir [96]. Röle kapatılıp fiziksel bağlantı kurulmadan önce gerçekleştirilen bu süreç, ön senkronizasyon olarak adlandırılmakta ve Şekil 4.17’de gösterilmektedir.



Şekil 4.17: Yük altında paralel çalışan GFM eviricileri.

Ön senkronizasyonun başarıyla sağlanabilmesi için, GFMII'nin PCC üzerindeki gerilimi (V_{PCC}) ölçmesi ve kendi referans çıkış gerilimini (V^*) bu değere eşitleyecek şekilde ayarlaması gerekmektedir. Bu işlem, üç temel adımdan oluşmaktadır:

- Gerilim genliğinin ön senkronizasyonu
- Gerilim frekansının ön senkronizasyonu
- Gerilim fazının ön senkronizasyonu

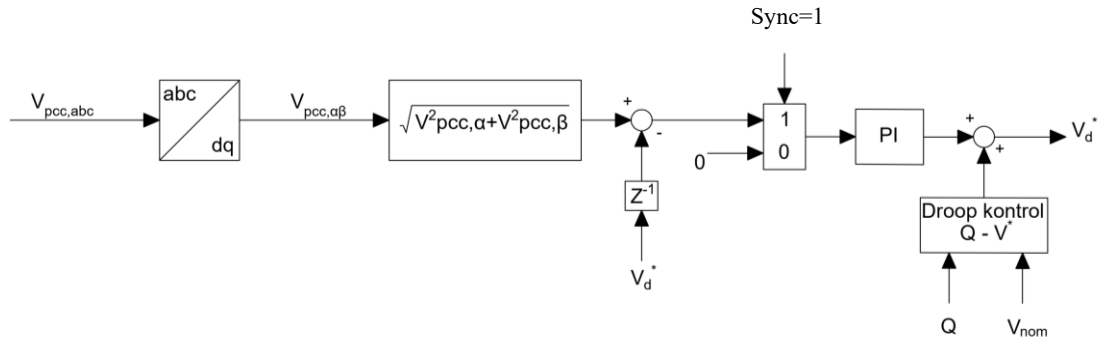
Her bir adım için, PI kontrolcüler yardımıyla düzeltici kontrol sinyalleri üretilmektedir. Özellikle integral bileşenin katkısı sayesinde, bu yöntemle V^* ve V_{PCC} arasındaki hata, kararlı durumda neredeyse sıfıra indirilebilmektedir. Böylece, GFMII şebekeye güvenli ve sorunsuz biçimde entegre edilirken sistemde gerilim veya frekans kararsızlığı oluşmasının önüne geçilmiş olmaktadır [96,97]. Droop kontrolünün sağladığı avantajlardan biri, aktif ve reaktif güç akışlarının birbirinden bağımsız şekilde yönetilebilmesidir. Bu sayede, çıkış geriliminin genliği (V^*) ile frekansı (ω^*) ayrı ayrı kontrol edilerek, genlik ön senkronizasyonu işlemi frekans ve fazdan bağımsız olarak gerçekleştirilebilmektedir [97]. Gerilim genliği, sistemin faz bilgisine ihtiyaç duyulmadan, sabit referans çerçevesinde ($\alpha\beta 0$) hesaplanabilmektedir.

Üç fazlı bir (abc) sinyalin sabit referans eksenlerine ($\alpha\beta 0$) dönüştürülmesi, “abc'den Alpha-Beta-Zero” bloğu ile mümkün olmaktadır. Bu dönüşüm, denklem 4.30’da gösterildiği gibi gerçekleştirilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \omega_{ref} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Burada, referans geriliminin ayarlanması doğrudan V^* üzerinden yapılabileceği gibi, droop kontrolcüsünün reaktif güç girişi (Q) üzerinden de gerçekleştirilebilmektedir. Ancak, ikinci yöntemin kullanılması, özellikle hat empedansının ağırlıklı olarak dirençli olduğu durumlarda reaktif güç paylaşımında hata oluşturabileceğinden, doğrudan V^* ayarı daha güvenilir bir çözüm sunmaktadır [96,97,98].

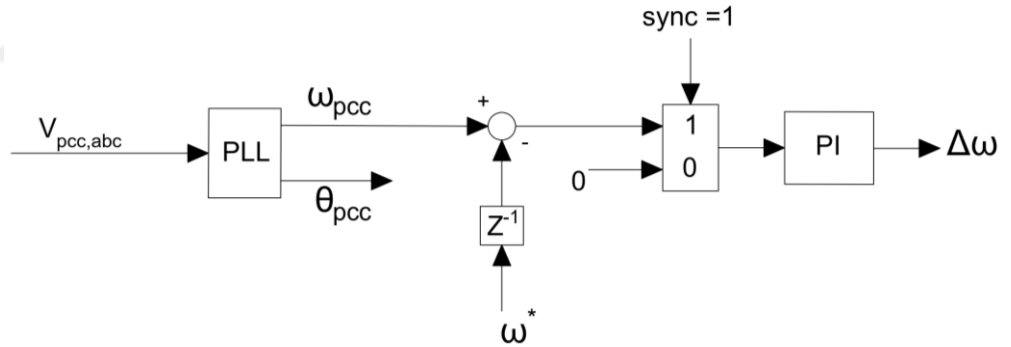
Genlik ön senkronizasyonunun kontrol diyagramı Şekil 4.18’de gösterilmektedir. Burada PI kontrolcüsünün çıkışı doğrudan droop kontrolcüsündeki $Q-V^*$ referansına iletilmektedir. Sistemin ada modunda çalıştığı durumlarda gerilim kontrolcüsü üzerindeki istenmeyen etkilerin önlenmesi için, PI kontrolcüsünün girişini devre dışı bırakan bir anahtar eklenmiştir (sync = 0 iken giriş sıfırlanmaktadır). Ayrıca, V^* geri beslemesine gecikme bloğu eklenerek olası cebrik döngülerin önüne geçilmektedir. Bu yapıyla, GFM eviricinin şebekeye paralel bağlantısı öncesinde gerilim genliği güvenli ve kararlı şekilde PCC seviyesine uyarlanabilmektedir.



Şekil 4.18: Genlik senkronizasyonu kontrol yapısı.

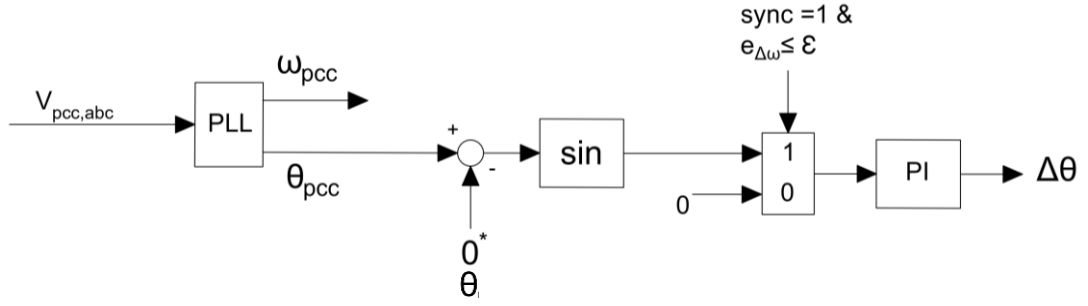
Gerilim genliğiyle birlikte, frekans ve fazın da başarılı şekilde senkronize edilebilmesi için PCC geriliminin (V_{pcc}) faz ve frekans bilgisinin hassas biçimde ölçülmesi gerekmektedir. Bu amaçla, yük değişimlerinden kaynaklanan şebeke gerilim bozulmalarına karşı yüksek bağışıklık sağlayan DSOGI-PLL yöntemi tercih edilmektedir. Frekans ve faz ön senkronizasyonları ise birbirinden bağımsız şekilde yürütülememektedir. Fazın senkronizasyonu doğrudan GFM eviricinin frekans referansında yapılan artış veya azalışlarla sağlanmaktadır. Bu nedenle, faz senkronizasyonu işleminin yalnızca frekans ön senkronizasyonu tamamlandıktan sonra başlatılması gerekmektedir. Aksi halde, şebekeyle frekans uyumu sağlanmadan faz düzeltmesine başlanırsa, her iki kontrol döngüsü de aynı anda frekans referansını değiştirmeye çalışabilir ve bu durum frekansın dalgalanmasına yol açabilmektedir.

Bu olumsuzluğun önüne geçebilmek için öncelikle frekans ön senkronizasyonu devreye alınmaktadır. Faz senkronizasyonu ise ancak frekans hatası belirli bir eşik değerin altına indiği durumda başlatılmaktadır. Frekans senkronizasyonunun kontrol şeması Şekil 4.19'da gösterilmektedir.



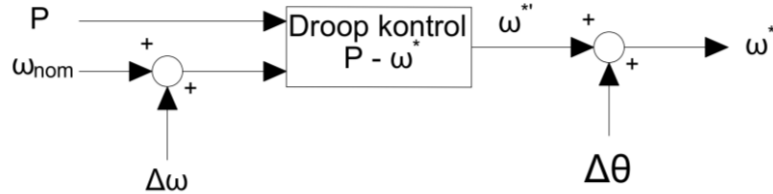
Şekil 4.19: Frekans ön senkronizasyonu kontrol yapısı.

Faz ön senkronizasyonunda, açı hatası θ_{pcc} ile θ^* arasındaki farkın sinüsü alınarak hesaplanmaktadır. Bu yaklaşım, açı değerleri 0 veya 2π etrafında döndüğünde oluşabilecek süreksizlikleri önlemektedir. Küçük açı farklarında ise sinüs fonksiyonu doğrudan açı farkı ile yaklaşık olarak eşit kabul edilmektedir. Faz senkronizasyonunun blok diyagramı Şekil 4.20'de gösterilmektedir.



Şekil 4.20: Faz ön senkronizasyonu kontrol yapısı.

Her iki döngüden elde edilen düzeltici terimler ($\Delta\omega$ ve $\Delta\theta$), doğrudan droop kontrolcüsündeki P- ω referansına iletilmektedir. Bu bütünleşik yapı Şekil 4.21’de gösterilmektedir.



Şekil 4.21: Frekans ve faz ön senkronizasyonunun genel yapısı.

Gerilim genliği, frekans ve fazdaki hata sıfıra ulaştığında, ön senkronizasyon tamamlanmış kabul edilir ve röle güvenle kapatılabilir. Bağlantı gerçekleştikten sonra, ön senkronizasyonun devreden çıkarılması ve PI kontrolcülerinin girişlerinin sıfırlanması gerekmektedir. Bu sayede düzeltici terimler sabitlenir ve senkronizasyonun sonunda ulaştıkları değer korunur. Bu yaklaşım ile sistemin kararlı bir şekilde paralel çalışma moduna geçişi güvence altına alınmaktadır [96-99].

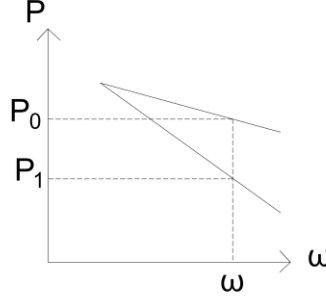
4.5.2.2. Droop kontrolcülerinde güç paylaşımı

İki adet GFM evirici arasında aktif güç paylaşımını sağlamak amacıyla, frekans droop denklemlerinde farklı m_0 ve m_1 katsayıları kullanılabilir. Bu durumda frekans referansları, denklem 4.31 ve denklem 4.32’de gösterilmektedir.

$$\omega_0^* = \omega_{nom} - m_0 P_0 \quad (4.31)$$

$$\omega_1^* = \omega_{nom} - m_1 P_1 \quad (4.32)$$

Kararlı durumda, iki eviricinin frekans referansları eşitlenir ($\omega_0^* = \omega_1^*$), bu nedenle güç paylaşımı doğrudan m_1/m_0 oranı ile belirlenmektedir. Bu ilişki, Şekil 4.22’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.22: Paralel operasyon grafiği.

Droop katsayılarının farklı seçilmesi, ani yük değişimlerinde frekansta salınımlara yol açabilir. İletim hattındaki aktif güç akışı, denklem 4.33 ile ifade edilmektedir.

$$P \approx 3 \frac{V_1 V_2}{X_1} \delta \quad (4.33)$$

Burada, $t=0$ anında bir yük adımı gerçekleştiğinde, $t=0^+$ sonrasında P_0 ve P_1 değerleri yukarıdaki denkleme göre yeni bir seviyeye sıçramaktadır ve ardından yavaşça kararlı duruma ulaşmaktadır. Geçiş sürecinde, iki eviricinin referans frekansları geçici olarak farklı kalmaktadır. Bunun sonucu olarak, GFM’lerin oluşturduğu gerilimler arasında faz kayması oluşmakta ve bu durum aktif güçte iki evirici arasında salınımlara sebep olmaktadır. Bu etki, yapılan deneysel çalışmalarda da gözlemlenebilmektedir [98].

Geçiş sırasında ortaya çıkan bu güç salınımlarını söndürmenin bir yolu, orantılı droop kontrolüne türevsel bir terim eklemektir [89,90]. Bu sayede, ani yük değişimlerinin sistem üzerindeki olumsuz etkileri azalmakta ve daha kararlı bir güç paylaşımı sağlanmaktadır. Sonuç olarak, droop kontrolü ve ön senkronizasyon stratejileri, birden fazla güç kaynağı paralel bağlandığında kararlı ve düzgün bir şekilde senkronize olmasını temin eden araçlardır. Droop eğrileri, senkronizasyon sonrasında güç paylaşımını otomatik hale getirmektedir. Ön senkronizasyon ve aktif/pasif senkronizasyon teknikleri ise bağlantı anının sorunsuz geçmesini sağlamaktadır.

Bu yöntemler sayesinde paralel çalışan GFM eviriciler, tıpkı çoklu senkron jeneratörler gibi uyum içinde çalışmakta, hem yük paylaşımı yapmakta hem de şebeke kararlılığını korumaktadır.



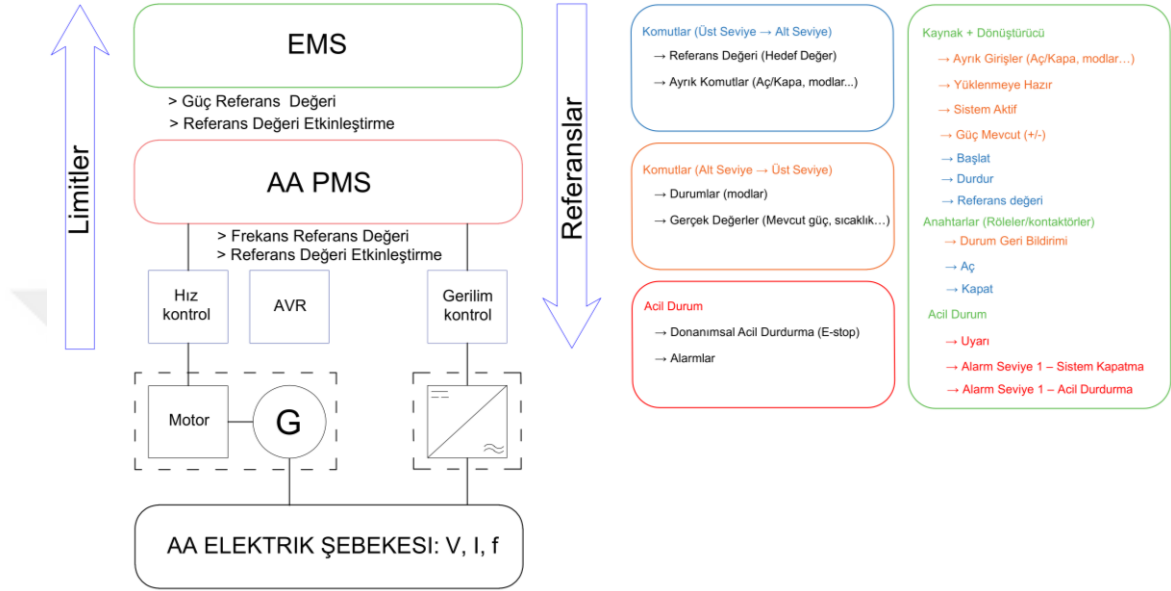
BÖLÜM 5. ENERJİ YÖNETİM VE GÜÇ YÖNETİM SİSTEMİNİN KONTROL STRATEJİSİ

Bu bölümde, enerji yönetim sistemi ve güç yönetim sistemi kontrol mantıkları detaylandırılmıştır ve akış diyagramları ile sistemin enerji yönlendirme stratejileri modellenmiştir. Evirici senkronizasyonu, kontrol algoritmaları ve olası senkronizasyon problemleri üzerine literatür destekli analizler yapılmıştır. Bu analizler doğrultusunda, sistemin enerji akışı ve güç dengesini sağlayan mantıksal yapılar oluşturulmuştur. EMS-PMS yazılımına entegre edilen operasyon modları geliştirilmiştir. Bu modlar kapsamında, sistemin senkronizasyon, yük paylaşımı ve enerji önceliklendirme fonksiyonları modellenmiş ve dağıtım sistemiyle ilişkili kontrol senaryoları açıklanmıştır. Ayrıca, tez kapsamında yazılım düzeyinde geliştirilmiş olan mod yapıları, devreye alma süreçleri ve farklı yük koşullarına göre sistem tepkileri değerlendirilmiştir.

5.1. EMS ve PMS Fonksiyonel Yapısı

EMS ile PMS, hibrit denizcilik güç sistemlerinin kararlı, güvenli ve verimli çalışmasını sağlayan temel kontrol unsurlarıdır. Bu iki sistem birlikte çalışarak, enerji üretim kaynaklarının optimizasyonunu, güç paylaşımını, senkronizasyonu ve acil durum yönetimini gerçekleştirmektedir. EMS, enerji kaynaklarının çalışma önceliğini belirlemekte, PMS ise bu kararların sahada uygulanmasını ve güvenli operasyon sağlamaktadır. EMS ve PMS sistemleri arasındaki komut arayüzlerinde gerçekleşen bilgi akışı, referans değerlerin iletilmesini, sistem bileşenlerinin çalıştırılmasını ve durdurulmasını, durum geri bildirimlerinin toplanmasını kapsamaktadır. Üst seviyeden alt seviyeye doğru gönderilen referanslar ve komutlar ile alt seviyeden üst seviyeye iletilen gerçek zamanlı ölçümler ve durum bilgileri sayesinde sistem kontrolünün sürekliliği sağlanmaktadır [101,102]. Ayrıca, acil durum senaryoları kapsamında çift

yönlü alarm ve donanımsal durdurma sinyalleri iletişim yapısında yer almaktadır. Bu yapı, güç üretim ekipmanlarının senkron çalışmasını, yük paylaşımını ve güvenli işletimini mümkün kılacak şekilde tasarlanmaktadır. Söz konusu etkileşimler Şekil 5.1’de gösterilmektedir.



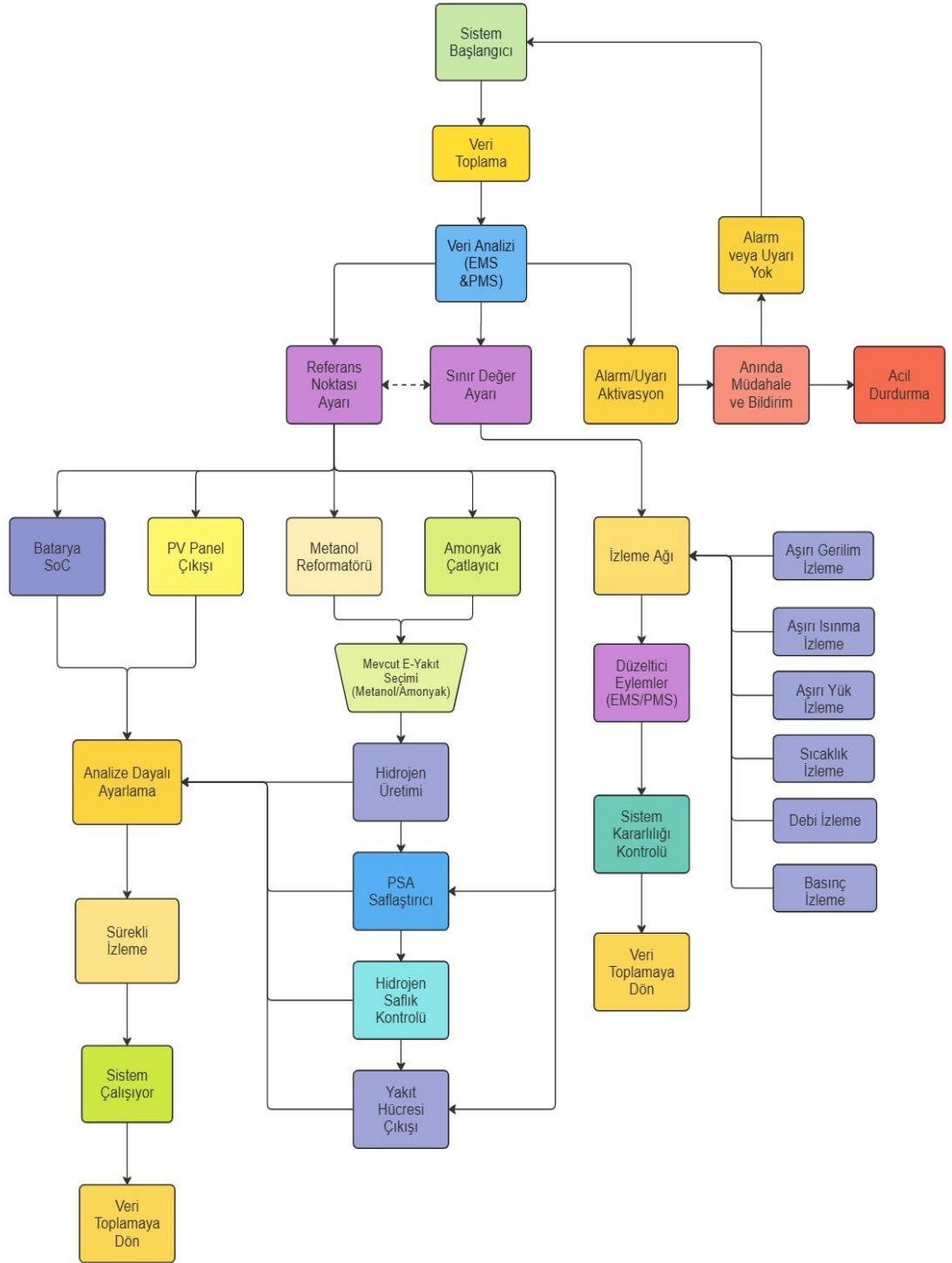
Şekil 5.1: EMS/PMS arayüzleri.

EMS’in işlevi, sistemdeki tüm enerji kaynaklarının üretim, tüketim ve depolama düzeylerini izleyerek anlık talebe göre optimum dağılımı sağlamaktır. AA elektrik şebekesinin genel yönetimi bu sistem aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. EMS, batarya durumunu, güneş paneli çıkışlarını, yakıt türünü ve hidrojen üretim süreçlerini analiz ederek uygun ayar noktalarını belirlemekte ve bu verileri PMS ile paylaşmaktadır. Ayrıca EMS, metanol reformasyon ve amonyak parçalama sistemlerinden gelen hidrojen üretimini izlemekte, PSA saflaştırma modülünden çıkan hidrojenin saflık kontrolünü yapmakta ve yakıt hücresi sisteminin güvenli çalışmasını garanti altına almaktadır. Bu süreç boyunca EMS, enerji kaynakları arasında yük paylaşımı yapmakta ve gerektiğinde bataryanın şarj veya deşarj durumunu dinamik olarak yönetmektedir [103,104].

PMS’in görevi ise, sistemin bütünsel dengesini ve sürekliliğini sağlamaktır. Bu kapsamda PMS, jeneratör, evirici ve anahtarlama birimlerinin kontrolünü üstlenmekte ve sistemin nominal gerilim ile frekans aralıklarında çalışmasını sağlamak için gerekli işlemleri uygulamaktadır. Yukarıdan aşağıya referans değerleri ve mod geçişi gibi

komutları almakta, aşağıdan yukarıya ise gerçek güç seviyesi, sıcaklık, arıza uyarıları gibi durum bilgilerini ve acil durum sinyallerini iletmektedir. Bu çift yönlü haberleşme yapısı sayesinde EMS ve PMS, tüm enerji kaynaklarının aynı anda devrede olmasını ya da sıralı biçimde devreye girmesini güvenli şekilde yönetmektedir. PMS özellikle senkronizasyon işlemlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Yeni bir jeneratör devreye alınmadan önce, gerilim ve faz parametrelerinin mevcut şebekeye uyumlu hale getirilmesini sağlamaktadır.

Sistemin başlangıcından itibaren tüm veriler toplanmakta, analiz edilmekte ve elde edilen bilgiler kritik eşik değerleriyle karşılaştırılmaktadır. Bu analiz sonucunda sistem parametreleri güncellenmekte ya da sınır değerler yeniden tanımlanmaktadır. Eğer bir uyarı veya alarm durumu söz konusuysa, sistem acil durumu otomatik olarak değerlendirmekte ve EMS ile PMS tarafından gerekli düzeltici adımlar başlatılmaktadır. EMS bu süreçte batarya şarj-deşarj döngülerini yöneterek enerji akışını dengelemekte, PMS ise yük paylaşımı, yük kesme, senkron başlatma ve ağır tüketici kontrolü gibi işlemleri yürütmektedir. Böylece sistem, sadece operasyonel verimlilik açısından değil, aynı zamanda güvenlik açısından da optimum düzeyde çalışmaktadır [106-110]. Tüm bu karar mekanizmalarını, alt sistemler arası ilişkileri, alarm tetiklemelerini ve enerji dönüşüm süreçlerini içeren genel blok diyagram Şekil 5.2’de gösterilmektedir.



Şekil 5.2: EMS ve PMS genel fonksiyonel yapı blok diyagramı.

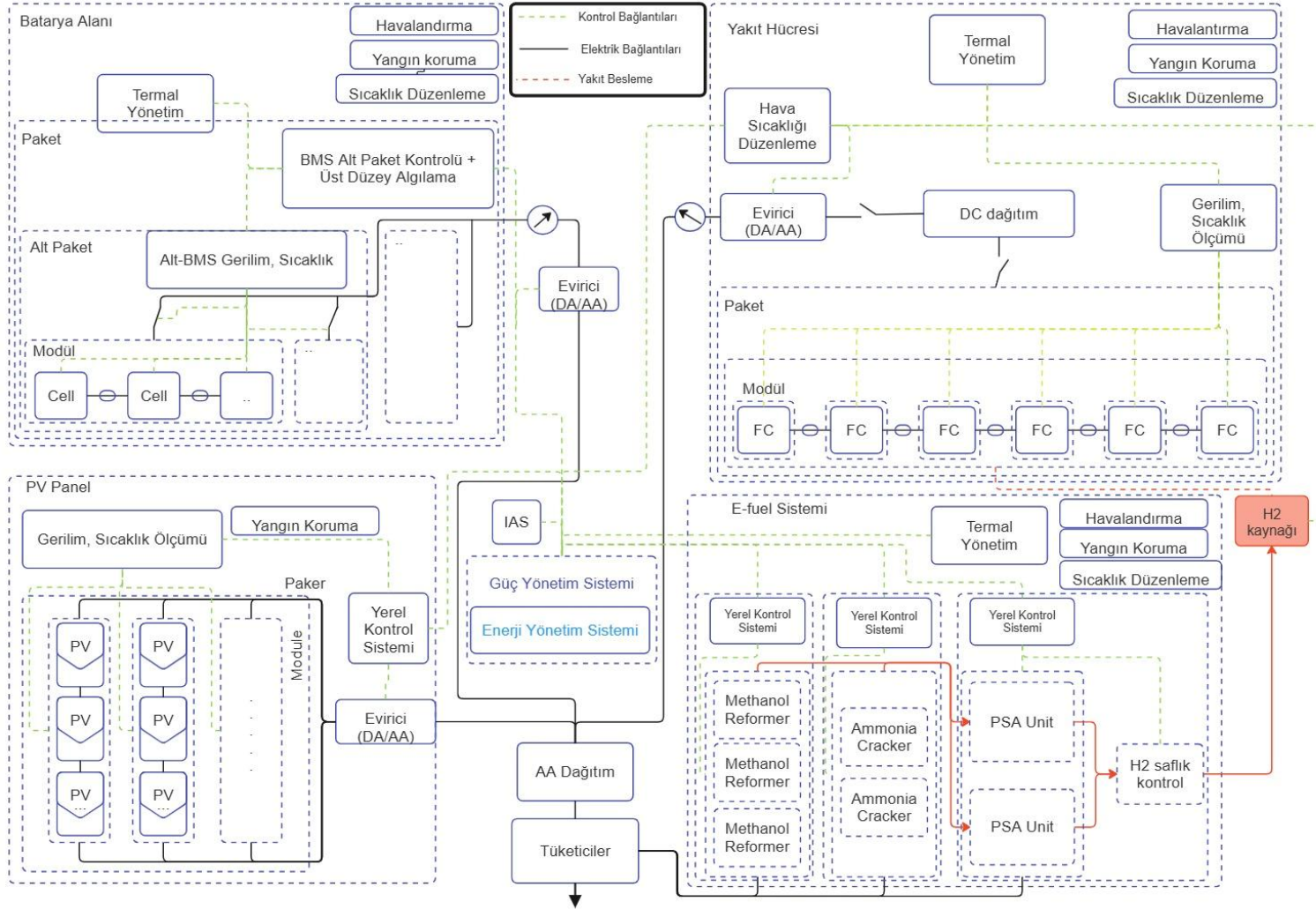
5.2. Alt Sistemlerin Entegrasyonunda EMS ve PMS Arayüzleri

EMS ve PMS, gemi üzerindeki tüm enerji kaynakları ve tüketim noktalarıyla entegre çalışan merkezi kontrol yapılarıdır. Bu yapılar yalnızca enerji üretimi ve dağıtımı ile sınırlı kalmamakta, aynı zamanda yakıt dönüşüm sistemleri, batarya depolama üniteleri, PV paneller ve güvenlik sistemleri gibi çok sayıda alt birimin eş zamanlı ve senkronize çalışmasını sağlamaktadır. Şekil 5.3'te gösterilen sistem mimarisi, EMS ve PMS'nin bu alt sistemlerle olan fonksiyonel bağlantılarını, veri yollarını ve kontrol etkileşimlerini bütüncül biçimde sunmaktadır.

Batarya enerji depolama sistemi, PMS ile doğrudan haberleşen Batarya Yönetim Sistemi (BMS) aracılığıyla kontrol edilmektedir. BMS, her bir alt batarya paketi için gerilim, akım ve sıcaklık gibi kritik parametreleri izlemekte ve sistemin güvenli sınırlar içinde çalışmasını sağlamaktadır. Bu yapı, aşırı akım, yüksek sıcaklık ve hücre gerilimi gibi arıza senaryolarına karşı gömülü alarm sistemleri ile yangın algılama, havalandırma ve sıcaklık düzenleme gibi destekleyici birimlerle bütünleştirilmektedir.

Yakıt hücresi sistemleri, PMS ile yük paylaşımı ve frekans senkronizasyonu açısından doğrudan etkileşim hâlinindedir. Yakıt Hücresi Yönetim Sistemi (FCMS), EMS üzerinden enerji arzını denetlemekte ve şebeke gerilimi ile frekans referansı sağlayarak senkronizasyonun sürdürülebilirliğini güvence altına almaktadır. Sisteme entegre hidrojen saflık sensörleri, sıcaklık ve basınç ölçüm birimleri, EMS-PMS'ye gerçek zamanlı veri aktararak işletme güvenliğine katkı sunmaktadır [105,107,110,111]. Ayrıca, kaçak gaz tespiti ve acil durdurma gibi işlevler, sınıflandırma kuruluşlarının güvenlik standartlarına uygun olarak sistem tasarımına dahil edilmektedir.

E-yakıt sistemleri içerisinde yer alan metanol reformer ve amonyak parçalama birimleri, lokal kontrol sistemleri vasıtasıyla EMS ve PMS ile haberleşmektedir. Bu üniteler, metanol veya amonyaktan elde edilen hidrojenin PSA ünitesi aracılığıyla saflaştırılmasını sağlamaktadır. Üretim süreci boyunca sıcaklık, akış hızı ve gaz saflığı parametreleri anlık olarak izlenmekte ve elde edilen veriler EMS/PMS merkezine aktarılmaktadır. Şekil 5.3'te detaylandırılan bu yapı, yakıt akış yollarını, kontrol sinyallerini ve alarm mekanizmalarını da kapsamaktadır.



Şekil 5.3 Alt Sistemlerin Entegrasyonunda EMS ve PMS Arayüzleri.

PV sistemler ise bağımsız eviriciler aracılığıyla AA dağıtım sistemine entegre edilmektedir. EMS üzerinden kontrol edilen PV panellerin çıkışları sürekli olarak gerilim, akım ve sıcaklık açısından izlenmektedir. Aynı zamanda bu sistemlerde yangın algılama, aşırı akım koruma ve izolasyon mekanizmaları ile güç güvenliği sağlanmaktadır. EMS, PV üretimini sistem ihtiyaçlarına göre batarya şarjı veya doğrudan yük beslemesi yönünde otomatik olarak yönlendirmektedir.

EMS ve PMS yapıları, tüm bu alt sistemlerden gelen verileri değerlendirerek enerji üretim ve tüketimini dengeleyen, sistem kararlılığını koruyan ve operasyonel güvenliği artıran çok katmanlı bir karar mekanizması oluşturmaktadır. EMS, kaynak önceliklendirmesi ve enerji yönlendirmesi işlevlerini yürütmekte, PMS ise gerilim ve frekans sabitliğini sağlayarak enerji kaynaklarının şebekeye güvenli entegrasyonunu mümkün kılmaktadır [112,113]. Şekil 5.3, bu işlevsel yapıların birbirleriyle olan veri alışverişini ve sistemin bütünlüğünü kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır.

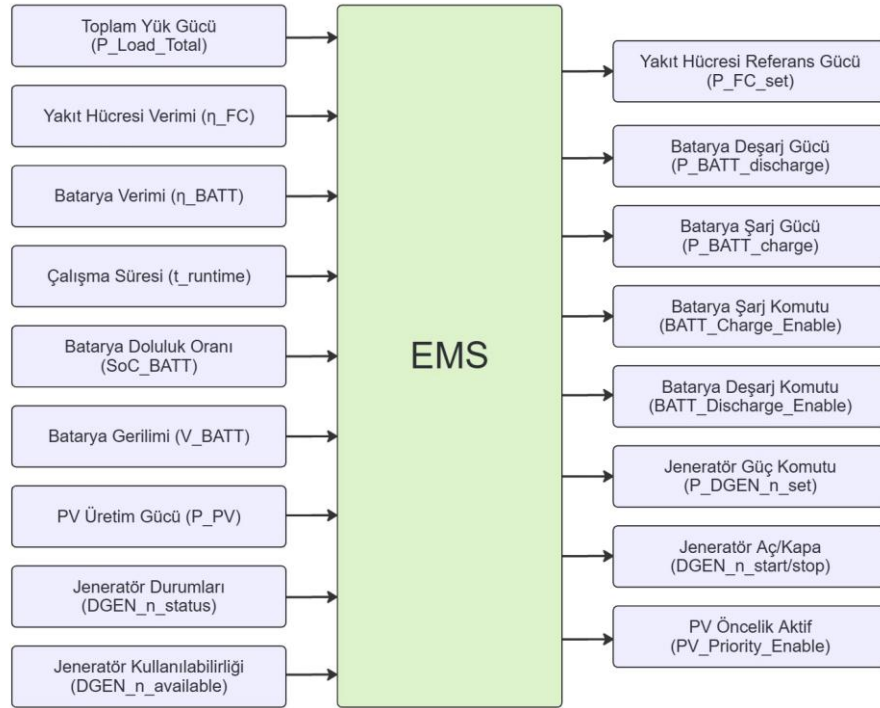
5.3. EMS Kontrol Stratejisi ve Operasyon Modları

EMS, gemi üzerindeki çok kaynaklı hibrit enerji yapısında yer alan batarya, yakıt hücresi, PV panel ve gerektiğinde dizel jeneratör sistemlerinin birlikte ve optimize şekilde çalışmasını sağlayan merkezi bir denetleyicidir. Bu sistem, yük talebine ve enerji kaynaklarının mevcut durumuna göre kaynakların devreye alınıp alınmayacağına karar vermektedir. Kontrol stratejisi hem gerçek zamanlı izleme hem de karar verme mekanizmalarını içermektedir. EMS, sistemin elektriksel yükünü, batarya SoC verisini, yakıt hücresinin çalışma durumunu, PV panel çıkışlarını ve batarya gerilimini sürekli olarak izlemektedir. Bu veriler, EMS'in karar algoritmasında değerlendirilmekte ve bataryanın şarj veya deşarj edilmesi, yakıt hücresinin aktif hale getirilmesi ya da PV üretiminin sisteme aktarılması gibi işlemleri başlatacak kontrol sinyallerine dönüştürülmektedir. Tüm bu enerji kaynakları DA üretmekte ve DA/AA eviriciler aracılığıyla üç fazlı alternatif akıma dönüştürülerek ortak bir AA baraya bağlanmaktadır. Bu yapı sayesinde EMS, kaynaklar arası güç aktarımını ve geçişlerini koordine etmektedir [113,114].

EMS'in yürüttüğü bu kontrol mantığı, yük ayırım modeline dayanmaktadır. Bu modelde EMS, sistemdeki her kaynağın anlık katkısını ayrı ayrı değerlendirmekte ve toplam yükü

kaynaklar arasında paylaştırmaktadır. Bu paylaşırma, hem optimizasyon hedeflerine hem de kaynakların teknik sınırlarına göre yapılmaktadır. EMS'in kullandığı giriş verileri (batarya SoC, gerilim, zamanlayıcı, yük talebi, PV ve yakıt hücresi uygunluğu) ve ürettiği çıkış sinyalleri (yakıt hücresi yüklemesi, batarya yüklemesi, batarya şarj ve deşarj geçişleri, şarj gücü) Şekil 5.4'te gösterilmektedir.

EMS yalnızca kaynakların devreye alınmasını değil, aynı zamanda sistemin üç ana işletim modu arasında geçişlerini de yönetmektedir: Sıfır Emisyon Modu (ZEO), Hibrit Mod ve Dizel Jeneratör Tedarik (DGS) Modu. Bu mod geçişleri, özellikle batarya SoC seviyesi, PV üretiminin mevcudiyeti ve yük talebinin anlık değişimlerine göre belirlenmektedir. EMS, geçişleri kademeli olarak yönetmekte ve enerji kaynakları arasında sorunsuz bir devir teslim sağlamaktadır. Bu sayede AA barada gerilim ve frekans gibi sistem parametrelerinde ani değişimlerin önüne geçilmekte ve sistemin kararlılığı korunmaktadır.



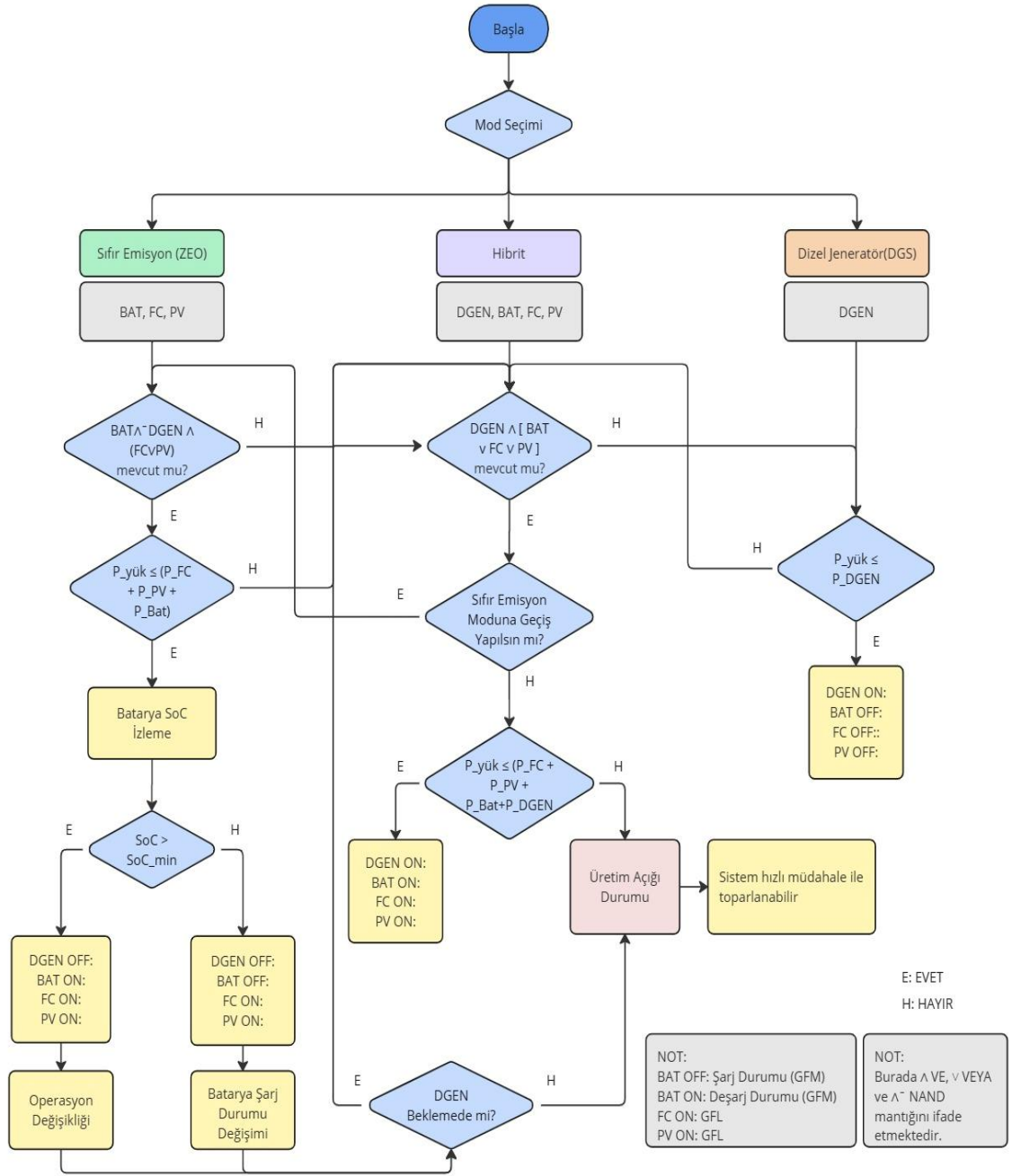
Şekil 5.4 Sistemin EMS G/Ç blok diyagramı.

Şekil 5.5'te, EMS'in üç ana mod arasında nasıl geçiş yaptığı, kaynakların hangi koşullarda devreye alındığı ve sistemin nasıl kararlı tutulduğu adım adım gösterilmektedir. PV üretiminin ve yakıt hücresi çıkışının yeterli olduğu durumlarda

sistem otomatik olarak sıfır emisyon moduna geçebilmektedir. PV üretiminin kesildiği ya da yükün arttığı senaryolarda batarya ve gerekirse dizel jeneratör hibrit modda devreye alınmaktadır. EMS, bu kararı verirken bataryanın mevcut şarj durumu ve sistemdeki üretim-tüketim dengesini dikkate almaktadır. Bu yapı sayesinde sistem, yalnızca sürdürülebilir enerji kaynaklarını önceliklendirerek yakıt tasarrufu sağlamakta, aynı zamanda acil yük talebi gibi durumlarda hızlı yanıt verebilmektedir.

EMS'in bu bütüncül yapısı, enerji kaynakları arasında senkron ve optimize bir etkileşim sağlamaktadır. Amaç yalnızca kaynak kullanımını verimli hale getirmek değil, aynı zamanda AA baranın gerilim ve frekans sınırları içinde kalmasını garanti altına almaktır.

Sistem, aynı anda birden fazla kaynağı devrede tutabilmekte veya yük durumuna göre önceliklendirme yaparak kaynakları dinamik biçimde yönetebilmektedir. Böylece gemi üzerindeki elektriksel yükler kesintisiz şekilde beslenmiş olmaktadır [111-114].

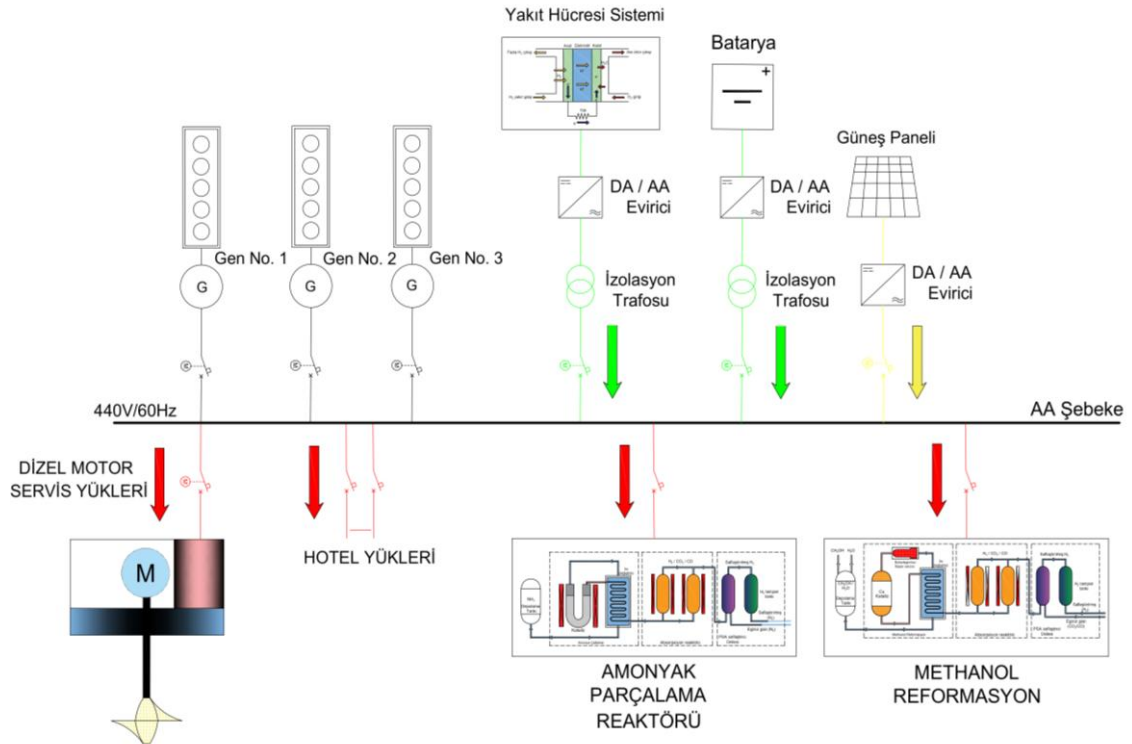


Şekil 5.5: Operasyon modu akış diyagramı.

5.3.1. Sıfır emisyon modu

Sıfır Emisyon modunda dizel jeneratörler çevrim dışı durumdadır ve sistemin güç ihtiyacı batarya, yakıt hücresi (PEMFC) ve güneş paneli (PV) kaynaklarından karşılanmaktadır. Uluslararası liman regülasyonları ve yerel mevzuatlar nedeniyle bu modun liman koşullarında aktif olarak kullanılması çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, Sıfır Emisyon modu düşük emisyon hedeflerinin önceliklendirildiği normal seyir operasyonlarında tercih edilmektedir.

Sıfır Emisyon moduna geçiş gerçekleştirilmeden önce sistem, dizel jeneratör, batarya ve güneş paneli kaynaklarının birlikte çalıştığı Hibrit modda işletilmektedir. PV üretimi güneş ışığına bağlı olduğundan gündüz saatlerinde $P_{PV}(t)$ değeri yüksek olabilmekte, gece ise $P_{PV}(t) \approx 0$ olmaktadır. Geçiş anında dizel jeneratörlerin AA baraya bağlantısı kesilmekte ve referans gerilim-frekans kaynağı olarak batarya tabanlı evirici GFM modda çalışmaya devam etmektedir. Batarya, bu geçiş aşamasında AA baranın kararlılığını sağlamak ve sistemin şebeke gerilimi ile frekansını belirlemektedir. Yakıt hücresi sistemi bu süreçte GFL modda çalışmakta ve bataryanın oluşturduğu referansa senkronize şekilde güç enjekte etmektedir.



Şekil 5.6: Sıfır emisyon modu.

Sistem tam kararlılığa ulaştıktan sonra, yakıt hücresi GFM moduna geçirilebilmekte ve bu durumda batarya ünitesiyle birlikte droop kontrolü aracılığıyla yük paylaşımı gerçekleştirilmekte, ortak AA baranın gerilim seviyesi birlikte düzenlenmektedir. Sıfır Emisyon modu çalışma yapısı Şekil 5.6’da gösterilmektedir.

EMS, anlık yük talebi $P_{yük}(t)$ ile enerji kaynaklarının çıkışlarını dengeleyecek şekilde çalışmaktadır. Sıfır Emisyon modunda bu güç dengelemesi, denklem 5.1 ile ifade edilmektedir.

$$P_{Yük}(t) = P_{Bat}(t) + P_{FC}(t) + P_{PV}(t) \quad (5.2)$$

Denklem 5.1’e göre toplam yük talebi, batarya eviricisinden çekilen güç P_{Bat} , aktif yakıt hücresi güç çıkışı P_{FC} ve PV panelinin ürettiği güç P_{PV} toplamıyla karşılanmaktadır. EMS, farklı alt senaryolara göre bu kaynaklar arasındaki güç paylaşımını düzenlemektedir. Sıfır emisyon modunun alt senaryoları:

Yalnızca batarya senaryosu: Şebekenin güç ihtiyacı yalnızca batarya sistemi tarafından karşılanmaktadır ve PV sistemi devrede değildir. Kısa süreli veya düşük güç talebinde, batarya eviricisi GFM modda çalışmakta, yükü beslemekte ve AA baranın frekans-gerilim referansını sağlamaktadır. Anlık yük talebi ile bataryadan çekilen güç eşit olmakta ve bu durum denklem 5.2 ile ifade edilmektedir.

$$P_{Yük}(t) = P_{Bat}(t) \quad (5.2)$$

Bu senaryoda batarya yalnızca deşarj modunda çalışmaktadır, şarj işlemi bu modda mümkün değildir. Yakıt hücresi sistemi kapalı durumda olup hidrojen tüketimi gerçekleşmemektedir. Batarya, ani yük değişimlerine anında yanıt vererek şebeke frekansını sabit tutmaktadır. Ancak batarya doluluk oranı (SoC) sürekli azaldığından, belirlenen alt sınır değer olan SoC_{min} ’e ulaşıldığında EMS, mevcut modu sonlandırmakta ve farklı bir işletim moduna geçişi tetiklemektedir.

Batarya + yakıt hücresi senaryosu: Daha uzun süreli seyirlerde ve yüksek enerji ihtiyacının karşılanmasında batarya ile PEM yakıt hücresinin birlikte çalıştığı senaryoyu ifade etmektedir. Bu durumda yük talebi denklem 5.3 ile gösterilmektedir:

$$P_{Yük}(t) = P_{Bat}(t) + P_{FC}(t) \quad (5.3)$$

Bu senaryoda yakıt hücresi, sürekli güç sağlayan temel kaynak olarak GFL modda çalışmakta, batarya ise GFM modda şebeke referanslarını belirlemektedir. Ancak bazı durumlarda yakıt hücresi de GFM moduna geçirilebilmekte ve bu durumda batarya ile arasında droop kontrollü paralel güç paylaşımı gerçekleştirilmektedir. EMS, bataryanın doluluk oranı değerine göre yakıt hücresi çıkış gücünü dinamik olarak ayarlamaktadır. Bu kontrol sayesinde batarya, genellikle %50–80 SoC bandında tutulmakta ve aynı zamanda hidrojen tüketimi de optimize edilmektedir. Ancak batarya SoC değeri alt sınır olan SoC_{min} 'e yaklaşırsa, sistem bataryayı şarj etme ihtiyacı nedeniyle işletim stratejisini değiştirmektedir. Bu durumda, yakıt hücresi ani yük değişimlerine yeterince hızlı yanıt veremeyebileceği için, EMS şebeke kararlılığına bağlı olarak farklı bir işletim moduna geçişi tetiklemektedir. Bataryanın şarj/deşarj geçişleri sırasında sistem kararlılığı değerlendirilmekte ve gerekirse Hibrit moda geçiş yapılmakta, sistemin frekans-gerilim istikrarı sağlanana kadar bu modda kalınmaktadır [112,114].

Batarya + PV senaryosu: Yalnızca batarya senaryosunun temel prensiplerinin geçerli olduğu ancak gündüz saatlerinde güneş paneli üretiminin sisteme destek sağladığı bir durumdur. Sistemin referans kaynağı hâlâ batarya tabanlı evirici olup GFM modda çalışmaktadır. PV sistemi ise GFL modda çalışarak AA baraya senkron şekilde güç enjekte etmektedir. Bu durumda yük dengelemesi denklem 5.4 ile ifade edilmektedir.

$$P_{Yük}(t) = P_{Bat}(t) + P_{PV}(t) \quad (5.4)$$

Burada batarya, sistemin ana güç kaynağıdır ve PV yalnızca destekleyici bir rol üstlenmektedir. PV'den elde edilen güç doğrudan yükü karşılamak için kullanıldığından, bataryanın sağlaması gereken güç miktarı azalmaktadır. Bu sayede batarya üzerindeki yük hafiflemekte ve SoC daha yavaş azalmaktadır. Dolayısıyla, bataryanın şarj durumuna geçmesini gerektirecek alt sınır olan SoC_{min} değerine ulaşma süresi geciktirilmektedir. PV üretimi yeterli düzeyde sürdürülebilirse, sistem bu modda daha uzun süre kararlı şekilde çalışabilmektedir. PV üretiminin azalması veya yük artışı nedeniyle bataryanın SoC değeri alt sınıra yaklaşırsa, EMS tarafından mod geçişi tetiklenmektedir.

Batarya + Yakıt Hücresi + PV senaryosu: Sıfır emisyon işletim koşullarında tüm temiz enerji kaynaklarının eş zamanlı olarak kullanıldığı, en kapsamlı ve istikrarlı senaryoyu temsil etmektedir. Güç dengesi için denklem 5.1 ifadesi geçerlidir.

Gündüz saatlerinde PV sistemi, ışıının koşullarına bağı olarak değışken güç üretmekte ve GFL modda çalışarak AA baraya senkron şekilde güç enjekte etmektedir. PV üretimi yalnızca yükün bir kısmını karşılamak amacıyla kullanılmakta, sistemin kararlılığına doğrudan etki etmemektedir. Bu nedenle PV, yükü azaltmakta ve dolaylı olarak yakıt hücresi ile batarya üzerindeki yükü hafifletmektedir.

Yakıt hücresi, bu modda her zaman aktif olan temel enerji kaynağıdır. Tipik olarak GFL modda çalışmakta ve bataryanın oluşturduğu referans sinyallerine senkronize olmaktadır. Ancak sistem yükü kararlı ve ani değışimler sınırlıysa, yakıt hücresi GFM modda çalışacak şekilde yapılandırılabilmekte ve batarya ile birlikte droop kontrollü paralel güç paylaşımı gerçekleştirilebilmektedir [112].

Batarya eviricisi, bu modda GFM modda çalışarak sistemin frekans ve gerilim referansını belirlemektedir. Ayrıca dinamik yük değışimlerine karşı hızlı yanıt vererek şebeke kararlılığını sürdürmektedir. Batarya çoğunlukla deşarj modunda çalışmakta, PV üretimi varsa bataryanın sağlaması gereken güç miktarı azaldığından SoC seviyesi daha yavaş düşmektedir. Bu durum, bataryanın şarj moduna geçmesini gerektiren zamanın geciktirilmesine olanak tanımaktadır. Ancak sistem uzun süre boyunca yalnızca sıfır emisyon kaynaklarıyla çalıştığında ve batarya sürekli deşarj modunda kaldığında, batarya SoC(t) seviyesi zamanla azalmaktadır. Eğer PV üretimi yetersiz kalır ve yük hâlâ yüksekse, bu durum kritik alt eşik olan SoC_{min} seviyesine ulaşılmasına neden olabilir. Bu gibi durumlarda EMS, sistem kararlılığına ilişkin durumu değıerlendirerek karar vermektedir. Bu kontrol koşulu denklem 5.5 ile ifade edilmektedir:

$$P_{bat} > 0 \quad \wedge \quad \frac{dSoC(t)}{dt} < 0 \quad \wedge \quad SoC(t) \leq SOC_{min} \quad (5.5)$$

Denklem 5.5 sağlandığında batarya şarj gereksinimi oluşmakta, ancak yakıt hücresi GFM modda çalışıyor ve ani yük değışimlerine yeterince hızlı yanıt veremiyorsa, sistem kararlılığı risk altına girmektedir. Böyle bir durumda EMS tarafından Hibrit moda geçiş tetiklenmekte, dizel jeneratörler AA baraya senkronize edilerek devreye alınmakta, bataryanın şarjı sağlanmakta ve sistemin frekans-gerilim istikrarı yeniden tesis edilmektedir. EMS, bu modda kaynakları şu öncelik sırasına göre yönetmektedir:

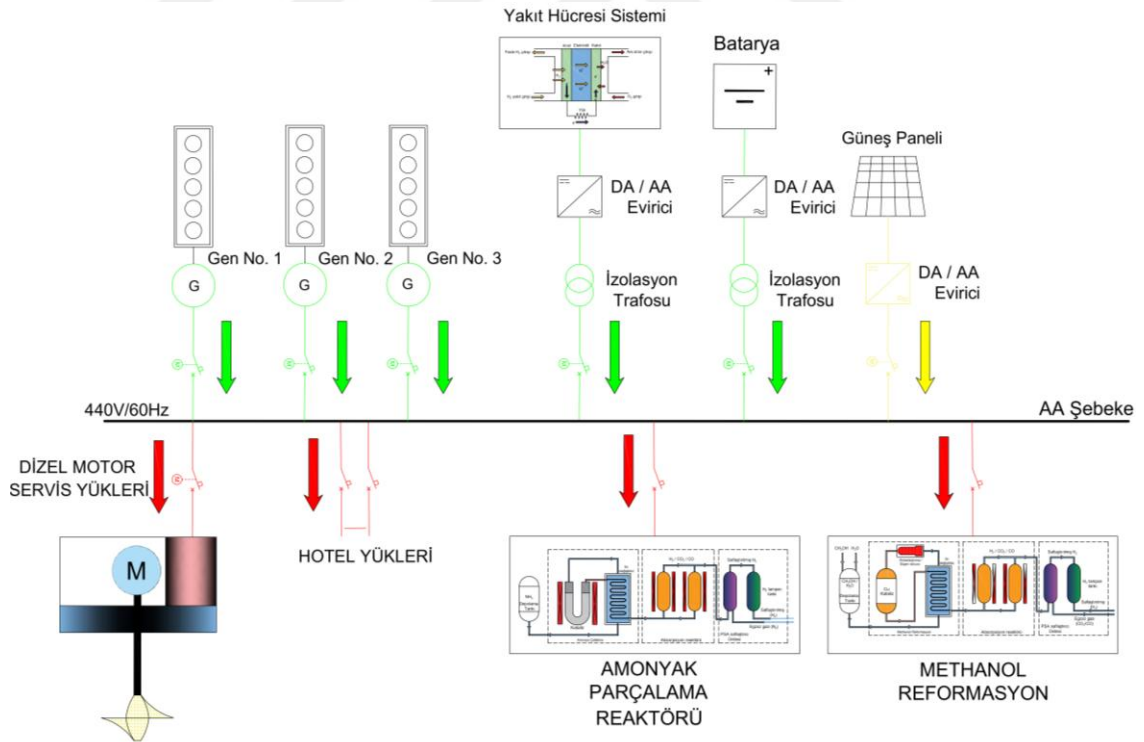
- Batarya yalnızca dengeleme ve referans oluşturma amacıyla görev yapmaktadır,

- Yük faktörünün çoğunluğu yakıt hücresi tarafından sağlanmaktadır,
- PV üretimi mevcutsa yükün bir kısmı bu kaynaktan karşılanmaktadır.

Bu yapı sayesinde hem hidrojen tüketimi hem de batarya deşarjı optimize edilmekte, şebeke kararlılığı korunarak sistemin sıfır emisyon modunda mümkün olan en uzun süre boyunca çalışması sağlanmaktadır.

5.3.2. Hibrit mod

Hibrit mod, dizel jeneratör temelli bir işletim yapısını esas alarak, batarya ve PV panel desteğiyle sistemin hem güç sürekliliğini hem de esnekliğini sağlayan bir çalışma modudur. Bu mod, özellikle sıfır emisyon kaynaklarının (batarya, yakıt hücresi ve PV) güç üretiminin yetersiz kaldığı durumlarda veya sistemin gerilim ve frekans stabilitesini sürdüremediği anlarda devreye girmektedir. Şekil 5.7’de, hibrit mod kapsamında dizel jeneratör, batarya ve opsiyonel temiz kaynakların birlikte görev aldığı sistem yapısı sunulmaktadır.



Şekil 5.7: Hibrit çalışma modu.

Hibrit modun işletim mantığı, dizel jeneratörlerin GFM kaynak olarak sürekli aktif tutulduğu bir senaryoya dayanmaktadır. Bu kapsamda, batarya sistemi her zaman dizel jeneratörün oluşturduğu şebekeye bağlı olarak çalışmaktadır. Batarya eviricisi bu durumda GFL modda veya sistem dengesine katkı sunması gereken özel koşullarda GFM modda çalışmakta ve jeneratörle birlikte droop kontrollü paralel güç paylaşımı yapabilmektedir. Sistem kontrolü açısından esas olan, bataryanın hiçbir koşulda sistemin tek başına referans kaynağı olmamasıdır; dolayısıyla bu modda şebeke referansını belirleyen yapı dizel jeneratördür.

Bu modun temel kullanım amacı, sıfır emisyon modunun yetersiz kaldığı koşullarda sistem kararlılığını sağlamak ve gerekli güç desteğini temin etmektir. Batarya SoC_{min} seviyesine yaklaşmış ve yük talebi halen yüksekse, yalnızca batarya ve yakıt hücresi ile enerji sağlamak mümkün olmayacaktır. Aynı şekilde sıfır emisyon modunda şebeke parametreleri kararsızsa, dizel jeneratörler devreye alınarak şebekedeki dalgalanmalar baskılanmakta ve sistem dengelenmektedir. Bu mod aynı zamanda, yakıt hücresinin devreye alınma sürecinde bir köprü görevi de görmektedir. Yakıt hücresi sisteminin çalışmaya başlaması belirli bir hazırlık süresi gerektirmektedir. Bu süre zarfında hibrit mod aracılığıyla sistemin istikrarlı çalışması sürdürülmekte, yakıt hücresi devreye alındığında ve sistem kararlı hale geldiğinde ise dizel jeneratör bekleme konumuna alınarak sıfır emisyon moduna geçiş yapılmaktadır. Toplam yük bu modda denklem 5.6 ile gösterilen şekilde karşılanmaktadır:

$$P_{Yük}(t) = P_{DG}(t) + P_{Bat}(t) + P_{FC}(t) + P_{PV}(t) \quad (5.6)$$

Burada $P_{DG}(t)$ dizel jeneratör tarafından sağlanan temel güçtür. Batarya yalnızca desteğe ihtiyaç duyulan geçici yük artışlarında devreye girerek yük paylaşımına katılmaktadır. $P_{FC}(t)$ ise yakıt hücresi sisteminden elde edilen gücü temsil etmekte, ancak bu sistem genellikle devre dışı bırakılmaktadır. Yakıt hücresiyle dizel jeneratörün eşzamanlı çalışması yalnızca batarya sisteminin şarj/deşarj geçişlerinde sistemin kararsız hale gelmesi gibi özel senaryolarda değerlendirilmektedir. Bu nedenle hibrit mod, doğrudan yakıt hücresiyle sürekli paralel çalışmayı hedeflememektedir. $P_{PV}(t)$ ise PV sisteminin gündüz saatlerinde sağlayabileceği güç katkısını ifade etmektedir. PV yalnızca sistemde

mevcutsa aktif olmakta ve üretimi, diğer kaynakların yükünü hafifleterek yakıt tüketiminin optimize edilmesine katkı sunmaktadır.

Sistem genelinde üç adet dizel jeneratör bulunduğu varsayıldığında, bu mod en yüksek toplam güç üretiminin sağlanabileceği moddur. Ancak modun amacı maksimum güç üretmek değil, sıfır emisyonun sürdürülemediği durumlarda sistemin kararlı biçimde çalışmasını sağlamaktır. Bu yönüyle hibrit mod, liman çıkışı, seyir ve limana yaklaşma gibi hemen tüm operasyon türlerinde uygulanabilecek esnek bir yapı sunmaktadır. Batarya enerji kapasitesi, sistemin sıfır emisyon modunda ne kadar süreyle çalışabileceğini belirleyen bir parametredir. Kullanılabilir batarya kapasitesi denklem 5.7 ile tanımlanmaktadır:

$$E_{kullanilabilir} = E_{bat} \cdot (SOC_{maks.} - SOC_{min}) \quad (5.7)$$

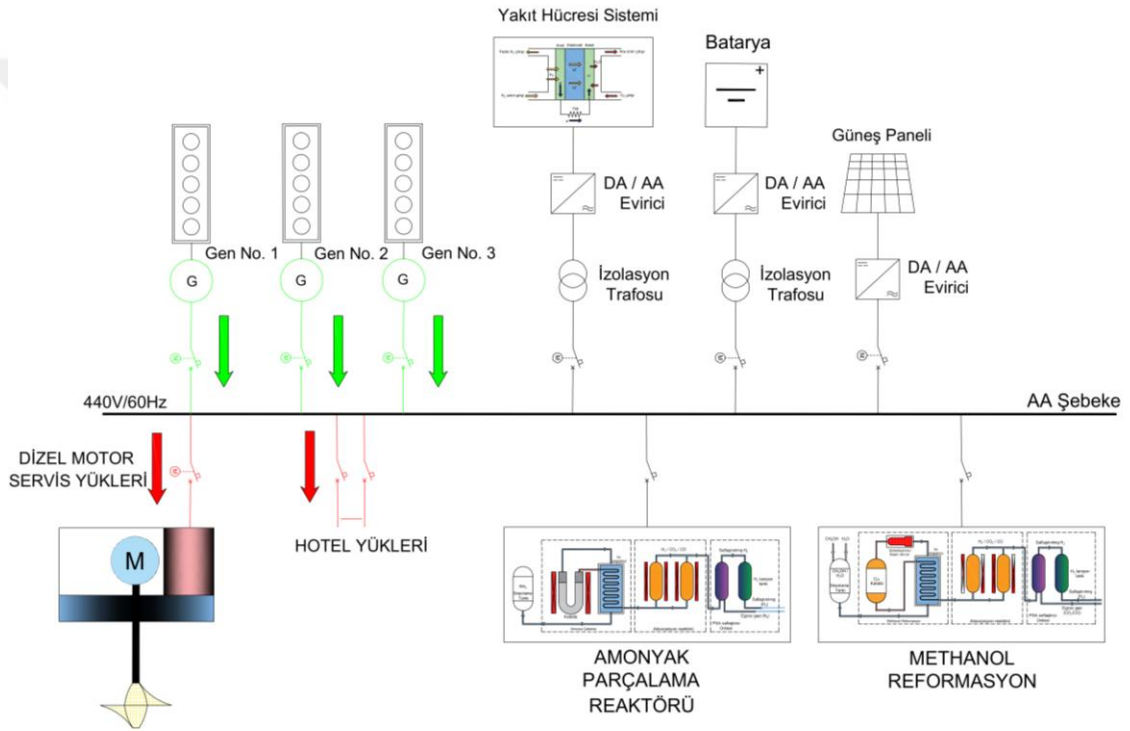
Batarya sisteminin maksimum güç çıkışı altında kaç saniye boyunca enerji sağlayabileceği denklem 5.8 ile ifade edilmektedir.

$$\Delta t = \frac{E_{kullanilabilir}}{P_{bat.maks.}} \quad (5.8)$$

EMS, bu kapasite sınırlarını dikkate alarak batarya yüklenme süresini kontrol etmektedir ve gerektiğinde sistem kaynaklarını (jeneratör veya yakıt hücresi) yeniden devreye almaktadır. Yakıt hücresi sistemi, bu modda yalnızca sistem stabilitesini sağlamak adına kısa süreli destek sağlayacak şekilde değerlendirilmektedir ve sürekli çalışma senaryosu için bu modda aktif olarak planlanmamaktadır. Sonuç olarak, hibrit mod sistemin güç sürekliliği ve stabilitesi açısından kritik bir işletim modudur. Dizel jeneratör temelli yapısı sayesinde şebeke kontrolü güvenli bir şekilde sürdürülmekte, batarya ve PV kaynaklarıyla yük paylaşımı etkin biçimde gerçekleştirilebilmekte ve yalnızca gerekli durumlarda yakıt hücresi kısa süreli destek sağlamaktadır [111,114]. Bu yapı, sıfır emisyon ile fosil yakıtlı tam yük arasında dengeli bir işletim sağlamak ve emisyon azaltımı hedeflerinin sistem güvenliğinden ödün verilmeden gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır.

5.3.3. Dizel jeneratör modu (DGM)

Dizel jeneratör modu (DGM), geminin tüm elektriksel yükünün yalnızca dizel jeneratörler tarafından karşılandığı klasik işletim modudur. Bu modda batarya sistemi, PV panelleri ve yakıt hücresi devre dışı bırakılmış veya yedek konumda bekletilmektedir. Şekil 5.8’de gösterilen sistem konfigürasyonunda üç adet senkron dizel jeneratör paralel çalışmakta olup, tüm yük bu jeneratörler tarafından sağlanmaktadır. DGM, özellikle uzun menzilli seyirlerde ve sıfır emisyon kaynaklarının kapalı veya bakım durumunda olduğu koşullarda tercih edilmektedir.



Şekil 5.8: Dizel jeneratör modu.

Bu modda şebeke referansı, dizel jeneratörler tarafından belirlenmekte ve sistemin frekans-gerilim kararlılığı droop kontrol prensibine dayalı olarak sürdürülmektedir. Batarya inverteri GFM görevini bırakmış veya GFL modda pasif hâlde bekletilmektedir. Dolayısıyla sistemin ana kontrolü, jeneratörlerin frekans regülasyonu aracılığıyla sağlanmaktadır. Yük paylaşımı, jeneratörler arası doğal droop karakteristiği sayesinde otomatik olarak oluşmaktadır. Her bir jeneratörün hız regülatörleri %2 ila %5 arasında ayarlanmış droop eğrileriyle konfigüre edilmiştir. Bu durumda, eşdeğer jeneratörler için yük paylaşımı denklem 5.9 ile ifade edilmektedir.

$$P_{DG,1} \approx P_{DG,2} \approx P_{DG,3} \approx \frac{1}{3} P_{yük}(t) \quad (5.9)$$

Ancak bu doğal dengeleme sistemin verimli çalışması için yeterli değildir. Düşük yük oranlarında çalışan dizel jeneratörler yakıtın tam yanmaması, karbon birikimi ve silindirlerde termal dengesizlik problemleriyle karşılaşmaktadır.

Bu nedenle EMS her bir jeneratörün güvenli ve verimli çalışabileceği aralığı hedeflemektedir. Genellikle %40 ile %80 arasındaki yükleme aralığı tercih edilmektedir. Bu kontrol hedefi denklem 5.10 ile tanımlanmaktadır.

$$0.4 \cdot P_{DG}^{min} \leq P_{DG,i} \leq 0.8 \cdot P_{DG}^{maks} \quad (5.10)$$

Bu aralığın dışına çıkılması durumunda EMS, jeneratörlerin sayısını artırmak veya azaltmak üzere bir dizi kural tabanlı karar sürecini devreye almaktadır.

EMS, yük artışı senaryosunda ilk olarak jeneratör başlatma kuralını uygulamaktadır. Halihazırda çalışan N adet jeneratör varken, toplam yük talebi mevcut jeneratörlerin güvenli yük aralığını aşmak üzereyse, EMS kapalı durumdaki bir jeneratörü senkronize ederek devreye almaktadır ($N \rightarrow N+1$). Böylece yük yeni jeneratöre de paylaştırılmakta ve bireysel yük oranları düşürülmektedir. Tam tersi durumda, yani yük seviyesi düşüp çalışan jeneratör sayısı fazla kalmışsa, EMS jeneratör durdurma kuralını uygulamaktadır. Bu durumda yük, daha az sayıda jeneratöre aktarılarak kalan jeneratörlerin yük oranları artırılmaktadır ($N \rightarrow N-1$). Bu strateji, her bir jeneratörün önerilen yük aralığında çalışmasını hedeflemektedir.

Bu kararlar esnasında EMS, sistemin toplam ataleti, ani yük değişimleri ve kritik yüklerin gereksinimlerini göz önünde bulundurarak geçişleri kademeli şekilde yürütmektedir. Düşük yük durumunda üç adet jeneratör %15 yükte çalışıyorsa, bir jeneratör kapatılarak kalan iki jeneratör %22–23 seviyelerine getirilebilmektedir. Hâlâ verimsiz bir durum söz konusuysa, bir jeneratör daha kapatılarak tek jeneratör yaklaşık %45 seviyesinde çalıştırılabilmektedir.

DGM modunda, sistemin GFM kaynağı dizel jeneratörlerdir. Paralel bağlı senkron jeneratörler, sistem frekansını ve gerilimini ortak olarak oluşturmaktadır. Eğer sistem, daha önce hibrit ya da sıfır emisyon modunda çalışıyorsa, bu moda geçiş esnasında

batarya eviricisi yavaşça pasif hâle getirilerek GFM görevini dizel jeneratörlere bırakmaktadır. EMS bu geçişi kontrollü olarak gerçekleştirmektedir. Batarya çıkış gücü yavaşça sıfırlanmakta, evirici GFL moda geçirilmekte ve ardından jeneratörlerin droop kontrolüyle frekans üretimi devralınmaktadır. Böylece frekans geçişi kesintisiz gerçekleşmektedir [107-112].

Bu modda batarya sistemi devre dışı olsa da EMS tarafından acil destek amacıyla bekleme konumunda tutulmaktadır. Sadece dizel kaynaklar çalışırken büyük bir ani yük devreye girerse, jeneratörlerin hızında geçici bir düşüş ve frekans sapması gözlemlenebilmektedir. Bu durumda EMS, bataryayı geçici olarak evirici moduna getirerek birkaç saniyelik güç enjeksiyonu gerçekleştirmektedir. Bu sayede jeneratörlerin tepki süresi köprülenmektedir. Bu durum, DGM ana yapısı içinde değerlendirilmemekle birlikte, sistem güvenliğini artıran ileri düzey bir kontrol özelliğidir. Sonuç olarak, dizel mod, geliştirilen hibrit enerji yönetim stratejisi içerisinde, konvansiyonel denizcilik güç mimarisinin doğrudan karşılığıdır. Hibrit ve sıfır emisyon modları bu yapıya eklenerek sistemin çevresel sürdürülebilirliği desteklenmektedir; ancak dizel mod hâlâ maksimum güç erişimi ve sistem güvenliği açısından vazgeçilmez bir işletim seçeneği olarak önemini korumaktadır. EMS'nin bu modda uyguladığı kural tabanlı kontrol stratejisi sayesinde jeneratörler verimli, dengeli ve güvenli biçimde çalıştırılmakta ve sistemin yük profiline göre dinamik olarak kaynak sayısı ayarlanmaktadır.

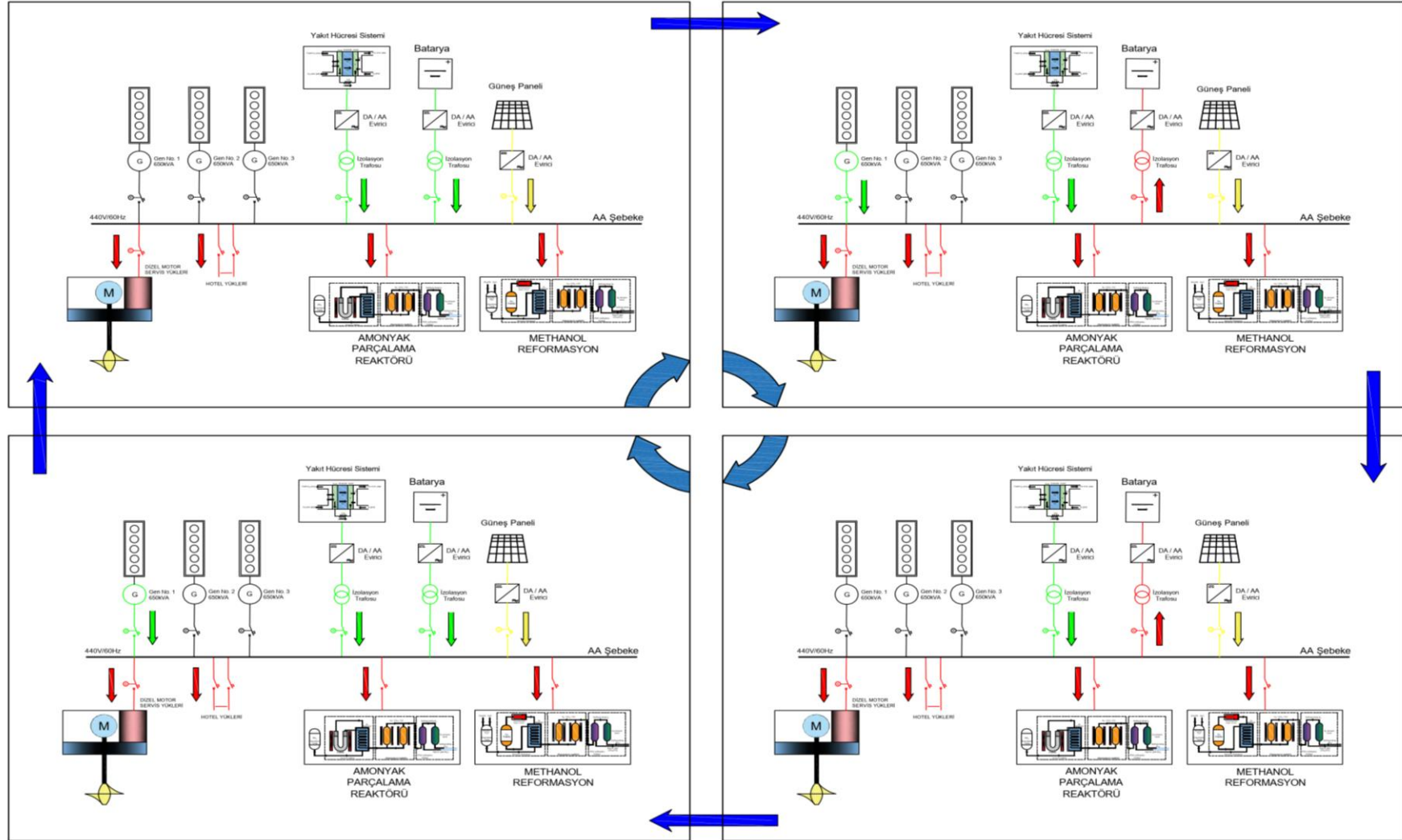
5.3.4. Mod geçişleri, operasyon senaryoları ve EMS/PMS koordinasyonu

Bir hibrit enerji yönetim sisteminde, hangi enerji kaynağının ne zaman devreye alınacağı sistemin çalışma senaryosuna ve mevcut koşullara göre operatör kontrolünde veya EMS'in otomatik optimizasyon kuralları çerçevesinde belirlenmektedir. Operatör hem manuel hem de otomatik modda sistemin ihtiyaç duyduğu güç, batarya SoC, mevcut yük ve kaynakların teknik limitleri gibi parametrelere göre hangi operasyon modunda hangi sistemlerin aktif olacağına karar verebilmektedir. Ancak en kritik unsur EMS'in tanımlı sistem limitleri ve önceliklendirme stratejilerine uygun olarak devreye girme, devreden çıkma veya güç paylaşım oranlarını optimize etmektedir. Özellikle sıfır emisyon modunda bataryanın şarj ve deşarj durumlarına bağlı olarak kaynak geçişlerinin otomatik ve kesintisiz şekilde yönetilmesi sistemin istikrarlı ve güvenli çalışması açısından önem arz etmektedir.

Şekil 5.4'te gösterilen operasyon modu akış diyagramı, değişim kararlarının temel mantığını özetlenmektedir. EMS batarya SoC yüksek ve yük talebi düşük ise sıfır emisyon modunu sürdürebilmektedir. SoC alt sınıra yaklaşırsa veya yük ani artarsa hibrit moda geçişi tetikleyebilmektedir. Benzer şekilde, yakıt hücresi ve PV üretiminin yeterli olmadığı veya sistemde dengesizlik olduğu durumlarda dizel jeneratör devreye alınmakta ve şebekenin kararlılığı sağlanmaktadır. Operasyonel olarak her bir mod değişiminde sistemdeki tüm enerji kaynakları senkronize bir şekilde devreye girip çıkabilmektedir. Güç akışı ve yük paylaşımı, EMS/PMS koordinasyonu ile gerçek zamanlı olarak optimize edilmektedir.

Sistemin pratikte karşılaştığı en kritik durumlar arasında, bataryanın GFM modda deşarjdan şarja geçmesi, yakıt hücresinin GFL modda olması ve sistemde başka bir şebeke referans kaynağı bulunmaması sayılmaktadır. Böyle bir durumda, batarya şarj pozisyonuna geçtiğinde şebeke stabilitesi bozulabilmektedir ve kararma (Generation Deficit) riski oluşabilmektedir. Benzer şekilde, yakıt hücresi GFM modundayken ve batarya şarjda iken ani yük artışlarında şebekede dengesizlik oluşabilmektedir. Bu tip geçişlerde dizel jeneratörlerin kontrollü olarak devreye alınması sistem stabilitesi ve sürekliliği açısından anahtar rol oynamaktadır. Şekil 5.9'da, operasyonel mod geçişlerinde özellikle batarya şarj/deşarj sırasında dizel jeneratörün devreye alınarak köprü görevi üstlendiği bir yapı gösterilmektedir. Bu yaklaşım, güç akışındaki sürekliliği sağlarken olası kararsızlıkların önüne geçmektedir.

EMS ve PMS, bu süreçte birbiriyle tam entegre çalışarak, güç kaynaklarının aktif/passif olma durumlarını, çıkış güçlerini ve geçiş sürelerini yönetmektedir. Yük artışı veya PV üretiminin azalması gibi durumlarda EMS ilave kaynakları devreye almakta, yük azaldığında veya fazla üretim olduğunda bataryaya şarj komutu vererek şebekede frekans ve gerilim stabilitesini korumaktadır. Yük paylaşımı, senkronizasyon ve geçişler her zaman sistem limitleri ve güvenlik kriterlerine uygun şekilde gerçekleşmektedir.



Şekil 5.9: Sıfır emisyon mod geçişleri, operasyon senaryosu.

Sonuç olarak, EMS'in kurallara bağı otomatik mod geçiş stratejileri sayesinde operatör müdahalesi gerekmeden sistemin stabilitesi ve güvenliği garanti altına alınmaktadır. Ancak tüm bu otomasyonun merkezinde doğru sistem limitlerinin tanımlanması, mod geçişlerinde kaynakların senkronize edilmesi ve geçişlerin kontrollü şekilde yapılması kritik önem taşımaktadır. Bu yapı sayesinde hibrit güç sistemleri hem yüksek performans hem de operasyonel güvenlik sağlayacak şekilde yönetilmektedir [104-114].



BÖLÜM 6. YENİ OPERASYON PROFİLİ VE ÇALIŞMA MODLARI

6.1. Giriş

Bu bölümde, üzerinde çalışılan yük gemisinin mevcut yük profili ile operasyonel seyir senaryoları ele alınmıştır. Mevcut çalışma profiline ek olarak, yeni yakıt sisteminin entegrasyonu ile ortaya çıkan yük analizleri değerlendirilmiş ve buna bağlı olarak belirlenen çalışma modları açıklanmıştır. Gemi üzerindeki mevcut sistemlerin kapasite ve teknik özellikleri göz önünde bulundurularak, önceki bölümlerde tanımlanan enerji yönetim stratejileriyle uyumlu olacak şekilde operasyon planları sunulmuştur. Farklı seyir senaryoları için detaylı yük analizleri bu kapsamda gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler, ilerleyen bölümlerde yürütülen simülasyon çalışmalarına referans olarak kullanılmıştır.

6.2. Kuru Yük Gemisine Ait Genel Bilgilendirme ve Sistem Tanımı

GAMMA projesi kapsamında incelenen ve tez çalışmasına konu olan gemi, konvansiyonel bir kuru yük gemisi olup, ticari deniz taşımacılığı sektöründe yaygın olarak dökme veya paketlenmiş yüklerin limandan limana taşınması amacıyla kullanılmaktadır. Bu gemi tipi, yapısal olarak geniş ambar hacmine, dayanıklı güverte sistemine ve yükleme/boşaltma operasyonlarını destekleyen entegre sabit güverte vinçlerine sahiptir. Mevcut gemide de bu yapı korunmakta olup, güverte vinçleri yük operasyonlarında önemli miktarda elektrik tüketmekte ve toplam yük profiline belirleyici katkıda bulunmaktadır. Ana tahrik sistemi, klasik denizcilik uygulamalarında olduğu gibi düşük veya orta devirli dizel motorlardan oluşmakta ve bu motorlar doğrudan ya da redüksiyon dişlisi aracılığıyla pervaneye mekanik güç aktarımı sağlamaktadır. Bu konvansiyonel yapı, yüksek güvenilirliği, bakım kolaylığı ve dizel yakıtı olan geniş uyumluluğu nedeniyle hâlen dünya genelinde tercih edilmektedir.

Ancak günümüzde bu tür gemiler, artan çevresel kaygılar ve enerji dönüşüm hedefleri doğrultusunda Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) ve Avrupa Komisyonu'nun direktifleri kapsamında emisyon odaklı yeni regülasyonlara tabi tutulmaktadır. Özellikle IMO 2020 ve Avrupa Yeşil Mutabakatı (European Green Deal) gibi girişimler, konvansiyonel yakıt kullanan deniz araçları için CO_x, NO_x ve SO_x emisyonlarını sınırlandırmakta ve alternatif yakıt sistemlerinin kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Mevcut durumda geminin elektrik enerjisi ihtiyacı, her biri 800 kVA güç kapasitesine sahip üç adet dizel jeneratör ile karşılanmaktadır. Bu jeneratörler 440 V, 60 Hz çıkışa sahip olup, AA temelli ana dağıtım sistemi aracılığıyla gemideki tüm yük merkezlerine enerji sağlamaktadır. Jeneratörler paralel ya da tekil şekilde devreye alınabilmekte, bu da operasyonel esneklik sağlamaktadır. Jeneratörlerin güç değerlendirmesi, endüstride yaygın olarak kabul gören 0.8 güç faktörü esas alınarak yapılmış olup, her bir jeneratör bu koşullarda yaklaşık 650 kW aktif güç üretme kapasitesine sahiptir.

Günümüzde yük gemilerinde, özellikle normal seyir operasyonlarında şaft jeneratörleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Şaft jeneratörleri, ana tahrik sistemine bağlı pervane şaftının dönmesiyle senkron bir alternatör vasıtasıyla elektrik üreterek, geminin elektriksel yüklerini karşılamaktadır. Bu sistem, dar kanal geçişleri, manevralar veya kısıtlı sularda yapılan operasyonlar hariç olmak üzere, açık deniz ve uzun seferlerde dizel jeneratörlerin devreye alınmasına gerek kalmadan elektrik üretimini mümkün kılar. Şaft jeneratörlerinin kullanımı, dizel motorun belirli oranda daha yüksek yükte çalışmasını sağlayarak termal verimliliği artırmakta ve ayrı bir dizel jeneratör çalıştırmaktan daha ekonomik ve çevreci bir çözüm sunmaktadır.

Ancak bu çalışma kapsamında analiz edilen gemide şaft jeneratörü bulunmamaktadır. Bu nedenle, yapılan analizlerde dizel jeneratörler esas alınmış ve güç dengesi ile yük profilleri bu sistem temel alınarak değerlendirilmiştir. Tablo 6.1, gemideki başlıca yüklerin enerji tüketimi dağılımını göstermekte ve sistem mühendisliği açısından referans niteliği taşımaktadır. Bu tablo oluşturulurken, BWTS (Ballast Water Treatment System) kullanımına göre farklı operasyonel senaryolar dikkate alınmıştır.

BWTS, gemilerin denge suyu (ballast) sistemine entegre edilen ve bu suyun içerisindeki biyolojik organizmaları IMO regülasyonları kapsamında zararsız hâle getirmek amacıyla kullanılan bir arıtma sistemidir. Tipik olarak, filtrasyon ve UV veya kimyasal

dezenfeksiyon gibi yöntemlerle çalışır. BWTS'nin aktif olduğu bir operasyon sırasında, ballast pompalarının yanında sistemin arıtma modülleri de devrede olduğu için toplam yük talebi artmaktadır.

Öte yandan, BWTS kullanılmadan gerçekleştirilen kargo operasyonları sırasında da ballast pompaları aktif şekilde çalıştırılmaktadır. Bunun temel nedeni, yükleme ve tahliye sırasında gemide oluşan ağırlık değişimlerini deng elemek ve geminin stabilite ile trim değerlerini operasyon boyunca güvenli sınırlar içinde tutmaktır. Özellikle uzun süreli yükleme veya boşaltma işlemlerinde, gemi ağırlık merkezinin uygun biçimde kontrol edilmesi için sürekli ballast suyu transferi gerekmektedir.

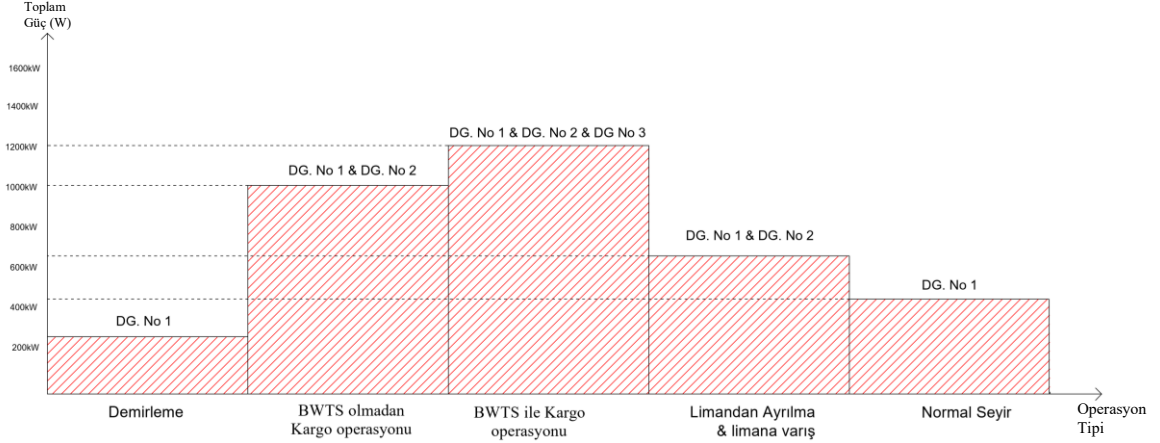
BWTS bulunan gemilerde ise bu dengeleme işlemleri sırasında ballast pompaları ile birlikte BWTS üniteleri de çalışmakta, böylece su alımı veya boşaltımı sırasında IMO standartlarına uygun biyolojik arıtma sağlanmaktadır. Bu nedenle, sistem performans analizleri yapılırken BWTS'nin aktif veya pasif durumda olduğu farklı senaryolar, yük profili üzerindeki etkileriyle birlikte değerlendirilmelidir.

Tablo 6.1: Geminin mevcut yük analizi.

	Normal seyir	Limandan ayrılma ve limana varış	BWTS olmadan Kargo operasyonu	BWTS ile Kargo operasyonu	Demirleme
Sürekli Yük (kW)	400	600	1000	1200	200
Toplam Güç(kW)	450	650	1050	1250	250
Kullanılan jeneratör sayısı	1	2	2	3	1
Yük faktörü (%)	69	50	80	64	38

Geminin farklı operasyon modlarında enerji tüketim dağılımı ise Şekil 6.1'de grafiksel olarak gösterilmektedir. Bu analiz, ilerleyen bölümlerde yakıt hücreleri, batarya sistemleri ve güneş panelleri gibi yeni nesil enerji teknolojilerinin yük profiline etkisini değerlendirmek amacıyla referans alınmaktadır. Ayrıca bu yük analiz altyapısı

doğrultusunda gerçekleştirilecek olan sistem entegrasyonu ve simülasyon çalışmaları, modern enerji yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.



Şekil 6.1: Gemi operasyonları yük analizi.

6.3. Yeni Operasyon Profili

Yeni operasyonel profilin temel amacı, yakıt hücrelerinin iş yüküne bağlı olarak hidrojen tüketimini esas alarak yeni yakıt alt sistemlerinin (amonyak ve metanol) sağladığı özerkliği belirlemektir. Bu değerlendirme, geminin enerji talebini belirli bir saatlik zaman dilimi boyunca karşılamak üzere planlanan yerinde gösterim süresi için yapılacaktır.

Yeni teknolojilerin sağlayabileceği güç, ileri testler ve/veya hesaplamalara tabidir. Bu değerlerdeki olası değişiklikler operasyonel profil analizini etkileyebilir. İlerleyen sürümlerde güncellenmiş güç talepleri dikkate alınarak analiz tekrar yapılacaktır.

Yeni teknolojilere ilişkin operasyonel profilin geliştirilmesinde dikkate alınan ön değerlendirme kriterleri aşağıda verilmiştir:

- 1 MW yük kapasitesine sahip yakıt hücresi modülü bulunmaktadır.
- 400 kWe'ye eşdeğer güce sahip amonyak parçalama üniteleri bulunmaktadır.
- 600 kWe'ye eşdeğer güce sahip metanol reformer üniteleri bulunmaktadır.
- 500 kWh kapasiteli bir enerji depolama sistemi bulunmaktadır.
- Gemide kurulu toplam 200 kWp güneş paneli gücüne sahip PV sistemi bulunmaktadır.

Donanımların ilk çalıştırma ve durdurma sıralamasına ilişkin ön değerlendirme aşağıda sunulmuştur:

- Yakıt hücreleri ve ilgili yardımcı ekipmanlar, başlangıçta jeneratörler tarafından beslenerek çalıştırılır ve gemi AA şebekesinden ayrılmış şekilde devreye alınır.
- Yakıt hücreleri nominal çalışma rejimine ulaştığında gemi AA şebekesiyle senkronize edilir ve ardından jeneratörler devre dışı bırakılır.
- Amonyak ve metanol tanklarının %15 düşük seviye alarmı aktive olduğunda, yakıt hücreleri AA şebekesinden ayrılır ve jeneratörler yeniden devreye alınır.
- Tank seviyeleri %10 kritik alt seviyeye ulaştığında, yakıt hücreleri tamamen kapatılır.

Yüksek lisans kapsamında hazırlanan bu tez çalışmasında, 2024 yılında başlatılan ve 5 yıl sürecek olan Avrupa Birliği destekli GAMMA Projesi'ne konu olan teknolojilere ilişkin ön hazırlık süreci ele alınmış; aşağıda sunulan senaryo, ileride gerçekleştirilecek saha gösterimlerine yönelik öneri niteliğinde oluşturulmuştur.

- Her bir sefer bazında gösterim süresi, 240 saat kesintisiz çalışmayı kapsayacak şekilde planlanmıştır. Bu süre zarfında, alt sistemlerden yalnız birinin çalıştırılması da mümkündür; ancak bu durumda sistem özerkliği ve toplam güç üretimi azalacaktır.
- Gösterim sürecinin, geminin normal operasyonu veya seyrü seferi sırasında başlatılması öngörülmektedir.
- Yeni teknolojilerle (yakıt hücreleri ve yardımcı yakıt sistemleri) yük profilinde önemli bir değişim olmadan kesintisiz güç üretimi sağlanana kadar, her iki alt sistem de tam yükte çalıştırılacaktır. Bu süreçte sistemler gemi AA şebekesine bağlı veya bağımsız olarak çalışabilir.
- Yakıt hücreleri gemi AA barasına bağlıyken, gemi operasyonu veya seyrine devam edecek ve toplamda 240 saat boyunca yalnızca yeşil enerji kaynakları (yakıt hücresi + batarya + güneş panelleri) ile çalışmış olacaktır.
- Yerinde gösterim süreci, yakıt hücreleri ve her iki yakıt sisteminin kapatılmasıyla birlikte sona erecektir.

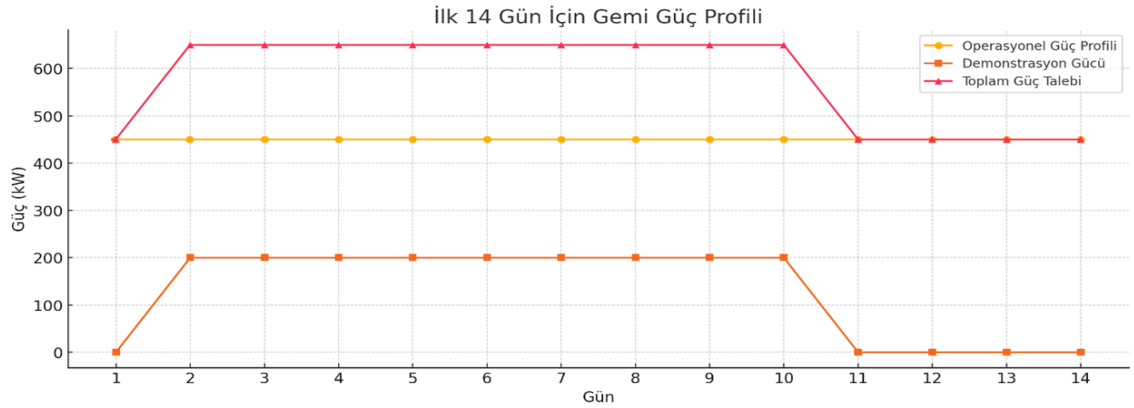
6.3.1. Enerji tüketimi

Tablo 6.1’de geminin mevcut operasyonlarına karşılık gelen gerçek enerji tüketimleri belirtilmiştir. Bu değerlere ek olarak her yeni teknoloji ve bu teknolojilerin çalışması için gerekli yardımcı ekipmanların enerji tüketimleri (kW) de hesaba katılmalıdır. Yeni teknolojiler geliştirilme aşamasında olduğundan kullanılan enerji tüketim değerleri Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2: Yeni sistem yük analizi.

Sistem	Eşik Güç (kW)	Sürekli Güç (kW)
Amonyak parçalama (başlangıç)	150	-
Metanol reformasyon (başlangıç)	150	-
Amonyak parçalama	-	65
Metanol reformasyon	-	65
PSA saflaştırma	-	50
Yakıt hücresi	-	20
Toplam elektrik yükü	300	200

Şekil 6.2, kalkış ve varış limanları arasında gerçekleştirilen örnek bir 14 günlük seferi göstermektedir. Bu bağlamda, sistem gösterimi, projenin belirlenen kilometre taşlarına uygun şekilde 10 günlük bir sürede gerçekleştirilecektir.



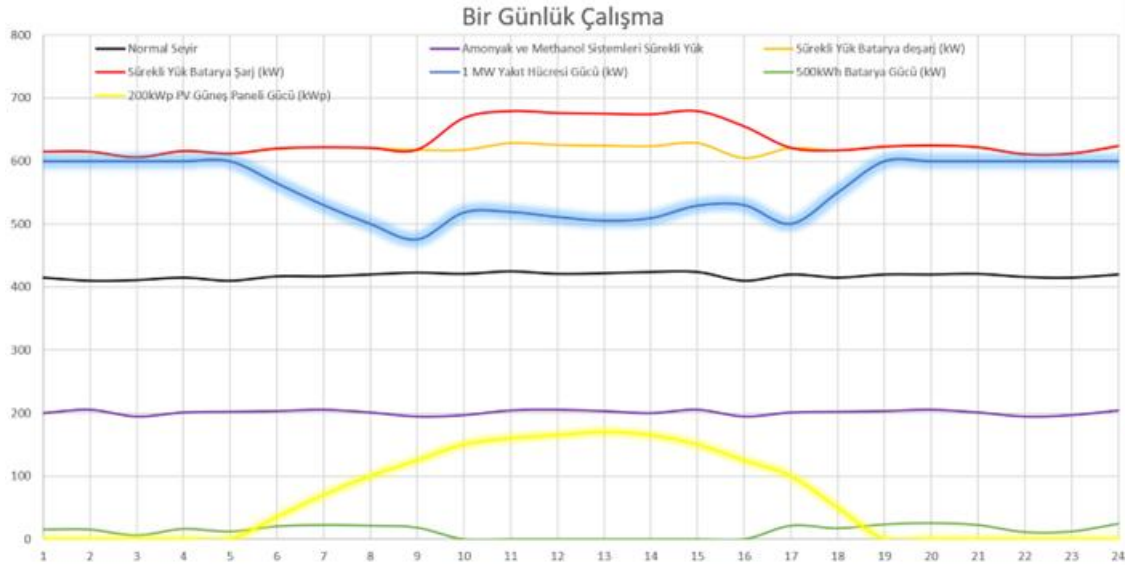
Şekil 6.2: Normal seyir gemi güç profili.

6.3.2. Operasyon alt sistem kriterleri

Yakıt tüketimi hesaplamaları için, ekipmanların devreye alma sürecini ve bu sürece bağlı olarak oluşan geçici yüksek güç talebini içeren 24 saatlik bir senaryo geliştirilmiştir. Bu senaryo aynı zamanda sistemin başlangıç test sürecini için gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.3’de, enerji talebi ile güç üretimi arasındaki karşılaştırmalı grafik sunulmaktadır.

Şekil 6.3’e göre, yakıt hücreleri aracılığıyla sağlanan elektrik üretimi, doğrudan amonyak ve metanol tüketimiyle ilişkilidir. Gösterim süresi boyunca gerçekleşmesi beklenen yakıt tüketim miktarları ve sistem bileşenlerinin teknik parametreleri aşağıda sıralanan tablolarda sunulmaktadır. Sırasıyla; Tablo 6.3’te amonyak parçalama ve metanol reformasyon sistemlerinin teknik özellikleri, Tablo 6.4’te PSA saflaştırma ünitesinin teknik özellikleri, Tablo 6.5’te yakıt hücresi sisteminin teknik özellikleri, Tablo 6.6’da güneş paneli sisteminin teknik özellikleri ve Tablo 6.7’de batarya sisteminin teknik özellikleri detaylı olarak verilmiştir.

Bu tablolarda belirtilen değerler, bu tez çalışmasında yürütülen analiz ve benzetimlerin temelini oluşturmakta olup, ilgili sistem bileşenlerinin performans ve kapasite sınırları göz önünde bulundurularak referans alınmıştır.



Şekil 6.3: Bir günlük planlanan operasyon senaryosu.

Tablo 6.3 Amonyak parçalama ve metanol reformasyon sistemlerinin teknik özellikleri.

Özellik	Metanol Reformer Sistemi	Amonyak Parçalama Sistemi	Açıklama
Yakıt Türü	Metanol (MeOH)	Amonyak (NH ₃)	Sıvı yakıtlar üzerinden hidrojen üretimi
Toplam Yakıt Tüketimi	71,360 kg 91.14 m ³	41,962.5 kg 67.03 m ³	Tank doluluklarıyla uyumlu sistem kapasitesi
Sürekli Tüketim (kg/h)	285.44 kg/h	167.85 kg/h	Sürekli çalışmada saatteki ortalama tüketim
Sistem Özerkliği	281 saat	286 saat	Yakıt kapasitesine göre sürekli çalışma süresi
Maks. Elektriksel Güç (Net)	600 kWe	400 kWe	Düşük sıcaklıklı PEM yakıt hücresi sistemine DA çıkış sağlar
Giriş Yakıt Saflığı	Ticari MeOH (%99.85)	Ticari NH ₃ (%99.5)	Yakıt kalitesi ve safsızlık toleransı
Üretilen H ₂ Akışı (tahmini)	~75 Nm ³ /h/kW	~70 Nm ³ /h/kW	PEM FC tarafından kullanılmak üzere
Gereken Temizlik Ünitesi	PSA (Basınç Salımlı Adsorpsiyon)	PSA	Çıktıdaki hidrojenin saflığını artırmak için
Başlatma Süresi	150 -180 dakika	120 - 180 dakika	Sistem kararlılığı sağlanmadan önceki ısınma süresi
Çalışma Sıcaklığı	250 – 300 °C	500 – 600 °C	Reaktör iç sıcaklıkları

Tablo 6.4 PSA saflaştırma ünitesinin teknik özellikleri.

Özellik	Değer / Aralık	Açıklama
Teknoloji	PSA	Basınç salımlı adsorpsiyon yöntemiyle hidrojen saflaştırma
Giriş Gaz Karışımı	H ₂ + CO ₂ , CO, CH ₄ , H ₂ O, N ₂	Reformasyon veya parçalama sonrası gaz karışımı
Çıkış Hidrojen Saflığı	%99.999 (5N)	PEM yakıt hücresi için uygun yüksek saflıkta hidrojen
Nominal Kapasite	50 – 1.000 Nm ³ /h	Modüler yapı sayesinde farklı kapasite seçenekleri
Tipik Çıkış Basıncı	5 – 10 bar	Sistem gereksinimlerine göre ayarlanabilir
Çalışma Sıcaklığı	Ortam sıcaklığı	Ek ısıtma veya soğutma gerektirmez
Enerji Tüketimi	~0.1 – 0.3 kWh/Nm ³ H ₂	Kompresör ve valf kontrol sistemleri için
Rejenerasyon Süresi	30 – 60 saniye	Adsorbanın yenilenme süresi
Adsorban Malzemesi	Zeolit, Aktif Karbon	Kirleticilere karşı yüksek seçicilik
Güvenlik Özellikleri	Basınç emniyet valfleri, gaz dedektörleri	Emniyetli çalışma için gerekli önlemler

Tablo 6.5 Yakıt hücresi sisteminin teknik özellikleri.

Özellik	Değer / Aralık	Açıklama
Nominal Güç	1.000 kW	Sabit yükte DC çıkış gücü
Hücre Teknolojisi	PEM	Düşük sıcaklıklı PEM teknolojisi
Çıkış Gerilimi Aralığı	650–850 VDA	Yük koşullarına bağlı olarak değişir
Nominal Çıkış Gerilimi	~750 VDA	Tipik çalışma noktası
Nominal Akım	~1300 A	1.000kW / 750 V $\approx$ 1333 A
Soğutma Sistemi	Su bazlı sıvı soğutma	Yüksek verimli termal yönetim gerektirir
Verim (LHV bazlı)	%47 – %55	Hidrojenin alt ısı değeri (LHV) baz alınmıştır
Hidrojen Tüketimi	~8.9 Nm ³ /h/kW	1 MW yükte ~8900 Nm ³ /h (standart koşullarda)
Giriş Gaz Saflığı	> %99.97 H ₂	PSA, reformer veya elektrolizör sonrası kullanılabilir
Çalışma Sıcaklığı	60 – 70 °C	PEM için düşük sıcaklıklı çalışma aralığı
Başlatma Süresi	3 – 10 dakika	Sıcak durumdan başlatma
Kontrol Yapısı	GFL/GFM	Evirici ile AA bara senkronizasyonu gerektirir
Entegre Güvenlik Sistemleri	H ₂ sızıntı, sıcaklık, basınç	Acil durdurma (ESD) mekanizmaları ve sensör entegrasyonu

Tablo 6.6: Güneş paneli teknik özellikleri.

Özellik	Değer / Aralık	Açıklama
Toplam Kurulu Güç	200 kWp	Sistemdeki toplam panel gücü
Panel Tipi	Monokristal / Esnek PV Modül	SR, SP veya SX serisi esnek paneller
Panel Verimliliği	%18 – %23	Hücre verimliliği, model serisine göre değişir
Panel Başına Güç	100 – 150 Wp	Panel modeline bağlı olarak değişir
Nominal Gerilim (Vmp)	18 – 24 VDC	Panelin maksimum güç noktası gerilimi
Nominal Akım (Imp)	5 – 8 A	Panelin maksimum güç noktası akımı
Gerilim Aralığı (Sistem)	600 – 1.000 VDA	Dizi konfigürasyonuna bağlı sistem gerilimi
Evirici Tipi	Şebeke bağlantılı / MPPT’li	Şebekeye bağlı inverterler, MPPT özelliği ile donatılmış
Yıllık Enerji Üretimi	~260.000 – 300.000 kWh	İstanbul iklim koşullarında yıllık üretim tahmini
Günlük Ortalama Üretim	~700 – 820 kWh	Ortalama günlük enerji üretimi
Montaj Yüzeyi	Metal, kompozit, cam elyaf	Yat, tekne, karavan, çatı gibi yüzeylere uygun
Koruma Sınıfı	IP67	Suya ve toza karşı dayanıklı

Tablo 6.7 Batarya sisteminin teknik özellikleri.

Özellik	Değer / Aralık	Açıklama
Batarya Kapasitesi	500 kWh	Brüt enerji kapasitesi (nominal)
Maksimum Güç	500 kW	Evirici ile sınırlandırılmıştır
Hücre Kimyası	LFP (LiFePO ₄)	Corvus Orca Energy batarya hücre teknolojisi
Nominal Gerilim	946 VDA	Tipik sistem nominal gerilimi (yaklaşık değer)
Gerilim Aralığı	800–1000 VDA	EMS-PMS kontrol stratejisine bağlıdır
Nominal Kapasite (Ah)	528 Ah	Yaklaşık değer: 500.000 Wh / 946 V $\approx$ 528 Ah
Maksimum Şarj Akımı	400 A	Tipik sistem sınırlaması, eviriciyle sınırlıdır
Maksimum Deşarj Akımı	500 A	Anlık yüksek yük talepleri için (evirici toleransına bağlı)
SoC Çalışma Aralığı	%10 – %90	Sistem koruma amaçlı kullanılan efektif kullanım aralığı
SoC Kritik Eşik	%20	EMS kontrolünde yedek kapasite alarm eşiği
SoC Şarj Öncelik Başlangıcı	%60 altı	Şarj önceliği başlar (PV, yakıt hücresi dahil)
SoC Şarj Kısıtlama Eşiği	%90 üzeri	Aşırı şarjın önlenmesi
Nominal Çevrim Ömrü	>10 yıl veya 10.000 çevrim	Tipik denizcilik uygulaması profiline göre
Soğutma Sistemi	Sıvı Soğutmalı	Düşük sıcaklık dalgalanması için optimize

6.4. Yeni Operasyon Yük Dengesi

Tablo 6.8’de, yeni sistemlerin entegre edildiği durumda geminin yük analizi sunulmuştur. Bu tablo, yakıt hücresi sisteminin devreye alınabileceği operasyon modlarını ve yeni eklenen enerji sistemlerinin güç katkılarını, gemi operasyonlarıyla birlikte senaryo bazında göstermektedir. Tablo incelendiğinde, konvansiyonel dizel jeneratöre olan bağımlılığın önemli ölçüde azaldığı ve kullanılan jeneratör sayısında kayda değer bir azalma sağlandığı açıkça görülmektedir.

Tablo 6.8: Geminin yeni operasyon yük analizi.

	Normal Seyir	Limandan Ayrılma / Limana Varış	BWTS Olmadan Kargo Operasyonu	BWTS ile Kargo Operasyonu	Demirleme
Sürekli Yük (kW)	600	800	1200	1400	400
Toplam Güç (kW)	750	950	1350	1550	550
Kullanılan Kaynaklar	FC+PV+BAT	FC+PV+BAT	FC+PV+BAT+DG	FC+PV+BAT+DG	FC+PV+BAT
Kullanılan jeneratör sayısı	0	0	1	1	0
Jeneratör Yük Faktörü (%)	0	0	40 - 60	50 - 80	0

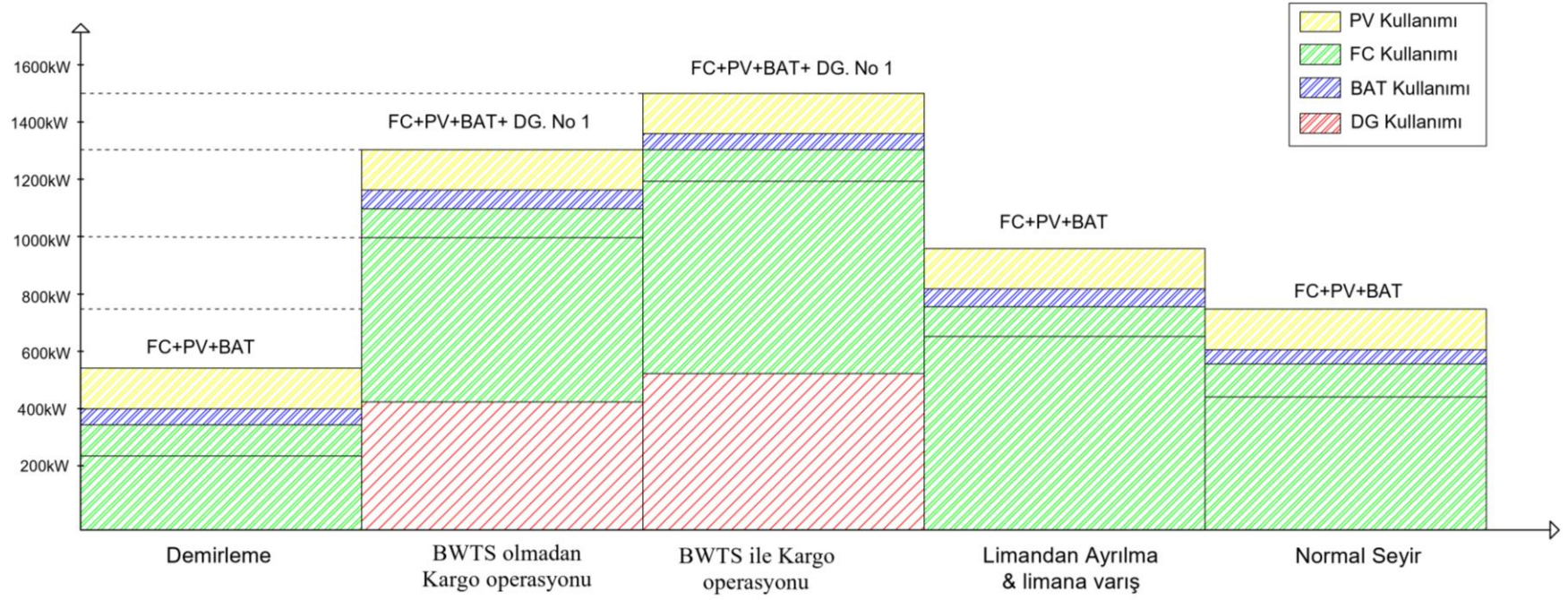
Bu analizlerde, operasyonlar için ideal koşullar varsayılmış ve sistem performansı buna göre değerlendirilmiştir. Özellikle yakıt hücresi sisteminin sürekli olarak %100 yükte çalıştırılması, uzun vadede hücre ömrünü olumsuz etkileyebileceğinden, operasyon profilleri hazırlanırken %80'in üzerinde yüklenme durumundan kaçınılmıştır. Ancak projenin temel hedeflerinden biri, 1 MW kapasiteli yakıt hücresinin tam güçte çalışmasını deneysel olarak göstermek olduğundan, kısa süreli gösterim ve demonstrasyon senaryolarında %100 yükleme yapılmasında herhangi bir sakınca bulunmamaktadır. Dizel jeneratörler için ise, benzer şekilde, ömür ve güvenilirlik açısından optimal aralık olarak %40 ila %80 yüklenme oranları esas alınmış ve analizlerde bu sınırlar dikkate alınmıştır. Bu kapsamda, hibrit enerji sisteminin işletilmesiyle birlikte dizel jeneratörlerin düşük yükte veya tamamen devre dışı bırakılabildiği, böylece yakıt tüketimi ve bakım gereksinimlerinin minimize edilebildiği ortaya konmuştur.

Yeni yük dengesi analizlerinde, gemi operasyonları boyunca kullanılan enerji kaynaklarının (fotovoltaik paneller [PV], batarya sistemleri, yakıt hücresi [FC] ve dizel jeneratörler [DG]) sistem yüküne katkıları modellenmiştir. Şekil 6.4'te sunulan bu analiz, hibrit enerji sisteminin çeşitli operasyon senaryolarındaki performansını görselleştirmek amacıyla hazırlanmıştır. Burada, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda dizel jeneratörlerin kullanımı mümkün olduğunca arka planda tutulmuş ve ağırlıklı olarak alternatif enerji kaynaklarının (FC, PV ve batarya) yükü karşılayacak şekilde optimize edildiği bir yapı öne çıkarılmıştır. Ancak bu stratejiye rağmen, operasyonların enerji

ihtiyacına bağılı olarak özellikle yüksek anlık yük durumlarında veya güç açığı oluştuğunda dizel jeneratörlerin devreye alınması gerekmektedir.

Bu bağlamda, daha önceki bölümlerde açıklanan geçiş modları ve şebeke stabilitesinin korunması gibi teknik gereksinimler doğrultusunda, dizel jeneratörlerin belirli durumlarda destekleyici güç kaynağı olarak çalıştırılması kritik öneme sahiptir. Şekil 6.4'te gösterilen demirleme, limandan ayrılma/limana varış ve normal seyir gibi operasyonel modlarda dizel jeneratörler bekleme modunda tutulmakta ve gerekli hâllerde devreye alınmaktadır. BWTS ile kargo operasyonlarında ve BWTS olmadan kargo operasyonlarında toplam güç yüksek olduğu için yakıt hücresi, batarya ve PV panellerin toplam gücü bu operasyonları karşılamakta yetersizdir. Bu yüzden dizel jeneratörlerin kullanılması gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen analiz, bir önceki “Şekil 6.1: Gemi Operasyonları Yük Analizi”ne kıyasla, hibrit sistem çalışması dizel jeneratörlere olan bağımlılığın azaltıldığını ve yük paylaşımının alternatif kaynaklara daha dengeli şekilde dağıtıldığını göstermektedir.



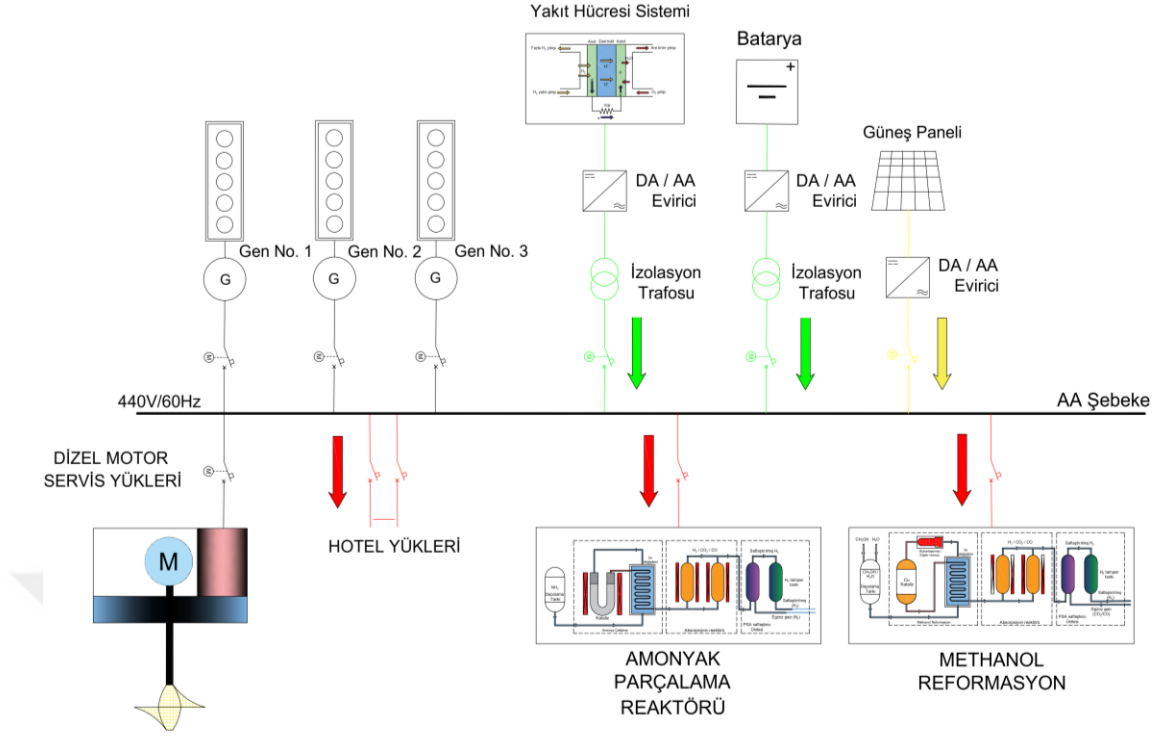
Şekil 6.4: Yeni operasyon yük dengesi.

6.4.1. Kuru yük gemisi operasyon senaryoları

Bu bölümde kuru yük gemisinin hibrit güç sisteminin davranışı dört temel operasyon senaryosu kapsamında ele alınmaktadır. Her senaryoda, batarya, yakıt hücresi, PV paneller ve dizel jeneratör gibi alt sistemlerin o operasyon sırasında aktif mi beklemede mi olduğunu gösteren güç akış şemaları sunulmaktadır.

6.4.1.1. Demirleme operasyonu

Demirleme operasyonunda gemi sabit konumda bulunmakta ve genellikle düşük seviyede, sabit elektrik ihtiyacı (hotel yükleri: aydınlatma, HVAC, seyir ekipmanları vb.) ile çalışmaktadır. Ancak demirleme ekipmanları devreye alındığında, kısa süreli yüksek güç talepleri ortaya çıkabilmektedir. Yakıt hücresi sisteminin bu operasyon sırasında sürekli devrede tutulması, enerji verimliliği açısından genellikle uygun değildir; çünkü yakıt hücresinin aktif olması, beraberinde yakıt hazırlama ve yardımcı güvenlik sistemlerinin de çalışmasını gerektirdiğinden toplam güç tüketimini artırmaktadır. Bununla birlikte, yeni entegre edilen yakıt hücresi sisteminin güvenli koşullar altında performansının doğrulanması için demirleme operasyonu uygun bir test ortamı sunmaktadır. Bu süreçte, gemi güvenli şekilde beklerken, yakıt hücresinin hotel yükünü taşıyabildiği ve batarya ile dizel yedekleme sistemiyle sorunsuz geçişler yapılabildiği doğrulanacaktır. Böylece yakıt hücresi, daha kritik sefer bölümlerinde güvenle devreye alınabilecektir. Şekil 6.5'te bu operasyonda devrede olan sistemler gösterilmiştir.



Şekil 6.5 Demirleme operasyonu tek hat gösterimi.

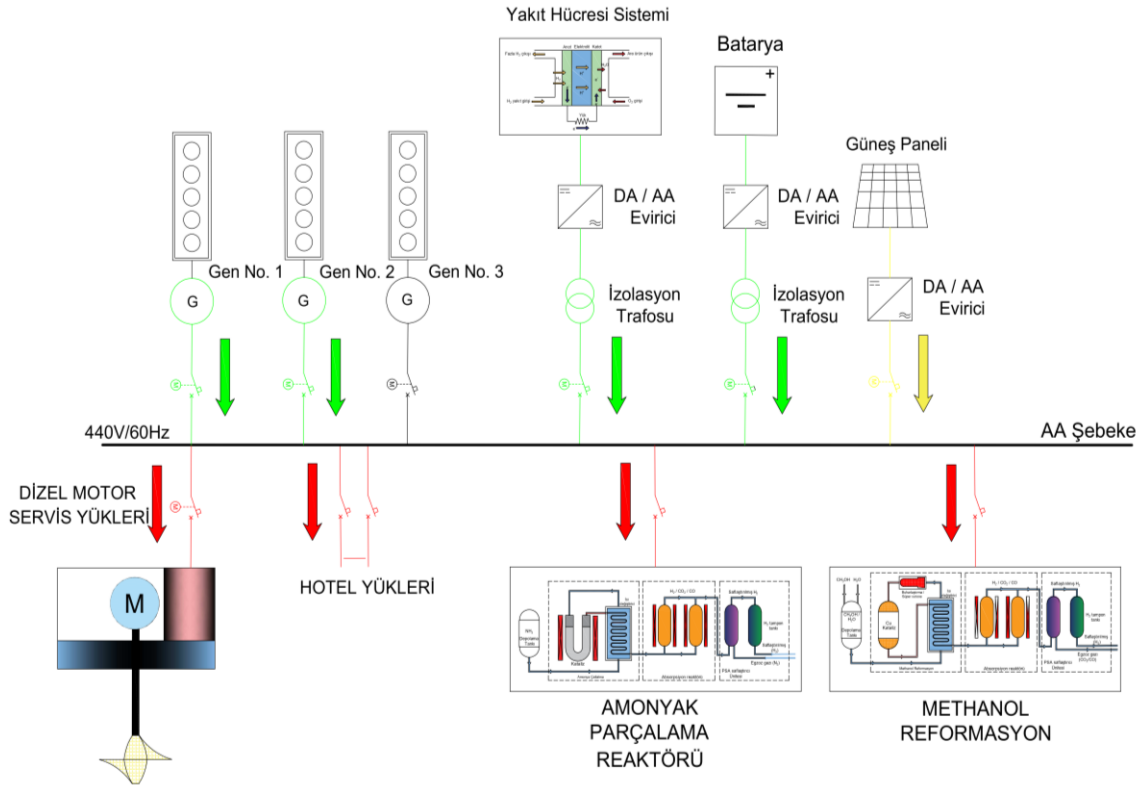
6.4.1.2. BWTS ve kargo operasyonları

Kargo işlemleri ve BWTS devredeyken geminin elektriksel yükü en üst düzeydedir. Şekil 6.4'te bu operasyonlara ait yük profili yer almaktadır. Bu durumda uzun süreli yüksek güç tüketimi ortaya çıkmakta, ağır makinelerin devreye alınması veya devreden çıkmasıyla anlık güç dalgalanmaları gözlemlenmektedir. Operasyon sırasında kargo vinçleri, kargo kapakları ve BWTS sistemi gibi ekipmanlar eş zamanlı çalışarak toplam güç ihtiyacını normal seyir yükünün çok üzerine çıkarmaktadır.

Bu koşullarda enerji yönetim sistemi hibrit modu zorunlu olarak devreye almaktadır. Yük talebi, sıfır emisyon kaynaklarının tek başına karşılayamayacağı kadar yüksek olduğu için EMS, operasyon başlamadan önce dizel jeneratörü devreye alarak hibrit modda çalışmayı başlatmaktadır. Kargo ve balast işlemleri sona erdiğinde, toplam yük yalnızca yakıt hücresinin karşılayabileceği bir seviyeye indiğinde tekrar sıfır emisyon moduna geçiş yapılmaktadır. Güç talebinde beklenmeyen artışlar gerçekleştiğinde EMS, mevcut dizel jeneratörü veya yakıt hücresini aşırı yüklememek adına ilave bir dizel jeneratörü devreye almaktadır. Buna karşılık, sistem yükü azaldığında veya bazı elektrikli ekipmanlar devreden çıkarıldığında, EMS dizel jeneratörün çıkışını kademeli olarak azaltmakta ya da

yakıt hücresinin yükünü artırmaktadır. Yük paylaşımı kademeli ve kontrollü şekilde ayarlanmaktadır. PMS, yakıt hücresi ile dizel jeneratör arasındaki yük paylaşımını droop kontrol veya benzeri algoritmalar ile otomatik olarak yönetmektedir. Batarya sistemi, EMS'in yakıt hücresinin çıkış gücünü kısıtlamasını ve dizel jeneratörün ani yük değişimlerine karşı tepkisinin dengeli olmasını sağlamaktadır. Batarya, geçici güç farklarını üstlenerek sistemin kararlılığını desteklemektedir.

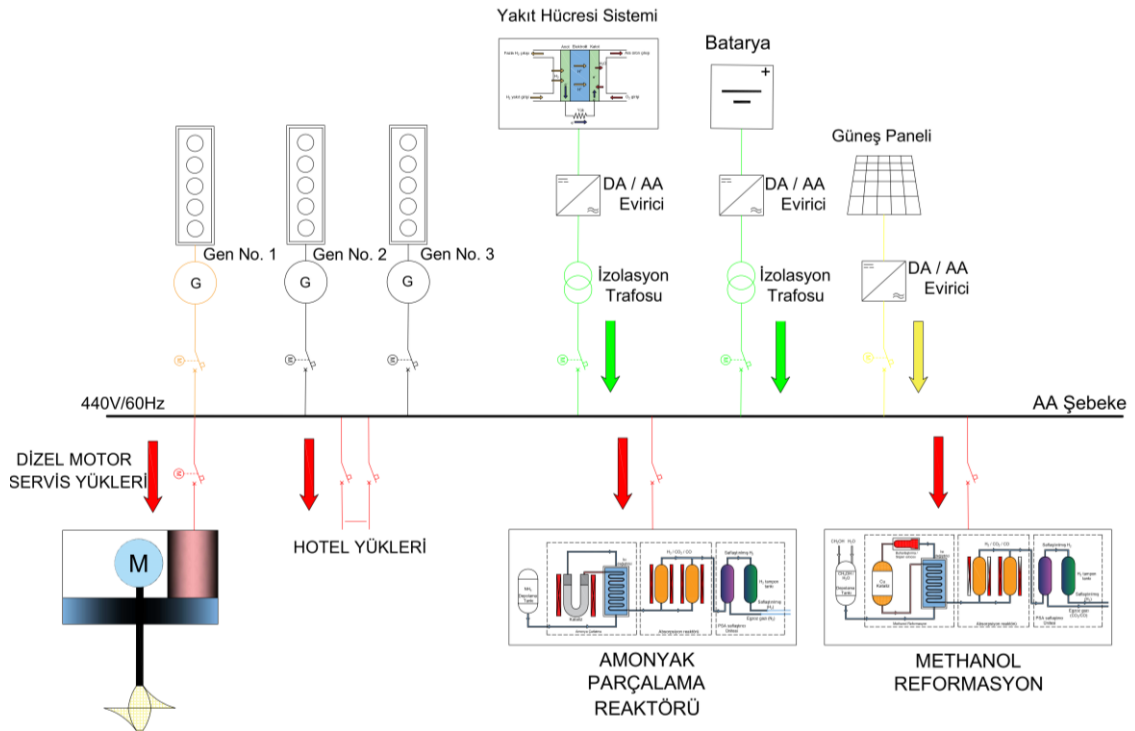
Kargo ve BWTS operasyonlarında hibrit EMS modu sürekli etkin durumda bulunmaktadır. Batarya, anlık yük geçişlerinde tampon görevi üstlenmektedir. Yakıt hücresi ve dizel jeneratör, sürekliliği ve yüksek güç ihtiyacını karşılamaktadır. Bu yapı, geminin yüksek elektrik talebini güvenle karşılayacak şekilde optimize edilmekte ve emisyonları asgariye indirirken sistemin kararlı çalışmasını mümkün kılmaktadır. Şekil 6.6'da devrede olan sistemler gösterilmektedir.



Şekil 6.6: Kargo ve BWTS operasyonu tek hat gösterimi.

6.4.1.3. Limandan ayrılma ve limana varma operasyonları

Limandan ayrılma ve limana varış operasyonları sırasında, gemide elektrikli tahrik sistemi bulunmadığı için ana sevk dizel motorlarıyla tahrik sağlanmakta, elektrik ihtiyacı ise dizel jeneratörlerle karşılanmaktadır. Ancak yeni entegre edilen sistemle birlikte özellikle liman manevraları ve düşük hızlı seyir aşamalarında yakıt hücresi ve batarya tabanlı sıfır emisyon moduna öncelik verilmektedir. Yakıt hücresinin bu yükleri karşılayabilmesi öngörülmekte, batarya ise ani yük değişimlerinde destekleyici rol üstlenmektedir. Ani yük artışları veya bataryanın beklenenden hızlı deşarj olması gibi istisnai durumlarda şebeke stabilitesini sağlamak için dizel jeneratörler bekleme modunda hazır bulundurulmaktadır. Buradaki temel hedef mümkün olduğunca sıfır emisyon modunda kalmak ve dizel jeneratörlerin devreye alınmasını minimize etmektir. Güç talebi yakıt hücresi ve bataryanın birlikte sağlayabileceği seviyeyi aşar veya şebeke kararlılığında risk oluşursa, daha önceki bölümlerde açıklanan geçiş mantığı kapsamında hibrit moda geçiş yapılmaktadır. Böylece güç kesintisiz ve güvenli bir şekilde temin edilmektedir. Bu operasyonun tek hat şeması Şekil 6.7’de gösterilmektedir.

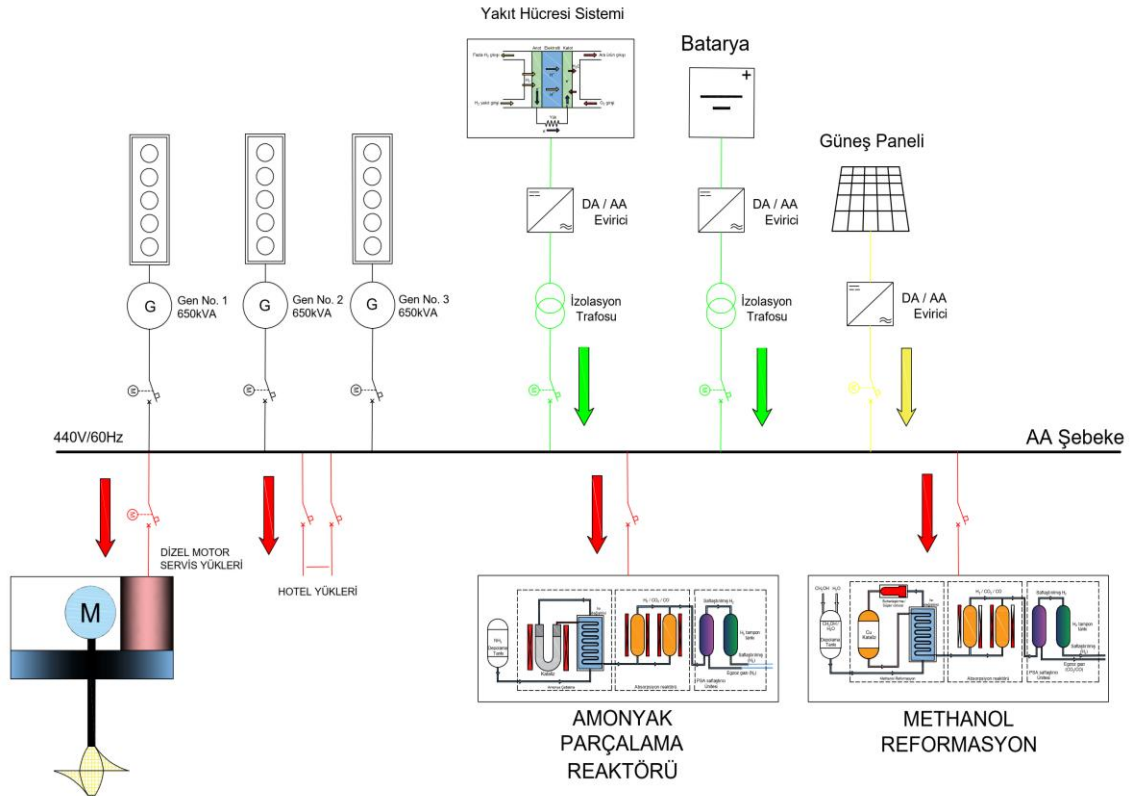


Şekil 6.7: Limana Varış/Ayrılma operasyonu tek hat gösterimi..

6.4.1.4. Normal seyir operasyonu

Gemi normal seyir operasyonunda yük profili çok daha dengelidir ve anlık yüksek güç gerektiren olaylar nadiren görülmektedir. Bu durum, yakıt hücresi tabanlı sıfır emisyon modunun en verimli şekilde uygulanabileceği ve uzun süreli kullanımının mümkün olduğu bir senaryoyu oluşturmaktadır. Burada yakıt hücresi geminin ana elektrik yükünü karşılamakta, batarya ise yalnızca kısa süreli yük dalgalanmalarında veya enerji yönetim sistemi tarafından gerekli görüldüğünde devreye girerek sisteme destek olmaktadır.

Seyir sırasında batarya ve yakıt hücresi entegrasyonu sayesinde güç üretimi ve tüketimi optimum şekilde dengelenmektedir. Eğer beklenmedik bir şekilde batarya SoC seviyesi minimum sınırına yaklaşırsa veya yakıt hücresi istenen yük artışına zamanında karşılık veremezse enerji yönetim sistemi otomatik olarak hibrit moda geçişi başlatmakta ve dizel jeneratör devreye alınmaktadır. Ancak genel amaç normal seyir sırasında mümkün olduğunca uzun süre boyunca sıfır emisyon modunda kalmak ve yalnızca gerekli olduğunda hibrit mod geçişini tetiklemektedir. Bu operasyonun tek hat şeması Şekil 6.8’de gösterilmektedir.

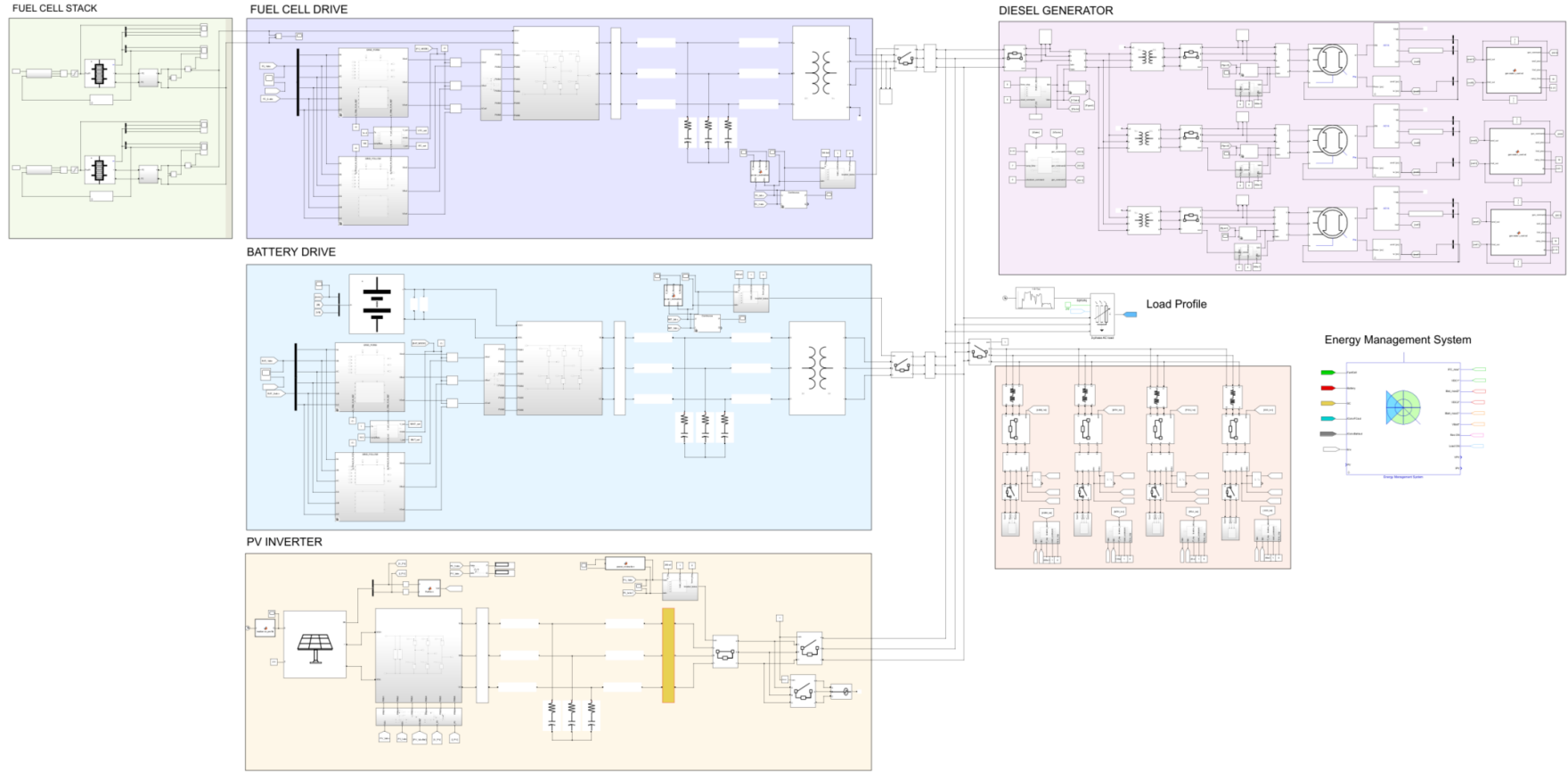


Şekil 6.8: Normal seyir operasyonu tek hat gösterimi.

BÖLÜM 7. ANALİZ VE SİMÜLASYON SONUÇLARI

7.1. Giriş

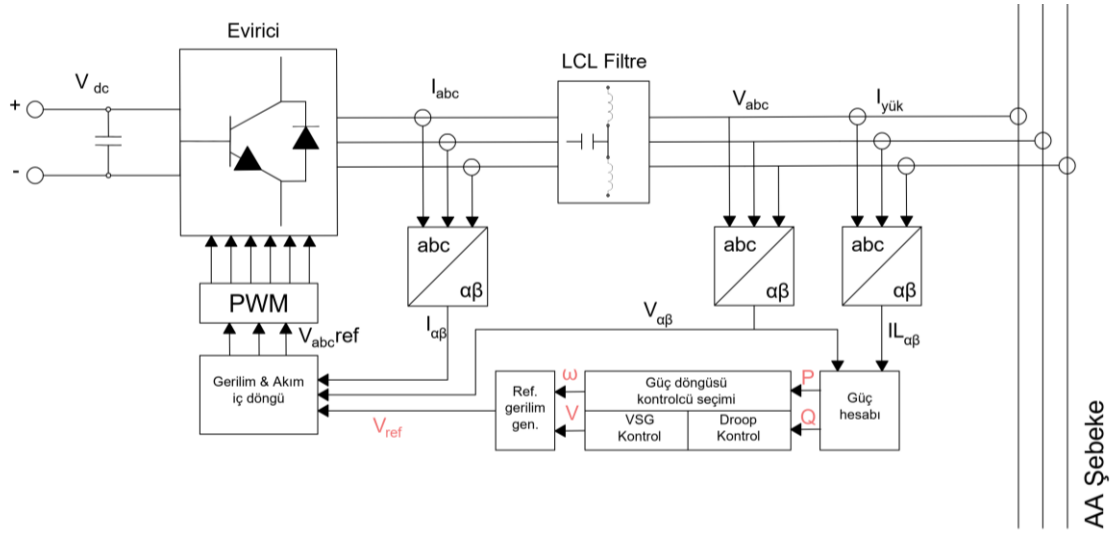
Bu bölümde, sistemin dijital ikizi oluşturularak hibrit modelleme gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.1’de sistemin tamamı gösterilmiştir. Her bir alt sistemin analizi ayrı ayrı açıklanmış olup, bölüm sonunda her sistemin simülasyon sonuçları sunulmuştur. Simülasyon ortamında geliştirilen model üzerinde enerji yönetimi ve güç yönetimi stratejileri denenmiş, kontrol sistemlerinin tepkileri analiz edilmiştir. Gerçek operasyon koşullarına uygun yük profilleri kullanılarak senaryo bazlı simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve operasyon modlarının işleyişi simülasyon sonuçlarıyla desteklenmiştir.



Şekil 7.1: Tüm sistem MATLAB®/Simulink modeli.

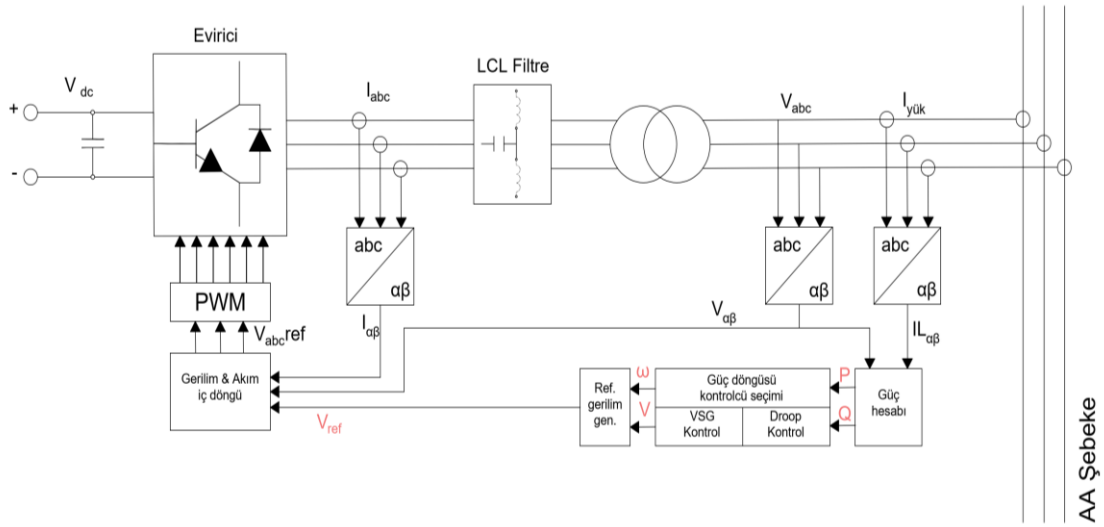
7.2. Üç faz GFM/GFL Evirici modeli tasarımı

PV sistemi için evirici modelinin kontrol yapısı Şekil 7.2’de gösterilmektedir. Bu yapıda, eviricinin çıkışı yüksek frekanslı anahtarlama harmoniklerini filtrelemek amacıyla LCL filtresi üzerinden doğrudan AA şebekeye bağlanmaktadır. Modelde transformatör kullanılmamış olup, evirici kontrol yapısı şebeke bağlantılı (GFL) evirici olarak tasarlanmıştır. Eviricinin iç yapısında, tipik olarak iki katmanlı bir kontrol yaklaşımı uygulanmaktadır. Bu yaklaşımda, hızlı tepki veren gerilim ve akım iç döngüsü ile daha yavaş çalışan dış güç döngüsü kontrolü birlikte kullanılmaktadır.



Şekil 7.2: PV evirici kontrol yapısı.

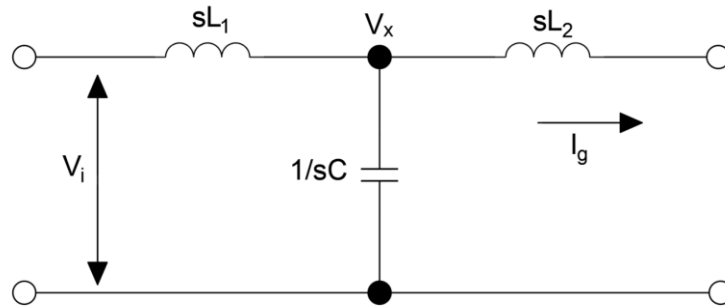
Yakıt hücresi ve batarya sistemlerine ait evirici kontrol yapıları Şekil 7.3’te gösterilmiştir. Bu sistemlerde izolasyon transformatörü kullanılmaktadır. Batarya ve yakıt hücresi uygulamalarında galvanik izolasyon gerekliliği söz konusudur ve özellikle yüksek güç seviyelerinde sistemin güvenli çalışması açısından bu izolasyon kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, her iki yapıda da AA şebeke ile doğrudan elektriksel bağlantı yerine, izolasyon transformatörü üzerinden bağlantı sağlanmıştır. Eviricinin DA gerilim seviyesine bağlı olarak transformatörler, yükseltici ya da düşürücü olacak şekilde uygun biçimde tasarlanmakta ve sistem gereksinimlerine göre seçilmektedir. Söz konusu durumda, AA 440 V çıkış gerilimi için yakıt hücresi sistemi sınır değerde kaldığından, trafo yükseltici olarak tasarlanmıştır. Batarya sisteminde ise DA gerilim seviyesi yüksek olduğundan, düşürücü trafo tercih edilmiştir.



Şekil 7.3: FC ve BAT evirici kontrol yapısı.

7.2.1. Üç fazlı sistemlerde evirici LCL filtre tasarımı

LCL filtresi, evirici ile şebeke arasına eklenerek yüksek frekanslı harmoniklerin etkin biçimde bastırılmasını sağlar ve şebekeye enjekte edilen akımın toplam harmonik bozulmasını azaltır. Bu sayede, evirici çıkışındaki dalga şekli şebeke standartlarını sağlayacak düzeye gelmekte, güç kalitesi yükselmekte ve filtrelenmemiş tek bir L bobinine kıyasla çok daha keskin bir frekans kesme karakteristiği elde edilmektedir. Bu yapıya ilişkin devre modeli, Şekil 7.4'te gösterilmektedir.



Şekil 7.4: LCL filtre modeli.

LCL filtre devresine ait matematiksel model, evirici çıkış gerilimi (V_i), şebekeye enjekte edilen akım (I_g) ve filtre üzerindeki ara gerilim (V_x) arasındaki ilişkileri temel devre denklemleri kullanılarak tanımlamaktadır. Bu model, LCL filtrenin dinamik davranışını ve akım geçişlerini analiz edebilmek için bir başlangıç noktası sunmakta olup, ilgili

ifadeler denklem 7.1– 7.10 aralığında verilmiştir. Sistemin temel akım-gerilim ilişkisi, denklem 7.1’de gösterilmektedir.

$$\frac{V_i - V_x}{sL_1} = I_g + \frac{V_x}{1/sC} \quad (7.1)$$

Denklem 7.1’den yola çıkarak, evirici çıkış gerilimi ile şebekeye enjekte edilen akım arasındaki transfer fonksiyonu türetilmektedir. Bu transfer fonksiyonu, LCL filtre karakteristiğini sistematik biçimde incelemeye ve kontrol sistemi tasarımında kullanılacak matematiksel modeli oluşturmaya olanak tanımaktadır. Türetilen transfer fonksiyonu denklem 7.2’de verilmiştir.

$$\frac{I_g}{V_i} = \frac{1}{s^3 L_1 L_2 C + s(L_1 + L_2)} \quad (7.2)$$

Transfer fonksiyonu, filtre tarafındaki endüktansların eşit alınması ve paralel endüktans (L_p) kavramının tanımlanmasıyla daha sade bir forma dönüştürülebilmektedir. Bu sadeleştirme, analiz ve kontrol açısından önemli bir kolaylık sağlamaktadır. Sadeleştirilmiş transfer fonksiyona ait ifade denklem 7.3’te verilmiştir.

$$\frac{I_g}{V_i} = \frac{1}{sL(1 + s^2 CL_p)} \quad (7.3)$$

Rezonans açısal frekansı, LCL filtre karakteristiğinde öne çıkan ve filtre sisteminin harmonik bastırma yeteneğini belirleyen temel parametrelerden biridir. Bu frekans, sistemdeki kapasitör (C) ve paralel endüktans (L_p) üzerinden tanımlanmakta olup, rezonans anında filtre çıkışında oluşabilecek istenmeyen genlik artışlarını sınırlandırmak açısından kritik öneme sahiptir. Rezonans frekansına ilişkin matematiksel ifade denklem 7.4’te verilmiştir.

$$\omega_{res} = \frac{1}{\sqrt{CL_p}} \quad (7.4)$$

LCL filtre tasarımında rezonans frekansının konumu, sistemin dinamik tepkisini ve harmonik bastırma başarımını doğrudan etkilemektedir. Genellikle rezonans frekansı, anahtarlama frekansının onda biri olarak seçilmekte; böylece hem anahtarlama

harmoniklerinin filtrelenmesi sağlanmakta hem de filtrede oluşabilecek istenmeyen rezonans etkilerinin önüne geçilmektedir. Rezonans frekansının bu yaklaşıma göre hesaplanmasına ilişkin ifade denklem 7.5'te verilmiştir.

$$f_{res} = \frac{f_{sw}}{10} \quad (7.5)$$

Kapasitör değeri belirlenirken, şebekeden çekilecek reaktif gücün sistemin anma gücünün %5'ini geçmemesi prensibi esas alınmaktadır. Bu yaklaşım, filtre kondansatörünün şebekeye aşırı reaktif güç enjekte etmesini ve güç katsayısı üzerinde olumsuz bir etki oluşturmasını önlemektedir. Bu kritere göre kapasitör değerinin hesaplanmasına ilişkin ifade denklem 7.6'da verilmiştir.

$$C = \frac{0.05 \cdot S}{V^2 \cdot 2\pi f} \quad (7.6)$$

"Seçilen rezonans frekansı ve kondansatör değeri kullanılarak, LCL filtrenin toplam endüktansı hesaplanmaktadır. Bu formül, filtre elemanlarının birbiriyle olan ilişkisini ve rezonans frekansı üzerindeki etkilerini doğrudan ortaya koymaktadır. Toplam endüktansın bu parametrelere bağlı olarak hesaplandığı ifade denklem 7.7'de verilmiştir.

$$L = \frac{1}{(2\pi f_{res})^2 \cdot C} \quad (7.7)$$

Evirici ve şebeke tarafı endüktanslarının eşit alınması durumunda, her bir endüktans değeri $L_1 = L_2 = L/2$ şeklinde tanımlanmaktadır. Bu tercih, tasarım ve uygulama açısından simetri ve kolaylık sağlamaktadır. Filtrenin, anahtarlama frekansında bastırması gereken akım harmoniklerine karşı minimum endüktans değeri belirlenmektedir. Bu yaklaşım, filtre çıkışındaki harmonik sızıntılarını sınırlamak ve şebekeye yüksek frekanslı akımların geçişini önlemek açısından gereklidir. Minimum endüktans değerinin bu esaslara göre hesaplandığı ifade denklem 7.8'de verilmiştir.

$$L_{min} = \frac{1}{\omega_{sw} \left(\frac{I_{g(sw)}}{V_{g(sw)}} \right) \cdot \left| 1 - \left(\frac{\omega_{sw}}{\omega_{res}} \right)^2 \right|} \quad (7.8)$$

Toplam endüktansın üst sınırı ise, şebekede istenmeyen gerilim düşümlerinin ve sistemde güç kalitesi kayıplarının önüne geçmek amacıyla belirlenmektedir. Bu sınır, eviricinin nominal akımı ile şebeke gerilimi arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Üst sınır değerine ilişkin ifade denklem 7.9’da verilmiştir.

$$L_{max} = \frac{0.2 \cdot V_g}{2\pi f \cdot I_{nom}} \quad (7.9)$$

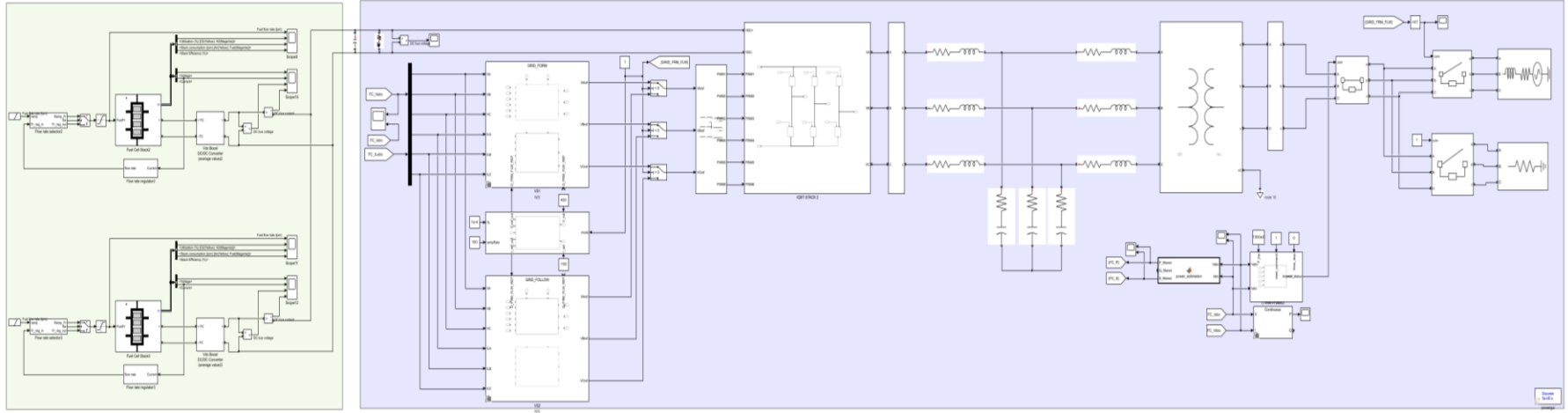
7.3. Alt Sistem Modelleri

Bu kısımda batarya, yakıt hücresi, güneş paneli ve dizel jeneratör modelleri ayrı ayrı değerlendirilmiş ve belirlenen sistem parametreleriyle elde edilen simülasyon sonuçları sunulmuştur.

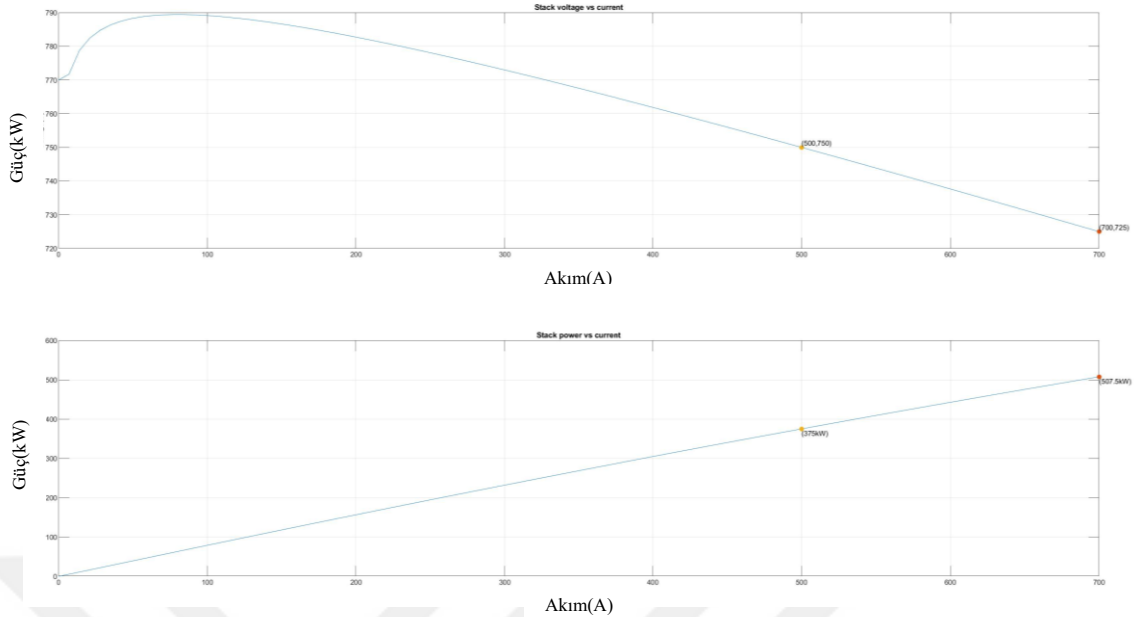
7.3.1. Yakıt hücresi sistem modeli

Şekil 7.5’te, MATLAB®/Simulink ortamında modellenen yakıt hücresi sistemi gösterilmiştir ve bu modelde kullanılan ana parametreler ile sistemin karakteristik özellikleri bu bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Tasarlanan modelde, yakıt hücresinin DA çıkışında gerilimi istenen seviyeye yükseltmek amacıyla bir DA/DA dönüştürücü kullanılmıştır. Yükseltici dönüştürücü çıkışında ise, sistemin AA baraya enerji aktarımını sağlamak üzere bir evirici modeli entegre edilmiştir.

Yakıt hücresi çıkışındaki evirici kontrol algoritmaları, GFM ve GFL modlarında çalışmaya uygun şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede sistem, mikro şebeke ya da ada modunda şebeke referansı oluşturabilmekte veya harici bir şebekeye senkronize olabilmektedir. Modelde iki adet yakıt hücresi bloğu bulunmakta olup, her bir blok 500 kVA güç üretme kapasitesine sahiptir. Bu bloklar paralel olarak bağlanarak toplamda 1 MVA güce ulaşılmaktadır. Her bir yakıt hücresi bloğuna ait akım-gerilim karakteristik eğrisi Şekil 7.6’da verilmiştir.



Şekil 7.5: Yakıt hücresi sistemi MATLAB®/Simulink modeli.



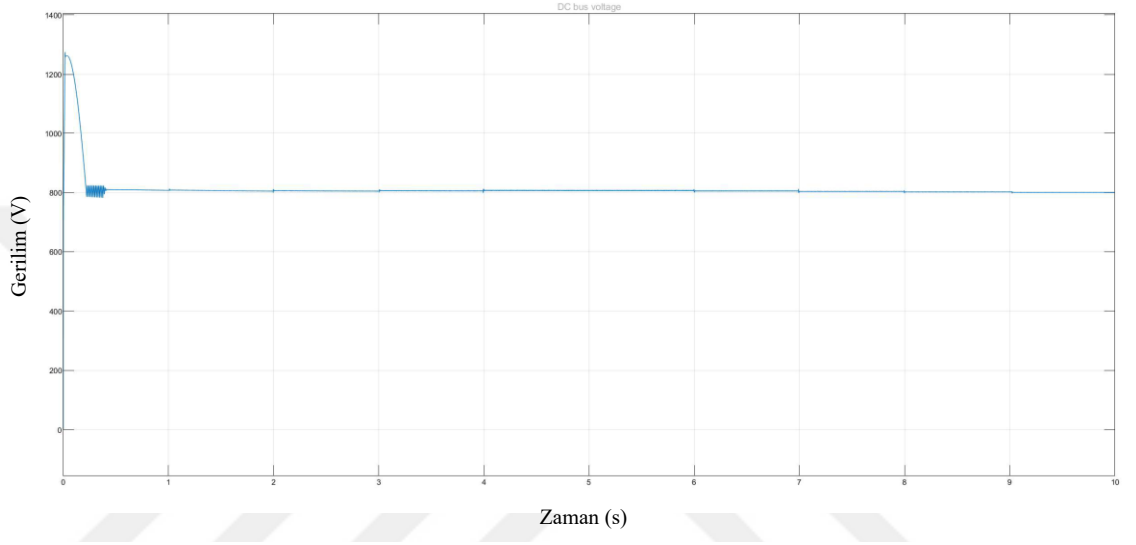
Şekil 7.6: Yakıt hücresi V/I karakteristiği.

Sistem simülasyonunda kullanılan yakıt hücresi, evirici, anahtarlama frekansı ve LCL filtreye ait parametreler Tablo 7.1’de sunulmuştur. Bu parametreler esas alınarak, evirici modelinin MATLAB®/Simulink ortamında simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

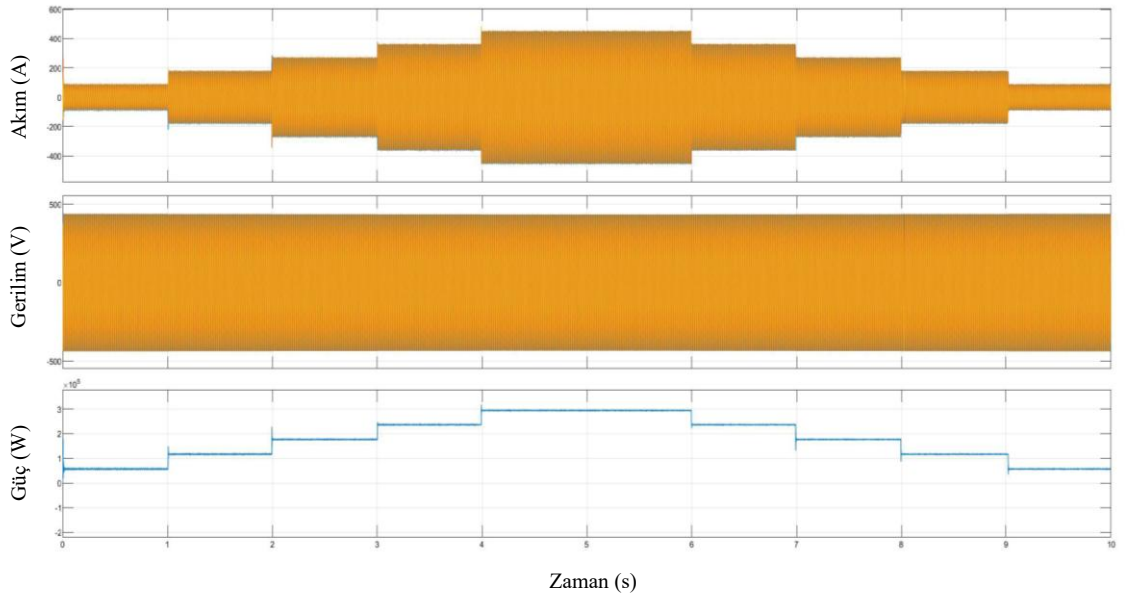
Tablo 7.1: Yakıt hücresi sistemi parametreleri.

Parametre	Değer	Açıklama
Hücre Sayısı	350	Her bir yakıt hücresi yığını için
Nominal Verim (%)	55	Modelde tanımlanan ortalama verimlilik
1A Akımda Gerilim (V)	750	Akım 1A iken yığın gerilimi
Nominal Çalışma Noktası (A,V)	500, 750	500A akımda 750V çıkış, yaklaşık 375 kW
Maksimum Çalışma Noktası (A,V)	700, 725	700A akımda 725V çıkış, yaklaşık 507.5 kW
Evirici Gücü (kVA)	1MVA	Yakıt hücresi evirici sisteminin nominal görünür gücü.
Evirici Anahtarlama Frekansı (Hz)	5kHz	Eviricinin PWM anahtarlama (modülasyon) frekansı.
Evirici LCL filtresi L değeri (μH)	300 μH	LCL filtrede toplam endüktans (L1=L2)
Evirici LCL filtresi C değeri (μF)	3400μF	LCL filtre kapasite değeri

Şekil 7.7’de, yakıt hücresi sisteminin eviriciye bağlanmadan önceki DA çıkışına ait simülasyon sonuçları sunulmuştur. Aynı simülasyon ortamında elde edilen ve zaman açısından eşzamanlı olan verilere göre, Şekil 7.8’de evirici çıkışında farklı yüklenme koşullarında oluşan akım, gerilim ve güç sonuçları gösterilmiştir. Bu sayede, yakıt hücresi performansı ve sistem dinamikleri, farklı yüklenme senaryoları altında ayrıntılı biçimde analiz edilebilmektedir.



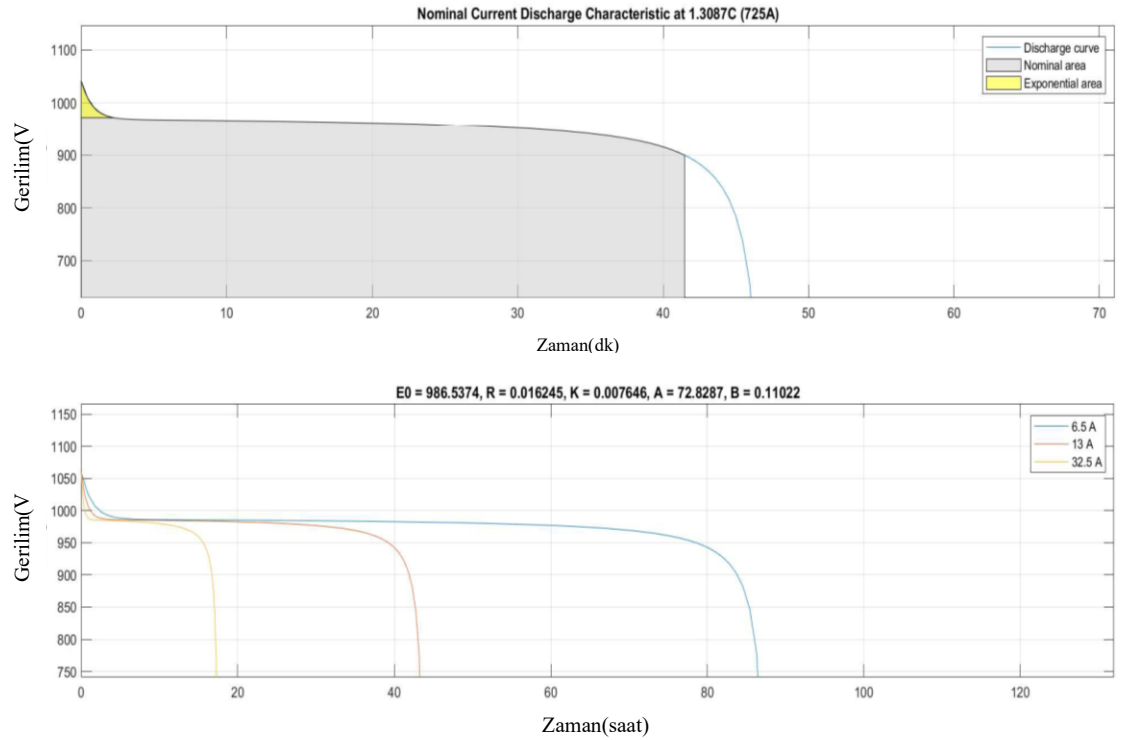
Şekil 7.7: Yakıt hücresi DA/DA çıkış simülasyon sonucu.



Şekil 7.8: Yakıt hücresi sistemi simülasyon sonucu.

7.3.2. Batarya sistem modeli

Şekil 7.10’da, MATLAB®/Simulink ortamında modellenen batarya sistemi gösterilmiştir ve bu modelde kullanılan parametreler ile batarya sisteminin karakteristik özellikleri bu bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Modelde, batarya sistemi doğrudan eviriciye bağlanacak şekilde tasarlanmış olup, batarya ile evirici arasındaki entegrasyon değerlendirilmiştir. Batarya çıkışında yer alan evirici kontrol algoritmaları, GFM ve GFL modlarında çalışmaya uygun olarak geliştirilmiştir. Bu sayede batarya sistemi, hem mikro şebekenin ada modunda hem de harici bir şebekeye senkronize biçimde esnek olarak çalışabilmektedir. Tasarımda kullanılan batarya kapasitesi 500 kWh olarak belirlenmiş, evirici gücü ise bu kapasiteye uygun şekilde 500 kVA olarak seçilmiştir. Bataryanın şarj/deşarj karakteristiği Şekil 7.9’da verilmiştir.



Şekil 7.9: Batarya sistemideşarj karakteristiği.

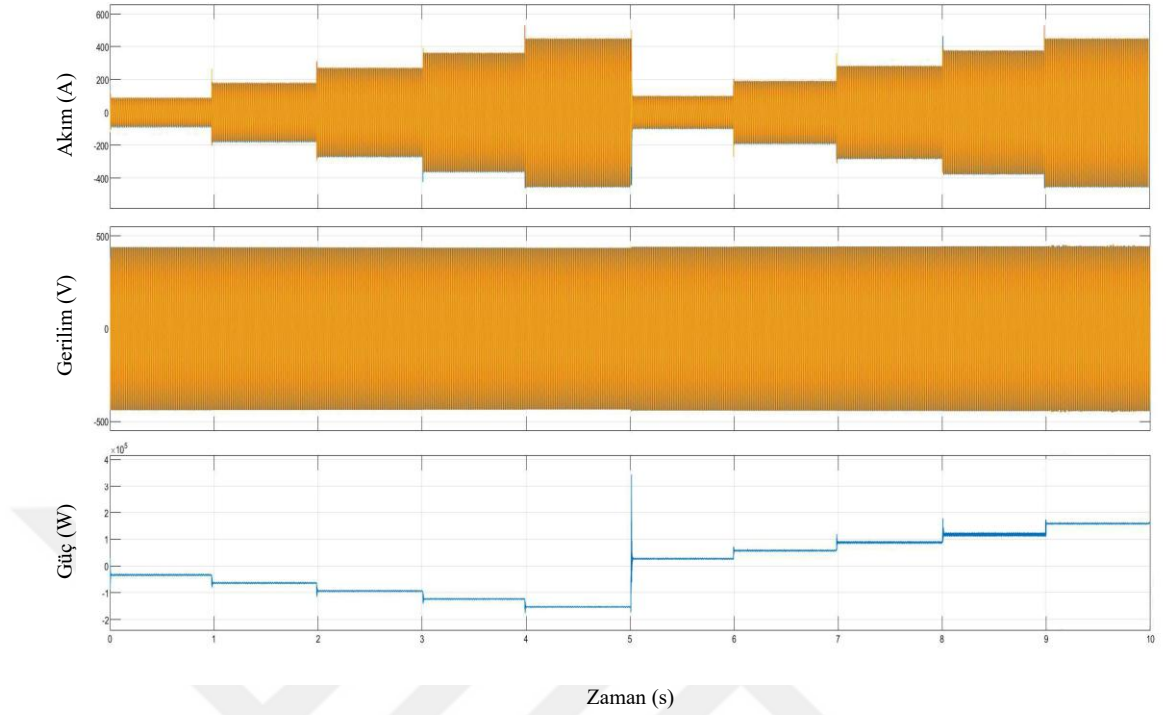
137

Simülasyon modelinde kullanılan batarya ve eviriciye ait parametreler ile anahtarlama frekansı ve LCL filtre değerleri Tablo 7.2’de sunulmuştur. Bu veriler esas alınarak, evirici modeli MATLAB®/Simulink ortamında simüle edilmiştir.

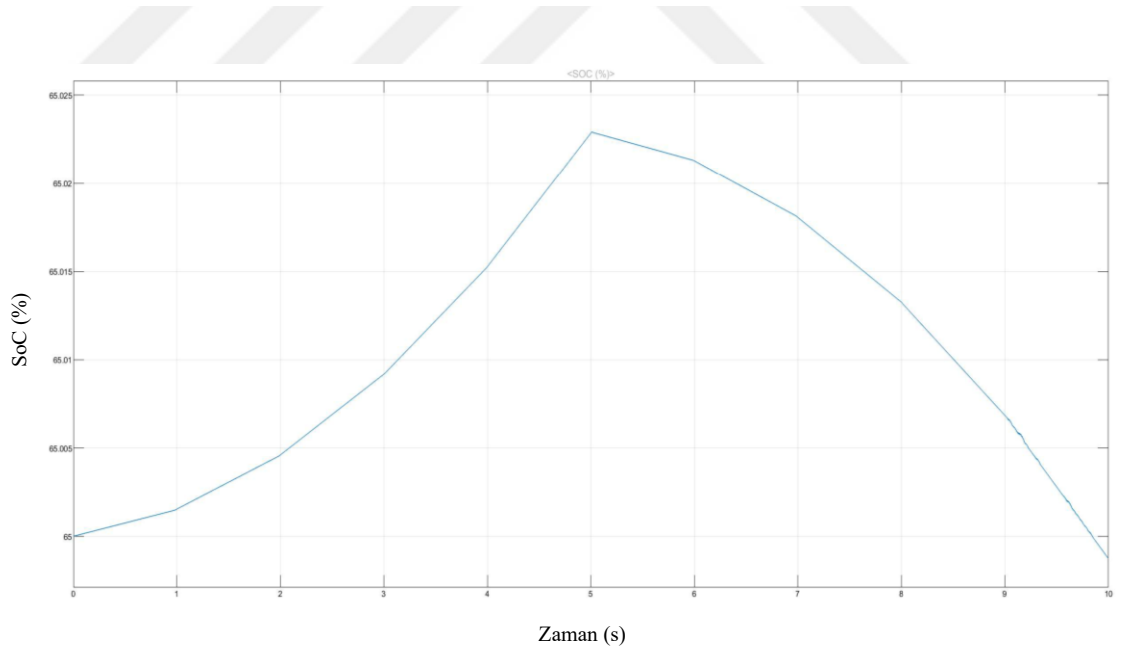
Tablo 7.2: Batarya sistemi parametreleri.

Parametre	Değer	Açıklama
Batarya Tipi	Lityum-İyon	Modelde seçili batarya türü
Nominal Gerilim (V)	900	Bataryanın nominal çalışma gerilimi
Maksimum Kapasite (Ah)	554	Bataryanın tam şarj kapasitesi
Nominal Kapasite (Ah)	501.0	Nominal gerilimde kullanılabilir kapasite
Tam Şarj Gerilimi (V)	1047.6	Batarya tam doluyken ulaşılan maksimum gerilim
Nominal Deşarj Akımı (A)	240.9	Bataryanın sürekli verebileceği deşarj akımı
Evirici Gücü (kVA)	500VA	Batarya evirici sisteminin nominal görünür gücü.
Evirici Anahtarlama Frekansı (Hz)	5kHz	Eviricinin PWM anahtarlama (modülasyon) frekansı.
Evirici LCL filtresi L değeri (μH)	450 μH	LCL filtrede toplam endüktans (L1=L2)
Evirici LCL filtresi C değeri (μF)	1700μF	LCL filtre kapasite değeri

Şekil 7.11’de, batarya sistemine ait şarj ve deşarj işlemlerinin akım, gerilim ve güç sonuçları gösterilmiştir. Simülasyonda, 0–5 saniye aralığında bataryaya farklı güç seviyelerinde şarj işlemi uygulanmış ve 5–10 saniyeler arasında ise farklı güçlerde deşarj senaryoları incelenmiştir. Aynı zamanda, sistemin dinamik davranışını izlemek amacıyla Şekil 7.12’de batarya sistemine ait anlık SoC değişimi sunulmuştur. Bu modelleme ile batarya sisteminin entegrasyonu, şarj-deşarj döngüsündeki performansı ve sistem dinamikleri analiz edilebilmektedir.



Şekil 7.11: Batarya sistemi simülasyon sonucu.

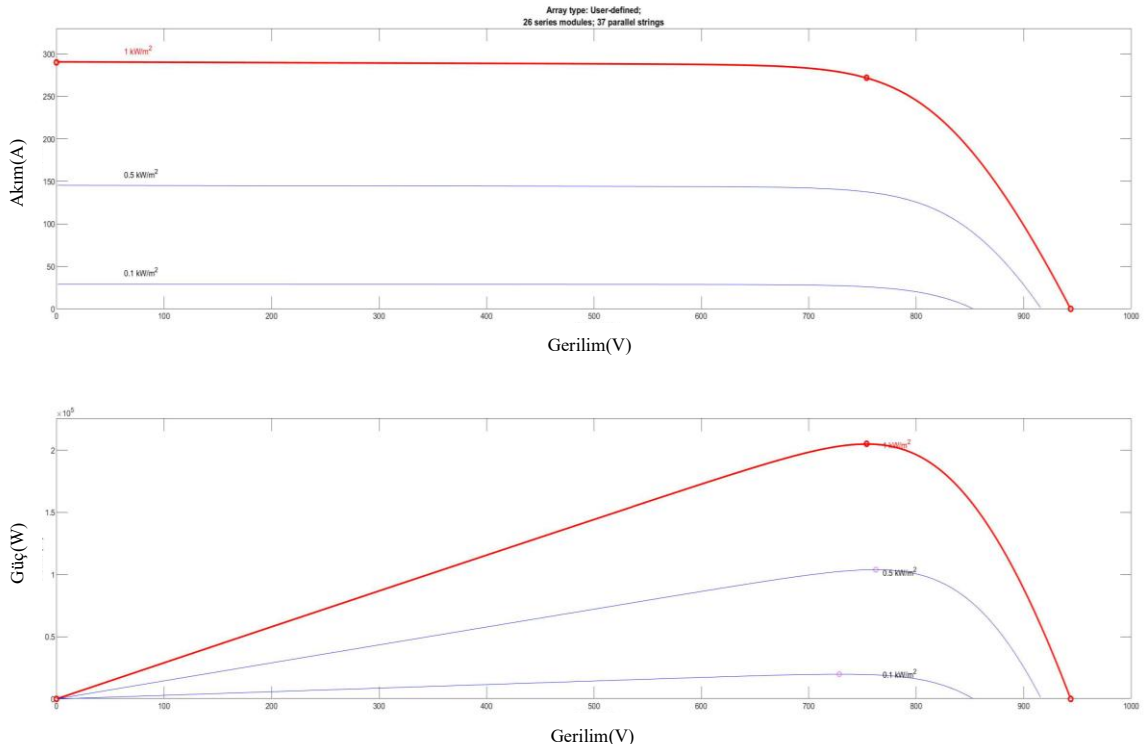


Şekil 7.12: Batarya sistesimi SoC simülasyon sonucu.

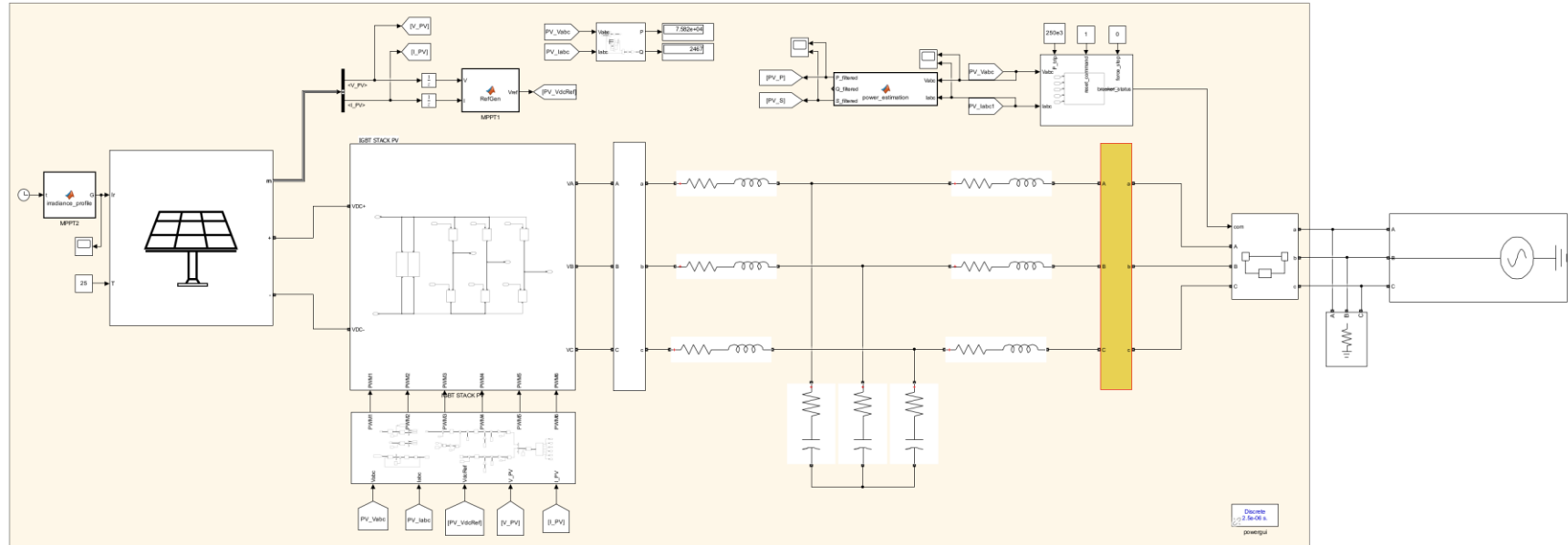
7.3.3. PV sistem modeli

Şekil 7.14'te, MATLAB®/Simulink ortamında modellenen fotovoltaik (PV) sistem gösterilmiştir ve bu modelde kullanılan parametreler ile PV sisteminin karakteristik özellikleri bu bölümde açıklanmıştır. Modelde, PV dizisi doğrudan eviriciye bağlanacak şekilde tek seviyeli bir yapı üzerinde modellenmiştir. Sistemin giriş DA gerilimi yeterli olduğundan, PV çıkışı ile evirici arasında herhangi bir DA/DA yükseltici dönüştürücüye ihtiyaç duyulmamıştır. PV sisteminin kontrol algoritmaları GFL çalışma moduna uygun olarak geliştirilmiş olup, evirici kontrolcüler de bu doğrultuda GFL mantığına göre tasarlanmıştır.

Çalışmada kullanılan PV panel gücü 200 kWp olarak belirlenmiştir. PV dizisinin karakteristiğini oluşturan seri modüller ve paralel bağlı dizi kolları ile akım/gerilim (I–V), güç/gerilim (P–V) ve ışıınım karakteristikleri Şekil 7.13'te gösterilmiştir.



Şekil 7.13: PV modeli ışıınım karakteristik grafiği.



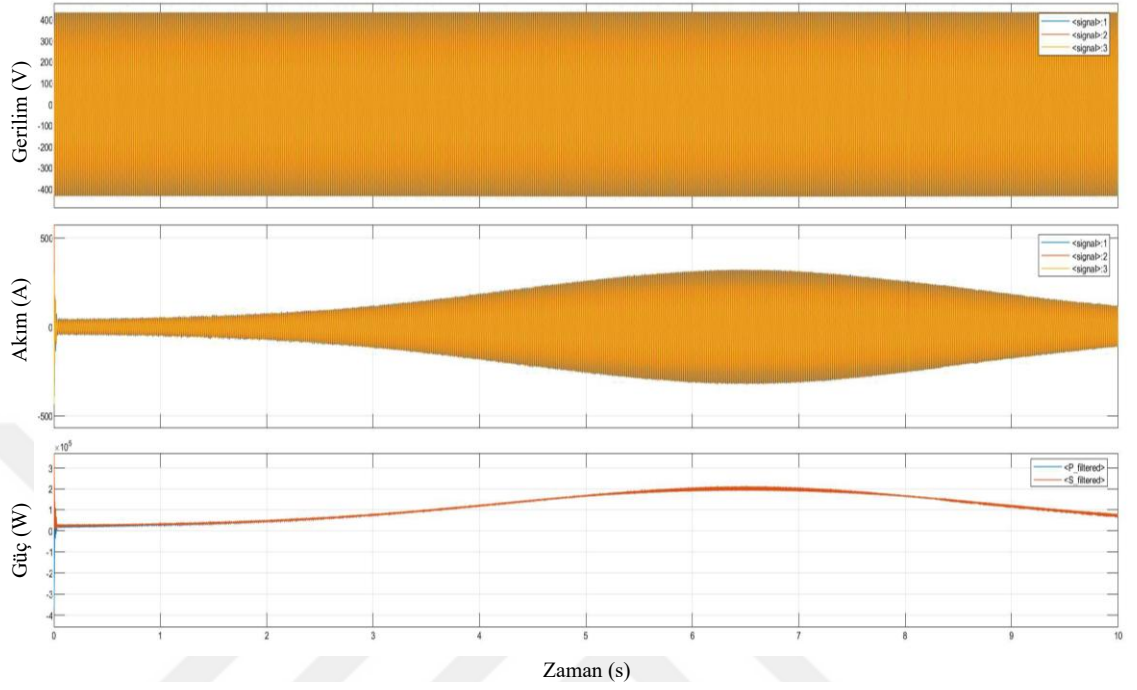
Şekil 7.14: PV sistemi MATLAB®/Simulink modeli.

Simülasyonda kullanılan PV paneli, evirici, anahtarlama frekansı ve LCL filtre parametreleri Tablo 7.3'te sunulmuştur. Bu parametreler esas alınarak, PV evirici modeline ait simülasyon sonuçları MATLAB®/Simulink ortamında elde edilmiştir.

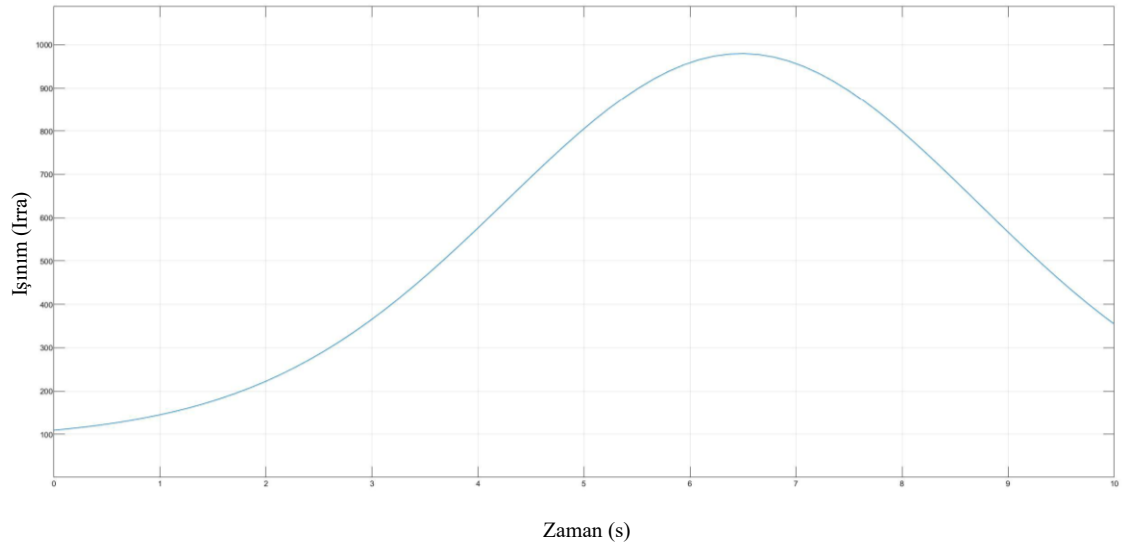
Tablo 7.3: PV sistemi parametreleri.

Parametre	Değer	Açıklama
Paralel Bağlı Dizi Sayısı	37	PV dizisinde paralel olarak bağlanan dizi sayısı
Seri Bağlı Modül Sayısı / Dizi	26	Her bir dizide seri bağlı PV modül adedi
Modül Başına Hücre Sayısı	60	Her bir PV modülünde bulunan hücre adedi
Açık Devre Gerilimi (Voc, V)	36.3	Modül başına açık devre gerilimi
Kısa Devre Akımı (Isc, A)	7.84	Modül başına kısa devre akımı
Maksimum Güçte Gerilim (Vmp, V)	29	Maksimum güç noktasında modül gerilimi
Maksimum Güçte Akım (Imp, A)	7.35	Maksimum güç noktasında modül akımı
Maksimum Güç (Pmax, W)	213.15	Her bir PV modülünün maksimum güç çıkışı
Evirici Gücü (kVA)	200kVA	PV evirici sisteminin nominal görünür gücü.
Evirici Anahtarlama Frekansı (Hz)	5kHz	Eviricinin PWM anahtarlama (modülasyon) frekansı.
Evirici LCL filtresi L değeri (μH)	500 μH	LCL filtrede toplam endüktans (L1=L2)
Evirici LCL filtresi C değeri (μF)	850μF	LCL filtre kapasite değeri

Şekil 7.15'te, bu güneş enerjisi sistemine ait simülasyon çıktıları sunulmuş ve sistemin akım, gerilim ile güç sonuçları gösterilmiştir. Simülasyonun eşzamanlı olarak gerçekleştirildiği ortamda, Şekil 7.16'da ise PV sisteminin performansını doğrudan etkileyen referans ışıınım profili sunulmuştur. Bu modelleme ile PV sisteminin entegrasyonu ve değişken güneşlenme koşullarındaki dinamik davranışı analiz edilebilmektedir.



Şekil 7.15: PV sistem simülasyon sonucu.



Şekil 7.16: PV ışıınım referans modeli.

7.3.4. Jeneratör sistem modeli

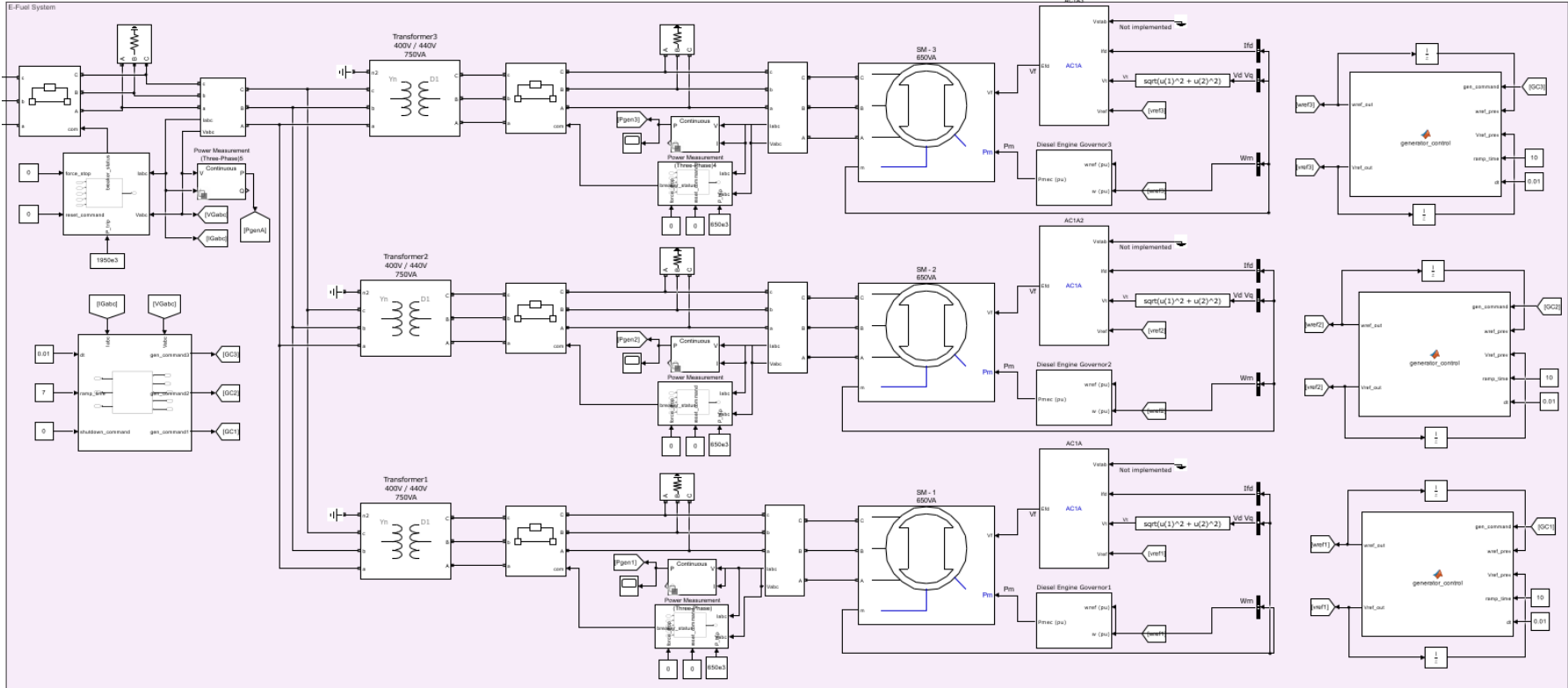
Şekil 7.17’de, MATLAB®/Simulink ortamında modellenen dizel jeneratör sistemi gösterilmiştir ve bu modelde kullanılan ana parametreler ile dizel jeneratörün karakteristik özellikleri bu bölümde açıklanmıştır. Modelde, sistemde yer alan üç adet dizel jeneratörün her biri 800 kVA gücünde olacak şekilde yapılandırılmıştır. Bu jeneratörler, paralel bağlı olarak mikro şebekede gerekli güç ihtiyacını karşılayacak biçimde modellenmiştir.

Dizel jeneratör bloğunda kullanılan parametreler Tablo 7.4’te sunulmakta olup, bu tablo modelde tanımlanan jeneratörlerin elektriksel ve dinamik karakteristiklerini ayrıntılı şekilde göstermektedir. Simülasyon ortamında, belirlenen parametreler esas alınarak jeneratörlerin yük altındaki dinamik ve kararlı durum performansları değerlendirilmiştir.

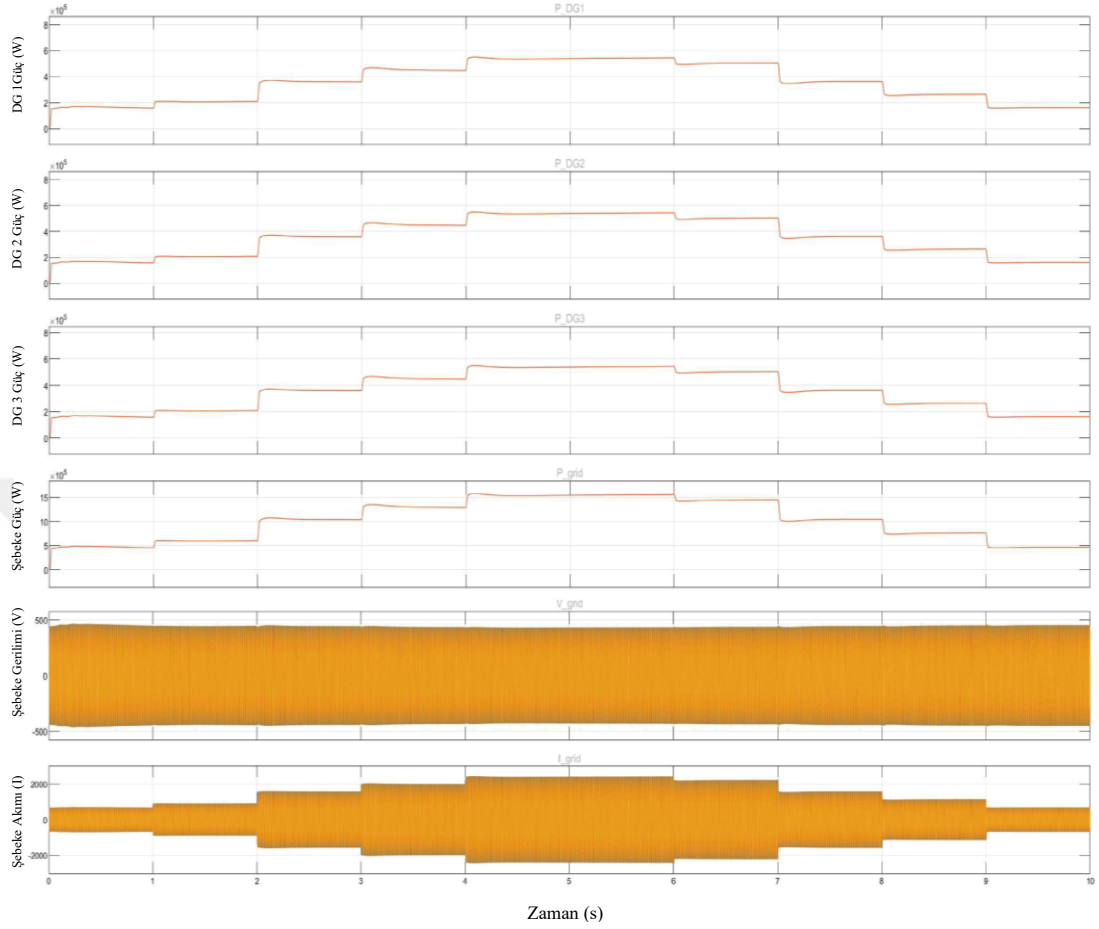
Tablo 7.4: Dizel jeneratör parametreleri.

Parametre	Değer	Açıklama
Nominal Güç (Pn, VA)	800	Jeneratörün nominal gücü (800 kVA)
Tepeden Tepeye Gerilim (Vn, Vrms)	440	Nominal faz-faz gerilim (Vrms)
Nominal Frekans (fn, Hz)	60	Nominal frekans
Zaman Sabitleri (Td', Td'', Tq'') (s)	3.7, 0.05, 0.05	d ve q ekseninde zaman sabitleri
Stator Direnci (Rs, pu)	0.0036	Stator sargısı direnci (p.u.)
Atalet Katsayısı (H, s)	1.07	Jeneratörün atalet sabiti

Şekil 7.18’de, DG1, DG2 ve DG3 dizel jeneratörlerinin farklı yük koşulları altındaki eşit güç paylaşımını gösteren simülasyon çalışması sunulmuştur. Bu görselde, jeneratörlerin şebekeye paralel bağlı şekilde çalıştığı durumda, yükün eş zamanlı ve dengeli biçimde dağıldığı gösterilmektedir. Simülasyon sonucunda şebeke üzerindeki gerilim, akım ve güç değerleri de değerlendirilmiş ve sistemin yüklenme koşulları altındaki davranışı ortaya konmuştur. Bu modelleme ile dizel jeneratörlerin güç sistemine entegrasyonu ve farklı yük senaryolarındaki dinamik tepkileri ayrıntılı şekilde analiz edilebilmektedir.



Şekil 7.17: Dizel jeneratör MATLAB®/Simulink modeli.



Şekil 7.18: Dizel jeneratör sistemi simülasyon sonucu.

7.4. Sistemler Arasında Güç Paylaşımı Simülasyonu

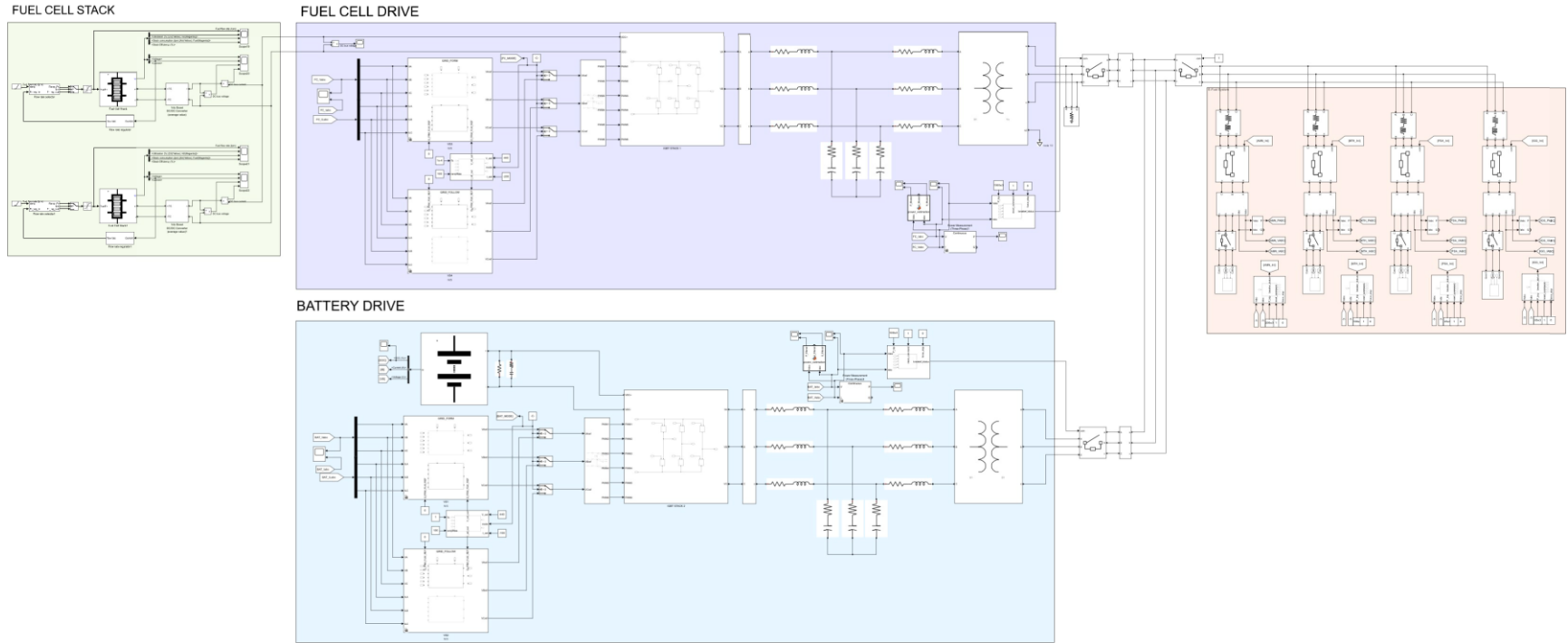
Bu bölümde, kurulan tüm sistem modeli parçalara ayrılarak analiz edilmiş ve GFM/GFL modlarında çalışan batarya ile yakıt hücresi sistemlerinin paralel çalışma senaryoları incelenmiştir. Simülasyon kapsamında, droop kontrol stratejisi kullanılarak bu sistemler arasındaki güç paylaşımı değerlendirilmiştir. Ayrıca, dizel jeneratörün de devrede olduğu durumlar ele alınmış ve bu koşullarda gerçekleşen güç paylaşımı simülasyon sonuçlarıyla birlikte sunulmuştur.

7.4.1. Batarya ve yakıt hücresi sistemi güç paylaşımı

Batarya ve yakıt hücresi sistemlerine ait MATLAB®/Simulink ortamında oluşturulan model Şekil 7.19’da gösterilmektedir. Bu modelde, her iki sistemin paralel çalışmaya uygun biçimde kontrol stratejileri geliştirilmiştir. Yakıt hücresi sistemi ile batarya enerji depolama sistemi, GFM ve GFL modlarında çalışabilecek şekilde tasarlanmış olup, bu doğrultuda evirici kontrolcüler yapılandırılmıştır. Güç paylaşım senaryolarına ait simülasyon çıktıları Şekil 7.20’de sunulmaktadır. Bu görselde, batarya sistemi ile yakıt hücresi sisteminin yük değişimlerine verdiği tepkiler ve güç paylaşım oranlarının zamanla nasıl değiştiği droop kontrol stratejisi kapsamında incelenmektedir. Her iki sistemin GFM modunda paralel çalıştığı bu yapı kapsamında aktif güç paylaşımı, referans frekans değişimlerine bağlı olarak droop eğrileri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu frekans referanslarının zamana bağlı değişimleri ise Şekil 7.21’de verilmiştir.

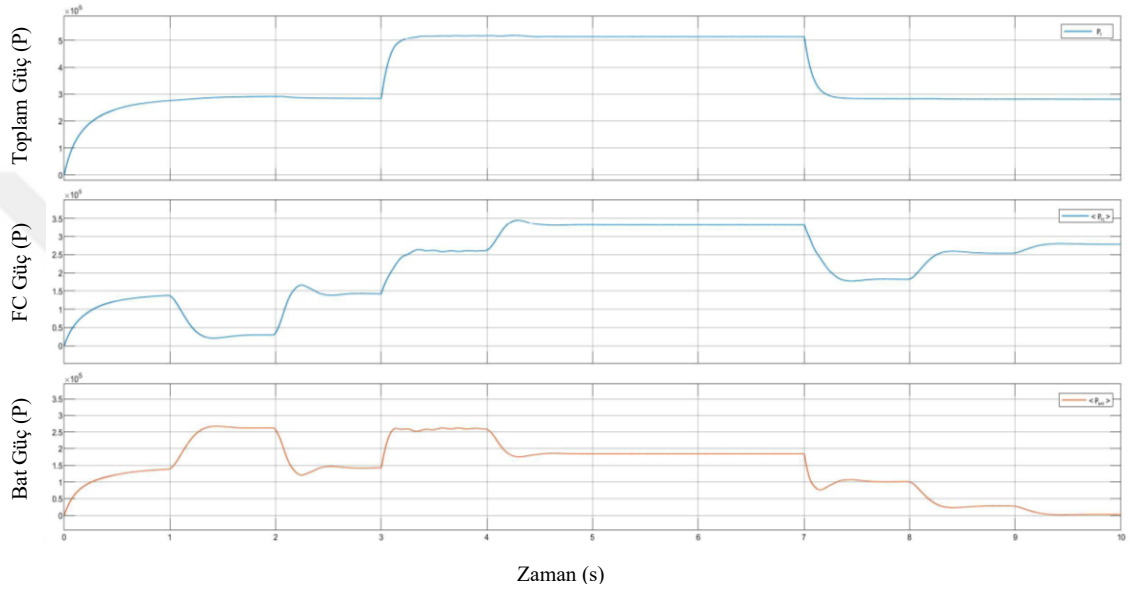
Başlangıçta mp_{bat} ve mp_{fc} katsayılarının eşit seçilmesiyle birlikte her iki kaynak eşit güç paylaşımı yapacak şekilde çalışmaya başlamıştır. Batarya sisteminin daha fazla yük alması hedeflendiğinde mp_{bat} değeri azaltılmış ve bu durumun ardından batarya üzerindeki güç artarken, yakıt hücresi üzerindeki yük azalmıştır; bu durum $t = 1$ ile $t = 2$ zaman aralığında gerçekleşmiştir. Ardından mp_{bat} değeri tekrar artırıldığında, sistem yeniden dengelenmiş ve güç paylaşımı eşitlenmiştir; bu değişim $t = 2$ ile $t = 3$ arasında gözlemlenmektedir. Toplam sistem gücünde bir artış gerçekleştirilmiş ve bu artış $t = 3$ anında uygulanmıştır. Bu artış sonrasında, yakıt hücresinin daha fazla yük alması hedeflenmiş ve bu amaçla mp_{fc} katsayısı düşürülmüştür. Uygulanan bu droop değişimi sonucunda, yakıt hücresi sistemi bataryaya kıyasla daha yüksek güç üretmeye başlamış ve bu yük paylaşım farkı $t = 4$ ile $t = 5$ aralığında meydana gelmiştir.

Toplam sistem yükü, belirli bir senaryo kapsamında azaltılmış ve bu azalma $t = 7$ anında uygulanmıştır. Bu azalmayı takiben mp_{fc} katsayısı daha da düşürülerek batarya sisteminin güç katkısı azaltılmış, yakıt hücresi ise şebekeye daha yüksek güç sağlayan ana kaynak konumuna gelmiştir; bu değişim $t = 7$ ile $t = 8$ aralığında gerçekleşmiştir. Simülasyonun son bölümünde mp_{bat} katsayısı artırılarak batarya sisteminin yüklenme oranı daha da düşürülmüştür; bu durum $t = 9$ ile $t = 10$ arasında uygulanmıştır. Böylece, aktif güç paylaşımı üzerindeki droop katsayısı etkisi açıkça ortaya konmuştur.

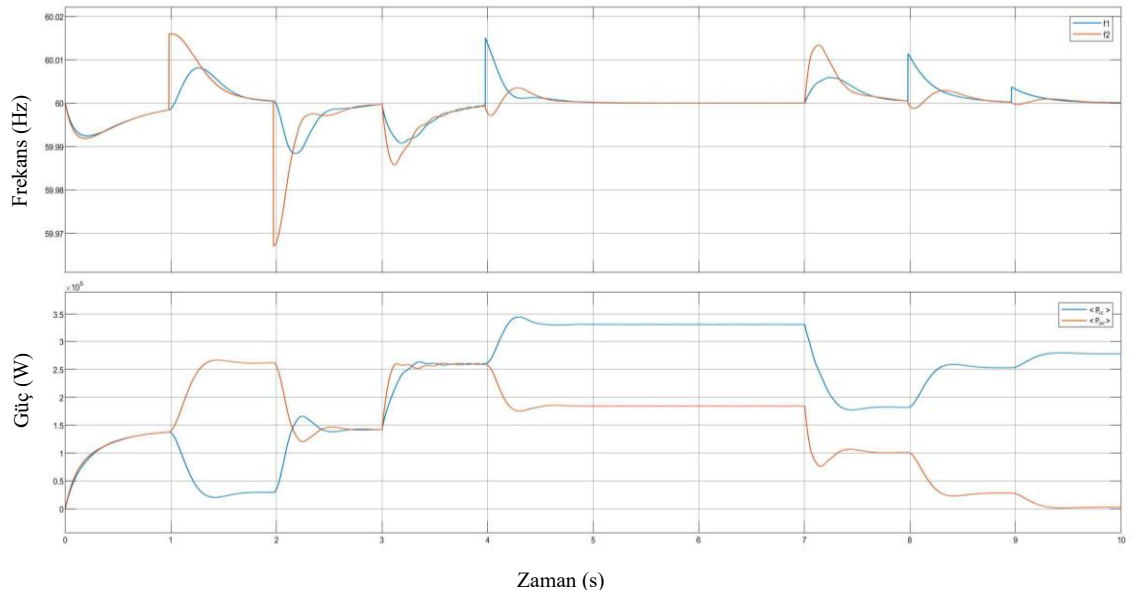


Şekil 7.19: Batarya ve yakıt hücresi paralel çalışma modeli.

Bu çalışma ile, GFM modunda çalışan batarya ve yakıt hücresi sistemlerinin mp katsayılarının değiştirilmesiyle güç paylaşımının nasıl yönlendirilebileceği gösterilmiştir. Simülasyon çıktıları, sistemin toplam gücünü dinamik olarak taşıyan bu iki kaynağın, droop kontrolüyle kararlı biçimde çalışabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle yakıt hücresi sisteminin belirli koşullarda ana yük sağlayıcısı konumuna getirilebildiği gösterilmiştir.



Şekil 7.20: Batarya ve yakıt hücresi arasında güç paylaşımı simülasyon sonucu.



Şekil 7.21: Batarya ve yakıt hücresi güç paylaşımı frekans değişimi simülasyon sonucu.

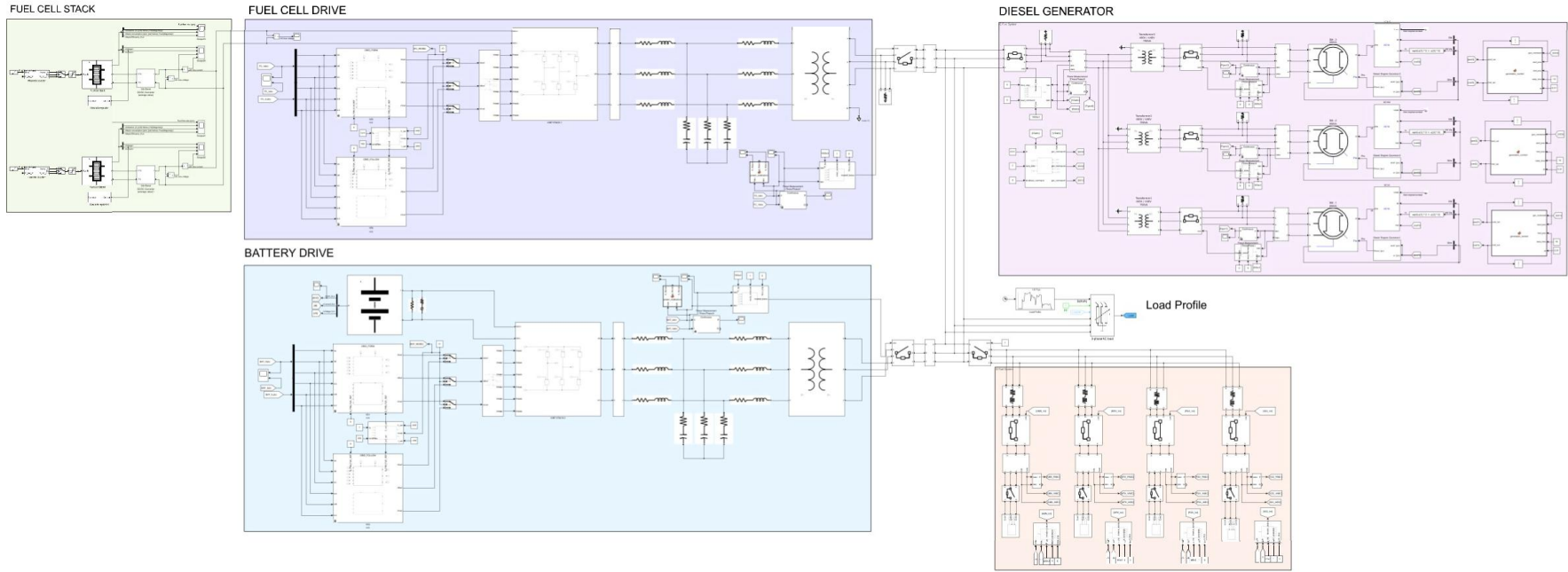
Bu modelleme çalışması, hibrit sistemlerde batarya ve yakıt hücresinin senkronize biçimde güç paylaşımındaki davranışlarını ortaya koymak ve sıfır emisyon modunda, geminin yük analizine dayalı operasyon senaryolarına karşı sistemin tepkisini değerlendirmek açısından önem arz etmektedir.

7.4.2. Batarya, yakıt hücresi ve dizel jeneratör sistemi yük paylaşımı

MATLAB®/Simulink ortamında oluşturulan güç sistemi modeli, batarya, yakıt hücresi ve dizel jeneratör sistemlerinin paralel çalışma koşullarında yük paylaşım dinamiklerini analiz etmek amacıyla yapılandırılmıştır. Şekil 7.22’de gösterilen modelde, her üç enerji kaynağı ortak bir AA baraya bağlanmış ve farklı yük değişimlerine karşı birlikte çalışacak şekilde senaryolaştırılmıştır. Bu yapı, bir dizel jeneratörün aktif olduğu durumda, sistemin diğer kaynakları olan batarya ve yakıt hücresinin güç katkısını değerlendirmek üzere kurgulanmıştır.

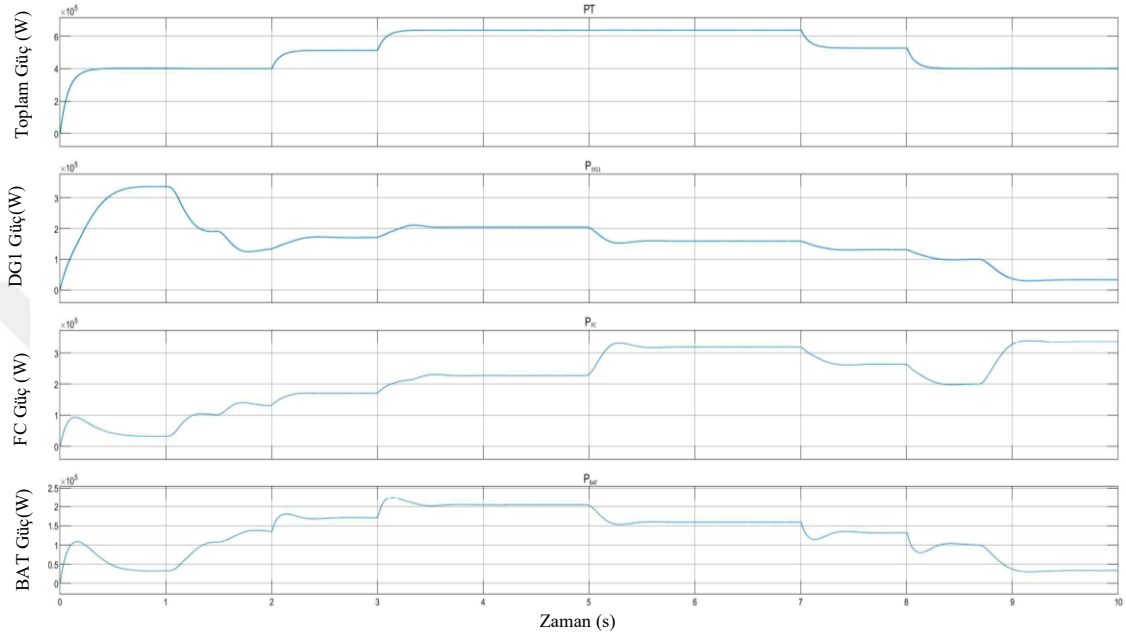
Modelde, genel bir yük profiline dayalı değişken güç talebi uygulanmıştır. Simülasyonda, sabit bir operasyon moduna bağlı kalmaksızın dizel jeneratör, yakıt hücresi ve batarya sistemlerinin geçici ve sürekli yük değişimlerine verdikleri tepkileri droop kontrollü güç paylaşımı kapsamında incelemektir. Sistemde kullanılan droop eğrilerine karşılık gelen mp_{dg} , mp_{fc} ve mp_{bat} katsayıları üzerinden aktif güç dağılımı dinamik olarak yönlendirilmiştir. Simülasyon çıktıları Şekil 7.23’te sunulmaktadır.

Başlangıç koşullarında, mp_{dg} değeri diğer iki kaynağa göre daha düşük seviyede tanımlanmış ve bu nedenle dizel jeneratör sistemi başlangıçta daha yüksek güç sağlamaktadır. $t = 1$ ile $t = 2$ zaman aralığında, mp_{fc} ve mp_{bat} katsayıları kademeli olarak azaltılmış ve bu ayarlamalar sonucunda sistem yükünün önemli bir bölümü P_{FC} ve P_{BAT} üzerine aktarılmıştır. Takip eden $t = 2-3$ aralığında, toplam güç talebi artırılmış ve tüm kaynaklar yükselen yük profiline uyum sağlayacak şekilde çalışmıştır. Sistemin $t = 5$ ile $t = 6$ zaman aralığında, mp_{fc} katsayısı daha da düşürülerek yakıt hücresi üzerindeki yüklenme oranı yükseltilmiştir. Bu değişim, güç paylaşımında yakıt hücresinin daha baskın hâle geldiğini göstermektedir. Son olarak, $t = 7$ ile $t = 8$ arasında toplam güç azaltılmış ve bu azalmayı takiben mp_{bat} ve mp_{dg} değerleri artırılmıştır. Bu ayarlama sonucunda, sistemin kalan yükünü taşıyan yakıt hücresi sisteminin güç faktörü yükselmiştir.



Şekil 7.22: Batarya ve yakıt hücresi ve dizel jeneratör paralel çalışma modeli.

Bu senaryo, droop kontrolü temelinde çalışan çok kaynaklı bir sistemde, mp katsayıları aracılığıyla aktif güç paylaşımının nasıl yönlendirilebileceğini göstermektedir. Özellikle farklı zaman dilimlerinde yapılan mp ayarlarının, yükün hangi kaynak tarafından karşılanacağını belirlediği açık biçimde ortaya konmuştur.



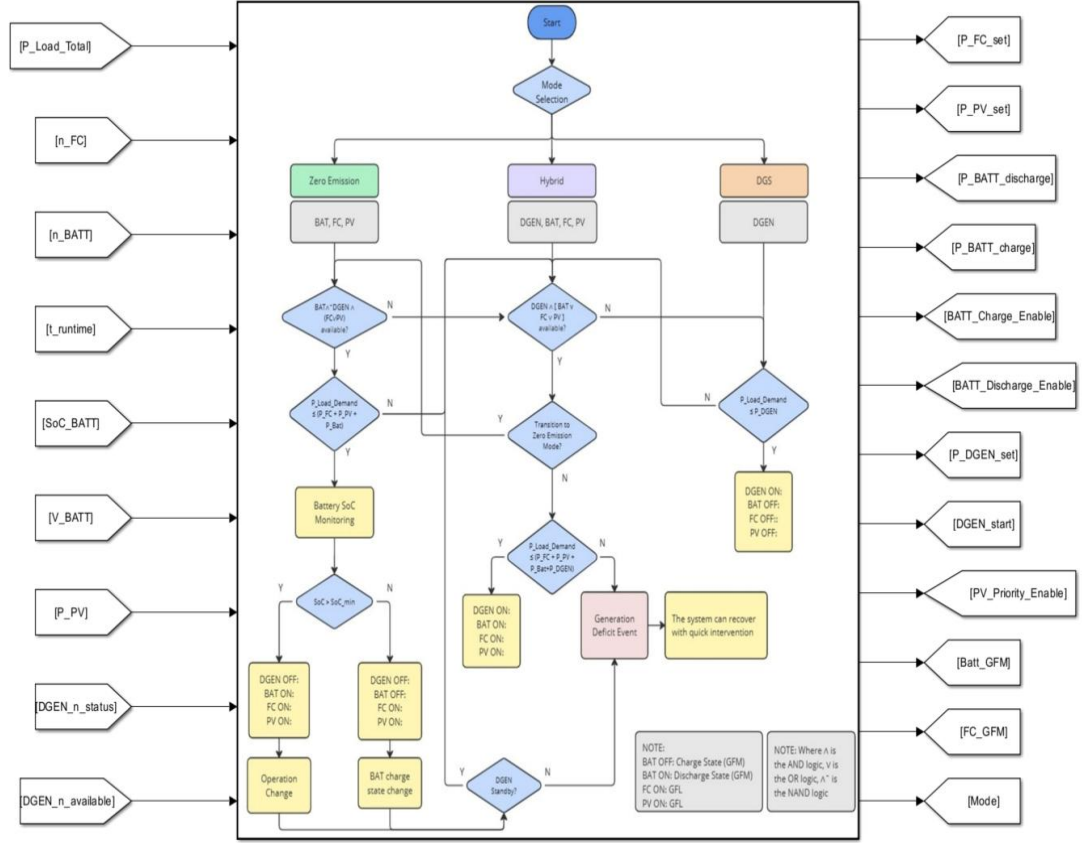
Şekil 7.23: Dizel jeneratör, batarya ve yakıt hücresi arasında güç paylaşımı simülasyon sonucu.

Bu modelleme çalışması, hibrit sistemlerde dizel jeneratör, batarya ve yakıt hücresinin senkronize biçimde güç paylaşımındaki davranışlarını ortaya koymak ve hibrit çalışma modunda, geminin yük analizine dayalı operasyon senaryolarına karşı sistemin tepkisini değerlendirmek açısından önem arz etmektedir.

7.5. Hibrit Sistem EMS Modeli

Geliştirilen enerji yönetim sistemi, AA baralı hibrit gemi güç sisteminde batarya, yakıt hücresi, güneş paneli ve dizel jeneratör gibi çoklu enerji kaynaklarının optimize biçimde yönetilmesini amaçlayan bir kontrol yapısıdır. Sistem; toplam yük talebi, batarya doluluk oranı, PV üretim gücü, yakıt hücresi ve batarya verimi ile dizel jeneratörlerin çalışma durumu gibi değişkenleri gerçek zamanlı olarak izlemekte ve buna göre enerji kaynaklarının hangi sırayla ve hangi modda devreye alınacağını belirlemektedir. EMS_step fonksiyonu olarak kodlanan yapı, bu kontrol mekanizmasının temel

algoritmasını oluşturmaktadır. EMS_step fonksiyonun temel yapısı Şekil 7.24'te gösterilmekte olup, algoritmanın temel yapısı ise Ek-A'da sunulmuştur.



Şekil 7.24: Hibrit sistem EMS modeli.

Kontrol sistemi üç ana işletim modunu kapsamaktadır: sıfır emisyon modu, hibrit mod ve dizel jeneratör tedarik modu. Sıfır emisyon modunda, batarya GFM modda çalışmakta, yakıt hücresi ise başlangıçta GFL modda devreye alınmakta ve tanımlı bir gecikme süresinin ardından GFM moda geçerek batarya ile birlikte droop kontrollü güç paylaşımına katılmaktadır. Bu modda, dizel jeneratörler üretim yetersizliği veya kararlılık kaybı gibi olağanüstü durumlarda geçici olarak devreye alınmakta ve yük dengelemesi sağlandığında yeniden devreden çıkarılmaktadır. Hibrit modda, sistem referansını dizel jeneratörler sağlamakta, batarya ve yakıt hücresi ise GFL modda dizel jeneratörle senkronize biçimde çalışmakta ve yük paylaşımına katılmaktadır. DGS modunda ise tüm yük yalnızca dizel jeneratörlerle karşılanmaktadır.

EMS'in karar yapısı, giriş olarak alınan parametrelere bağlı şekilde her bir kaynak için güç referansları üretmekte ve çalışma modlarını belirleyen kontrol sinyallerini oluşturmaktadır. Fonksiyon çıktıları arasında batarya ve yakıt hücresi için aktif güç komutları (P_BATT_discharge, P_FC_set), bataryanın şarj ve deşarj durumlarını belirleyen işaretler (BATT_Charge_Enable, BATT_Discharge_Enable), dizel jeneratör güç referansları (P_DGEN_set), başlatma komutları (DGEN_start) ve GFM/GFL durum göstergeleri (Batt_GFM, FC_GFM) yer almaktadır. Bu sayede EMS, sistemdeki tüm kaynakların hem devreye alma sırasını hem de yük paylaşım düzeyini anlık olarak yönetebilmekte ve şebeke kararlılığına doğrudan etki eden frekans ile gerilim referansını gerektiğinde GFM kaynaklar üzerinden yeniden tanımlayabilmektedir.

Tanımlanan bu kontrol mantığı doğrultusunda oluşturulan modelde, farklı operasyon senaryoları ele alınmış; yük profiline göre enerji kaynaklarının nasıl devreye alındığı, geçişlerin nasıl yönetildiği ve GFM/GFL modlar arasında senkronizasyonun nasıl sağlandığı analiz edilmiştir. PV üretimi, yalnızca destekleyici rol oynamakta olup, sistemin esas enerji yönetimi batarya ve yakıt hücresi üzerinden gerçekleştirilmektedir. Yakıt hücresi başlangıçta GFL modda çalışmakta, uygun sistem koşullarının sağlanmasıyla birlikte GFM moda geçerek batarya ile birlikte alternatif akım barasının referans gerilim ve frekansını belirlemektedir. Geliştirilen kontrol stratejisi, dizel jeneratör bağımlılığını azaltmak, enerji verimliliğini artırmak ve sistemin kararlı şekilde kesintisiz çalışmasını sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Bu sayede, kontrol algoritması hem operasyonel güvenilirliği hem de sürdürülebilirlik hedeflerini destekleyecek şekilde çalışabilmektedir.

7.6. Operasyon Profilleri Simülasyonu

Bu bölümde, Şekil 7.1’de gösterilen tüm MATLAB®/Simulink modeli kapsamında, kuru yük gemisinin temel operasyon senaryolarında enerji sistemlerinin nasıl çalıştığı ortaya konmuştur. Şekil 7.25’te sunulan yapı, MATLAB®/Simulink ortamında geliştirilen hibrit güç sistemi modelinin yük tarafını temsil etmektedir. Modelde yer alan yükler, E-yakıt sistemine ait ekipmanlardan oluşmaktadır. Bu kapsamda, ilgili yükler referans alınarak sistem düzeyinde simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

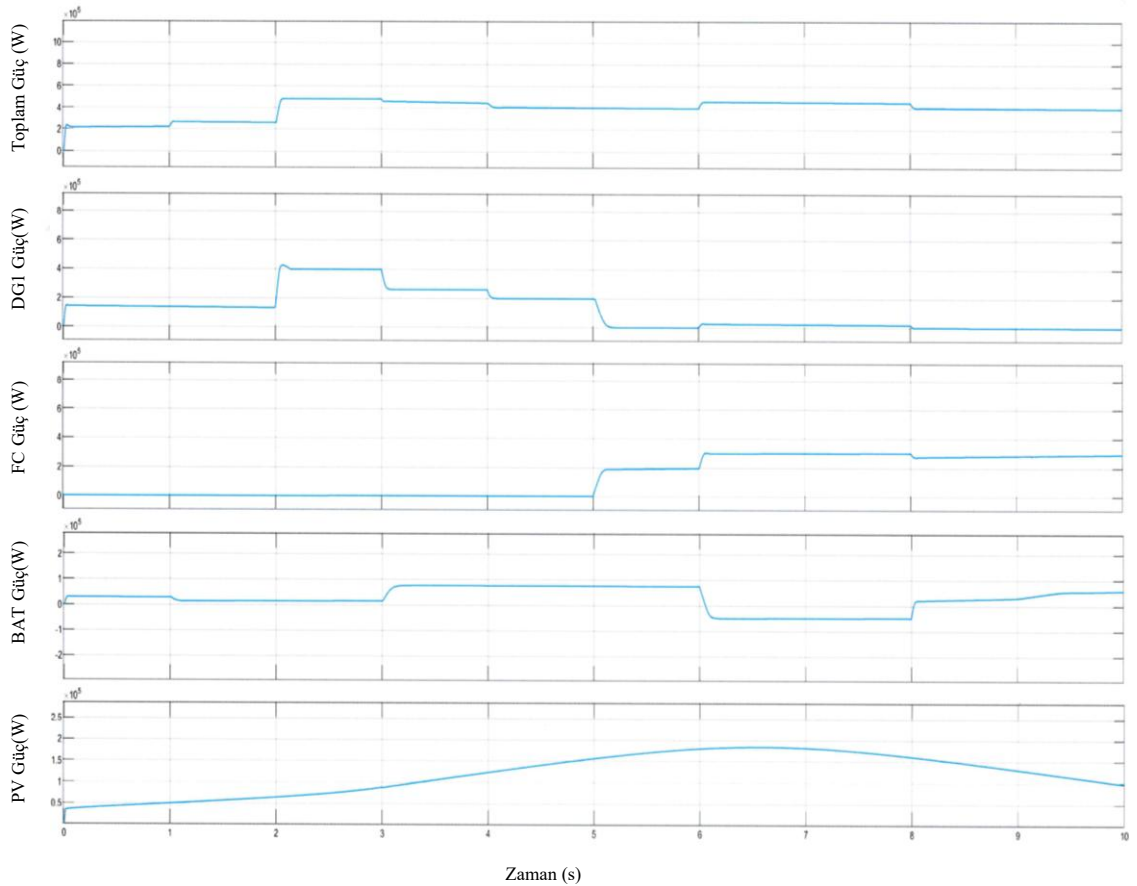
Yakıt sisteminin hazırlık aşaması, amonyak parçalama ve metanol reformasyon süreçleriyle başlayıp hidrojenin üretilip saflaştırılarak yakıt hücresi sistemine aktarılmasına kadar olan süreci kapsamaktadır. Bu hazırlık süreci yaklaşık üç saat sürmekte olup, bu süre sonunda sistem, uygun basınçta sürekli hidrojen üretimini sağlayacak şekilde çalışmaktadır.

Simülasyon kapsamında, yakıt sistemine ait enerji ihtiyacı ile üzerine çalışılan kuru yük gemisinin operasyonel yük profili baz alınarak çeşitli senaryolar değerlendirilmiştir. Tez kapsamında hazırlanan yazılım aracılığıyla yürütülen bu senaryolar, sistemdeki yüklerin farklı operasyon koşullarında nasıl paylaştırıldığı, hangi enerji kaynaklarının hangi durumlarda devreye alındığı ve yük altındaki güç paylaşım dengeleri analiz edilmiştir.

MATLAB®/Simulink modeli üzerinden farklı operasyon profilleri için yazılım çalıştırılarak, yeni sistemlerin devreye alınma süreçleri gözlemlenmiş ve bu profillere uygun şekilde sistemin genel davranışı değerlendirilmiştir. Elde edilen çıktılar doğrultusunda enerji yönetim sisteminin senaryo bazlı performansı analiz edilmiş, yük paylaşımı ve kaynak geçiş stratejileri simülasyon sonuçlarıyla birlikte ortaya konmuştur.

7.6.1. Demirleme operasyonu

Bu operasyonda DG1 dizel jeneratörü, yakıt hücresi, batarya sistemi ve PV sisteminin zamana bağlı güç çıkışları analiz edilmiştir. Simülasyon, hibrit moddan sıfır emisyon moduna geçişi temsil etmekte ve özellikle e-yakıt sisteminin devreye alınma sürecini incelemeye yöneliktir. Demirleme operasyonu, yük ihtiyacının düşük ve kararlı olması nedeniyle yeni sistemlerin test edilmesi açısından ideal bir senaryo sunmaktadır. Bu nedenle, yakıt hücresi ve e-yakıt sistemleri ilk olarak bu operasyon koşullarında devreye alınmaktadır. Gemi, daha yüksek güç gereksinimi olan operasyonlara geçmeden önce, e-yakıt sisteminin devreye alınması ve yakıt hücresi sisteminin şebekeye bağlanması açısından bu durum en uygun zaman olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda elde edilen simülasyon çıktıları Şekil 7.26’da sunulmaktadır.



Şekil 7.26: Demirleme operasyonu simülasyon sonucu.

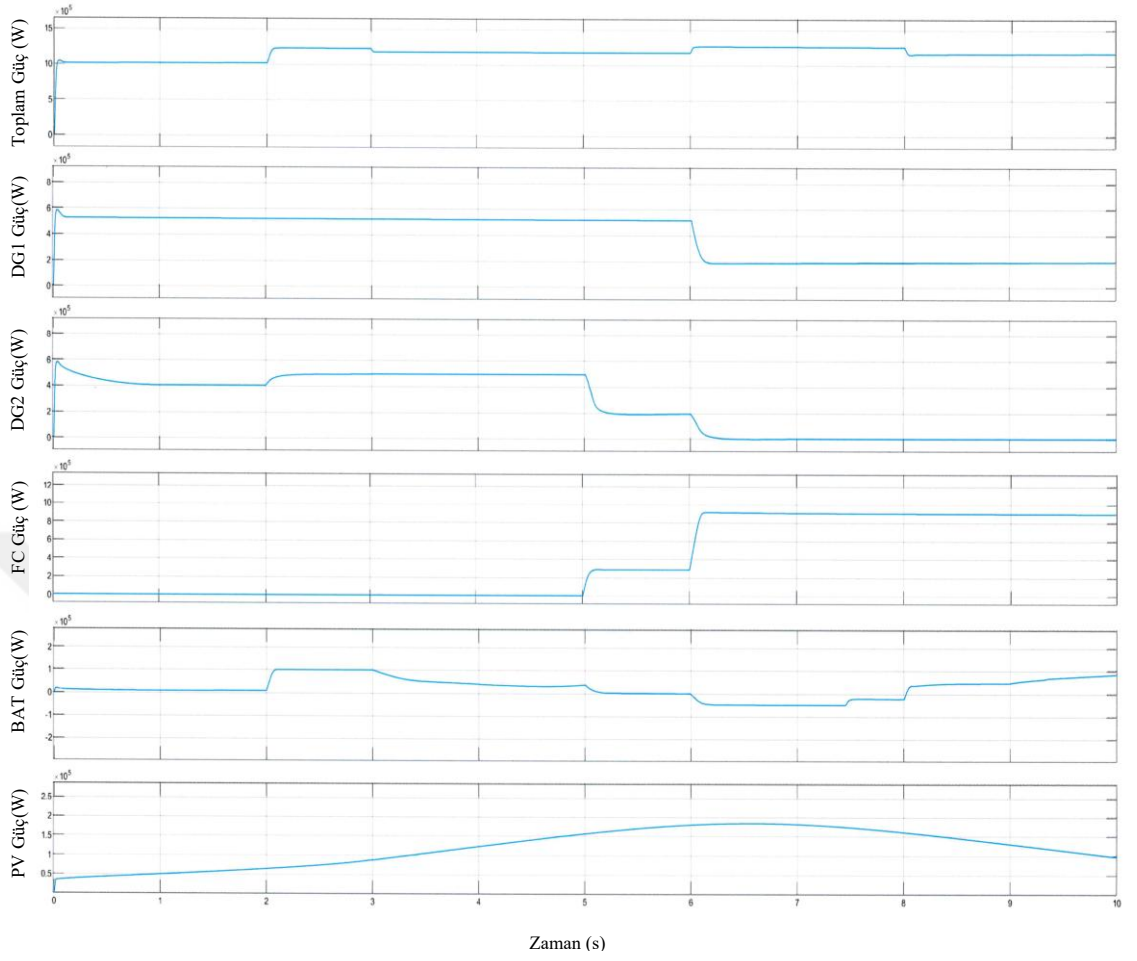
Simülasyonda, $t = 0$ ile $t = 2$ arasındaki zaman aralığında sistem, DG1, batarya ve PV kaynakları ile işletilmiştir. Bu zaman diliminde batarya, yük dengeleme işlevini

üstlenmiş; PV sistemi ise mevcut üretimiyle şebekeye destek vermiştir. E-yakıt sisteminin hazırlık süreci $t = 2$ anında başlatılmış ve $t = 5$ anına kadar devam etmiştir. Bu süre zarfında yükün büyük bölümü DG1 tarafından karşılanmış, batarya ve PV sistemleri ise belirli ölçüde katkı sağlamıştır. Hazırlık sürecinin tamamlanmasına yakın, batarya sisteminde güç faktöründe artış gösterilmiştir. Sürecin sona ermesiyle birlikte, yakıt hücresi sistemi $t = 5$ anında devreye alınmış ve GFL modda çalışarak DG1 üzerindeki yükü paylaşmaya başlamıştır. Böylece dizel jeneratör bekleme konumuna geçirilmiştir. Bu geçiş sürecinde, batarya sistemi SoC seviyesine bağlı olarak $t = 3$ ile $t = 6$ aralığında deşarj modunda çalışmış ve şebekeye güç sağlamıştır. SoC sınır değerine ulaşıldığında, batarya $t = 6$ anından itibaren şarj moduna geçmiştir. Bu geçiş, şebeke kararlılığı açısından kritik öneme sahip olmuş ve bu nedenle düşük yük oranıyla DG1 tekrar devreye alınarak sistemin dengesine katkı sağlamıştır.

Yükün büyük bir bölümü yakıt hücresi tarafından karşılanmakta ve batarya 8. saniyede tekrar deşarj moduna geçerek yük dengeleme işlevini üstlenmeye devam etmektedir. Şebeke üretim-tüketim dengesi sağlandığında dizel jeneratör tamamen devreden çıkarılmakta ve sistem sıfır emisyon moduna geçişi tamamlamaktadır. PV sisteminin bu süreç boyunca artan üretimi, özellikle batarya şarj sürecinde destekleyici bir rol oynamakta ve sistemin genel stabilitesine katkı sağlamaktadır.

7.6.2. BWTS sistemi olmadan kargo operasyonu

Bu operasyonda, DG1 ve DG2 dizel jeneratörleri, yakıt hücresi, batarya sistemi ve PV sisteminin zamana bağlı güç çıkışları analiz edilmiştir. Özellikle güç faktörünün yüksek olduğu operasyonlarda, e-yakıt sisteminin demirleme sırasında hazırlanması ve ardından daha zorlu senaryolara geçilmesi daha makul bir yaklaşım olarak değerlendirilse de, bu simülasyonda sistemin ani yük değişimlerine verdiği tepkiyi göstermek amacıyla e-yakıt sistemi aktif bir operasyon esnasında devreye alınmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon, yük profilinin hızlı değiştiği koşullarda sistemin kararlılığını ve enerji kaynakları arasındaki geçiş süreçlerini incelemeye yöneliktir. Bu kapsamda elde edilen simülasyon çıktıları Şekil 7.27’de sunulmaktadır.



Şekil 7.27: BWTS sistemi olmadan kargo operasyonu simülasyonu sonucu.

E-yakıt sisteminin hazırlık süreci $t = 2$ anında başlatılmış ve $t = 5$ anına kadar devam etmiştir. Bu hazırlık aşamasında, DG1 ve DG2 jeneratörleri yükün büyük bir bölümünü karşılamıştır. Batarya sistemi, bu geçiş sürecinde ani yük değişimlerini dengelemek ve sistem kararlılığını desteklemek amacıyla devrede kalmıştır. Aynı zamanda, PV sisteminden elde edilen güç ısıtım seviyelerine bağlı olarak güç üretimine katkı sağlamış ve üretimi doğrudan belirleyici olmamakla birlikte sistem genelinde destekleyici bir etki oluşturmuştur.

Hazırlık aşamasının sonlarına doğru, batarya sisteminin yük faktöründe artış gösterilmiştir. Bu durum, bataryanın geçici yük dengeleme görevini üstlendiğini ve yakıt hücresi senkronizasyon sürecinde kritik bir rol oynadığını göstermiştir. Yakıt hücresi sistemi, $t = 5$ anında devreye alınarak DG2 üzerindeki yükü kademeli olarak üstlenmeye başlamıştır. Bu geçiş sürecinde, DG2'nin yükü giderek azalmış ve jeneratör sistemden

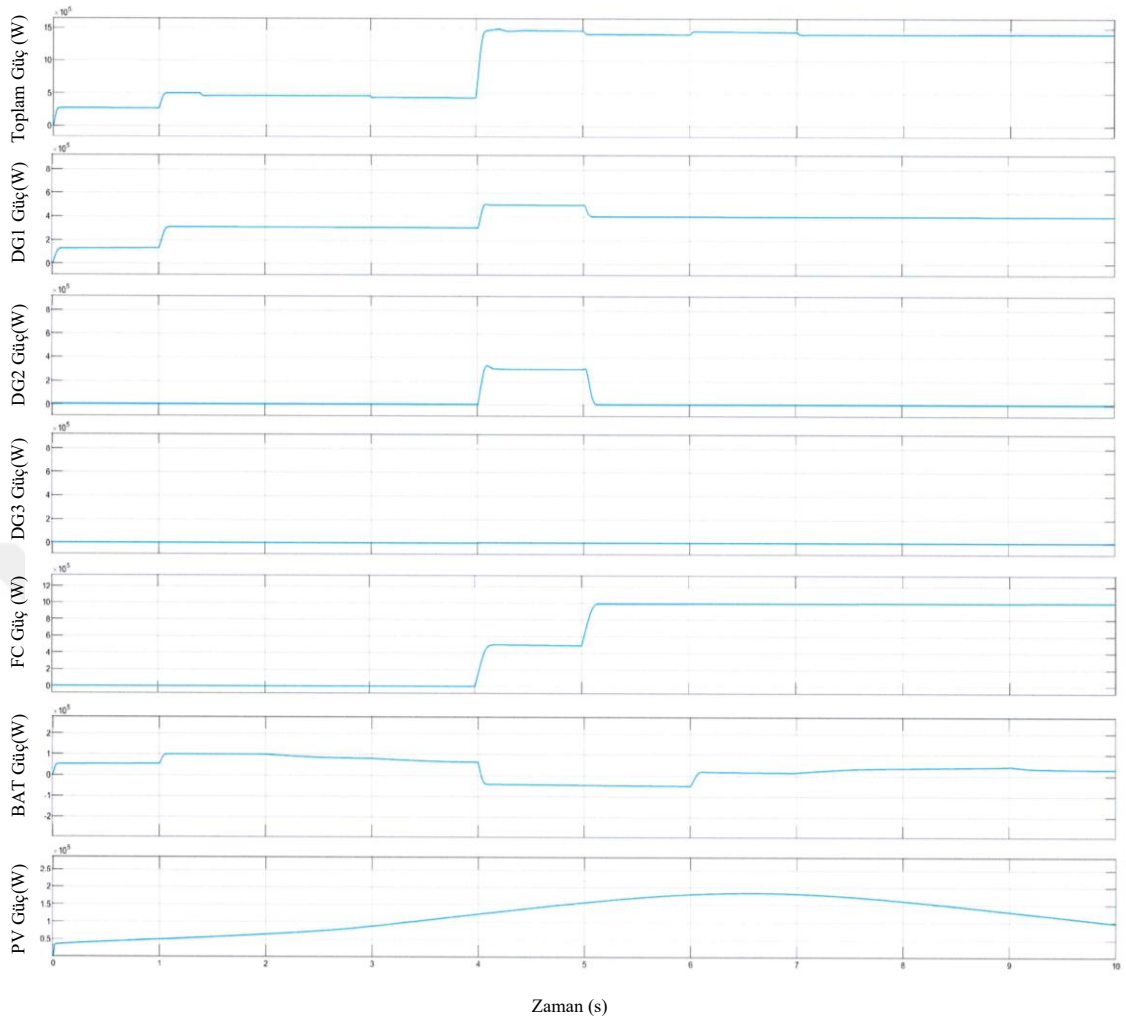
çekilerek bekleme moduna alınmıştır. Aynı anda, yakıt hücresi sisteminin yük faktörü artmış ve DG2'nin yükünü tamamen devralmıştır. Aynı süreçte, DG1 üzerindeki yük de azalmış ve sistem, daha düşük bir yüklenme seviyesinde DG1 ile çalışmaya devam etmiştir. Bu yapı sayesinde, yakıt hücresi üzerindeki yük faktörü yaklaşık %90 seviyelerine ulaşmış ve sistemin ana yük sağlayıcısı konumuna geçmiştir. Batarya sisteminin ise bu aşamada, şarj ve deşarj geçişlerine bağlı olarak sistemde dengeleme işlevini sürdürdüğü görülmektedir.

Bu senaryo, yakıt hücresi sisteminin yük devralma sürecini, bataryanın yük dengeleme kabiliyetini ve PV sisteminin sınırlı da olsa destekleyici rolünü göstermesi açısından önemlidir. Ayrıca, DG1 ve DG2 jeneratörlerinin yük paylaşımı ile geri çekilme stratejileri doğrultusunda, sistemin genel esnekliği ve geçiş kararlılığı da ortaya konmuştur.

7.6.3. BWTS sistemi ile kargo operasyonu

BWTS ile birlikte yürütülen kargo operasyonlarında, yük faktörü oldukça yüksek olup normal çalışma koşullarında üç dizel jeneratörün eş zamanlı olarak devrede bulunması gerekmektedir. Bu senaryoda, dizel jeneratörlerden birinin kullanımının azaltılabileceği gösterilmek istenmiştir. Şekil 7.28'de sunulan simülasyon, gemi bekleme (demirleme) modundayken e-yakıt sisteminin devreye alınmasıyla başlamaktadır.

Yakıt hücresi sistemi şebekeye bağlanmaya hazır hâle geldiğinde, BWTS ile birlikte kargo operasyonları da aktif hâle getirilmiş ve bu koşullar altında yük paylaşımı analiz edilmiştir. Toplam güç grafiğinden de görülebileceği üzere, e-yakıt sisteminin hazırlık aşaması $t = 1$ anında başlatılmıştır. Bu süreçte, DG1 üzerindeki yük faktörünün düşük tutulması hedeflenmiş ve batarya sisteminin yeterli SoC seviyesine sahip olması nedeniyle sistem yükünün büyük bir bölümü batarya üzerinden karşılanmıştır. PV sisteminden elde edilen güç de bu süreçte destekleyici bir rol üstlenmiş ve DG1 üzerindeki yük minimum seviyede tutulmuştur. Hazırlık sürecinde şebeke stabilitesi, batarya ve dizel jeneratör tarafından sağlanmıştır.



Şekil 7.28: BWTS ile kargo operasyonu simülasyon sonucu.

Yakıt hücresi sistemi şebekeye bağlanabilecek duruma ulaştığında, $t = 4$ anında BWTS ile kargo işlemleri başlatılmıştır. Bu aşamada, yükte ani bir artış meydana gelmiş ve yakıt hücresi sisteminin yük faktöründe artış gösterilmiştir. Aynı zamanda, DG1 üzerindeki yük artmış ve şebekeye destek sağlamak amacıyla DG2 devreye alınmıştır. DG2'nin devreye girmesiyle birlikte batarya sistemi şarj moduna geçmiştir. DG2'nin devreye alınmasının temel amacı, ani yük artışına karşı sistemin kararlılığını sağlamak ve yakıt hücresi sisteminin yük altında istikrarlı biçimde çalışmasını temin etmek olmuştur.

Yakıt hücresi sisteminin daha fazla yük taşıyabilecek duruma getirilmesiyle birlikte, $t = 5$ anında sistem üzerindeki yük dengelenmiş ve DG2 tekrar devreden çıkarılmıştır. Yakıt hücresi maksimum kapasitesinde çalıştırılabildiği için DG1 üzerindeki yük faktörü de azaltılmıştır. Operasyonun kalan süresinde, BWTS ve kargo faaliyetleri devam ederken

yakıt hücresi sistemi maksimum güç seviyesinde çalışmaya devam etmiştir. DG1 aktif durumda kalmış, batarya sistemi ise yük dengeleme işlevini sürdürmüştür. Bataryanın SoC seviyesine bağlı olarak şarj ve deşarj modları arasında geçiş yaptığı gösterilmiştir. PV sisteminden elde edilen gücün, yük faktörüne katkı sağladığı ve bu yönüyle destekleyici bir işlev üstlendiği de ortaya konmuştur.

Bu operasyon senaryosu ile, normalde üç dizel jeneratörün aktif olarak çalıştığı bir durumda yalnızca iki jeneratörün kullanılmasıyla sistemin sürdürülebilir şekilde işletilebildiği gösterilmiştir. Benzer bir senaryo, BWTS devrede olmadan yalnızca kargo operasyonu için de uygulanabilir. Ancak bu durumda da yük faktörünün yüksek olması nedeniyle hibrit çalışma modu daha uygun olmakta ve sıfır emisyon moduna geçiş mümkün olamamaktadır.

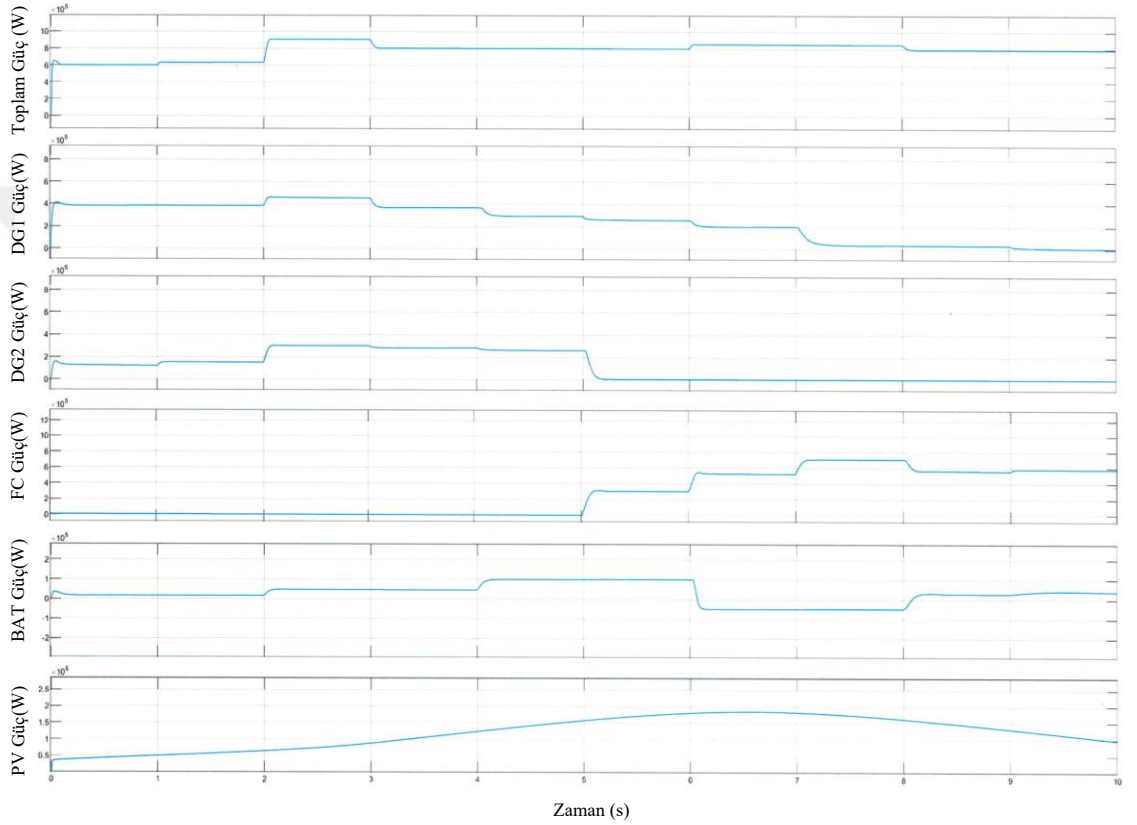
7.6.4. Limandan ayrılma ve limana varma operasyonları

Bu senaryo, limandan ayrılma ve limana varma operasyonları sırasında değerlendirilen bir geçiş durumu olarak kurgulanmıştır. Uluslararası regülasyonlar kapsamında, amonyak, metanol ve hidrojen gibi e-yakıtların liman sınırları içerisinde kullanımına yönelik çeşitli kısıtlamalar bulunduğundan, demirleme operasyonlarında e-yakıt sistemlerinin devreye alınması uygun bir yöntem olarak değerlendirilmemiştir. Bu nedenle, simülasyonda e-yakıt sisteminin limana yaklaşma veya ayrılma esnasında, mevzuata uygun bir konumda ve seyir hâlindeyken devreye alınması kurgulanmıştır. Bu kapsamda elde edilen simülasyon çıktıları Şekil 7.29'da sunulmuştur.

Gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarına göre, e-yakıt sisteminin devreye alınma süreci boyunca yakıt hücresi sisteminin yük faktöründe artış sağlanmış ve bu sayede dizel jeneratörlerin yükü azaltılmıştır. Simülasyonda, e-yakıt sisteminin hazırlık süreci $t = 2$ anında başlatılmış ve $t = 5$ anında sistemin hazır hâle gelmesiyle birlikte yakıt hücresi sistemi devreye alınmıştır. Hazırlık aşaması boyunca DG1 ve DG2 üzerindeki yük faktörleri grafiklerde gösterilmiştir.

Yakıt hücresi sisteminin yük taşıma kapasitesinin artmasıyla birlikte, $t = 6$ anında batarya sistemi şarj moduna geçmiştir. Bu durumda, yakıt hücresinin yük faktörünün daha da arttığı gösterilmiştir. Aynı anda, yakıt hücresi sisteminin devreye alınmasıyla birlikte DG2'nin yük faktörü azaltılmış ve $t = 6$ anında jeneratör bekleme moduna alınmıştır.

DG1, düşük yük faktörüyle şebekeye bağlı şekilde çalışmaya devam etmiş ve aktif konumunu korumuştur. Batarya sisteminin şarj moduna geçtiği bu aşamada, $t = 8$ anında DG1'in sistemde aktif olarak bulunması şebeke kararlılığının korunmasına olanak sağlamıştır. Bu senaryoda GFM rolü, şarj konumunda olmayan yakıt hücresi sistemi tarafından üstlenilmiş ve gerekli gerilim-frekans referansı bu kaynak üzerinden sağlanmıştır.

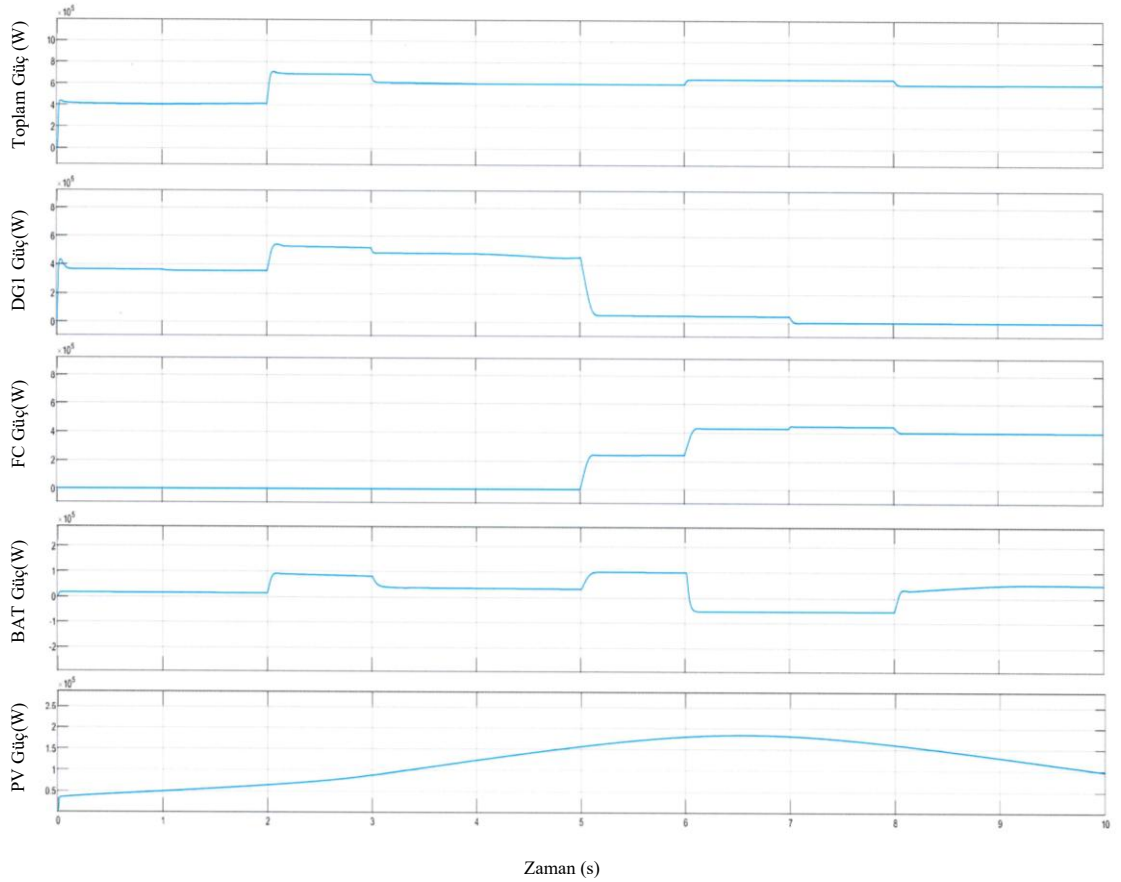


Şekil 7.29: Limandan ayrılma/varma operasyonu simülasyonu sonucu.

Bu aşamada, $t = 9$ anında DG1'in bekleme pozisyonuna alınmasıyla birlikte sistem, hibrit moddan sıfır emisyon moduna geçiş yapmıştır. Şebeke stabil hale geldikten sonra, yakıt hücresi sistemi GFM rolünü üstlenmiş ve batarya sistemiyle arasında yük paylaşımı gerçekleştirilmiştir. Böylece sistem, regülasyonlara uygun biçimde sıfır emisyon modunda çalışabilecek bir esnekliğe ulaşmıştır.

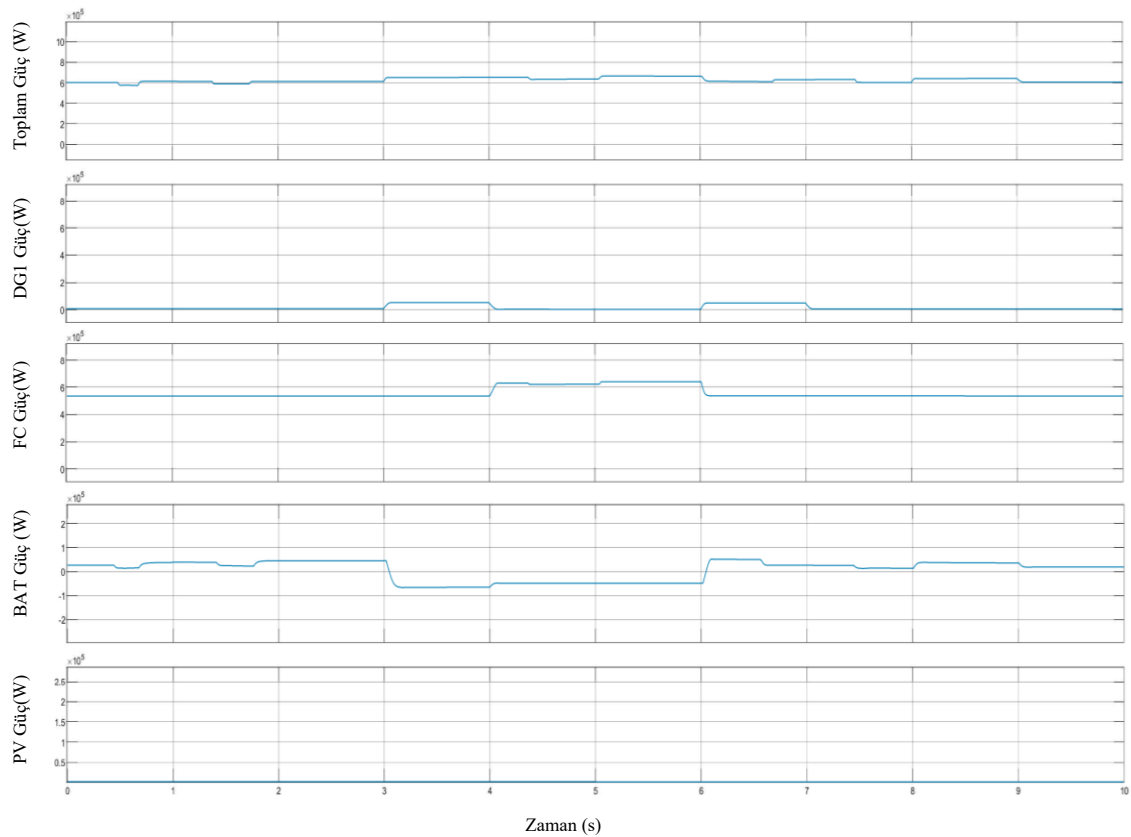
7.6.5. Normal seyir operasyonu

Normal seyir operasyonu, sıfır emisyon modunun en uzun süreyle kullanılabildiği ve sistemin asıl çalışma mantığının uygulanmasının beklendiği operasyon türü olarak değerlendirilmiştir. Bu nedenle, önceki bölümlerde açıklanan geçiş stratejileri kapsamında, hibrit mod ile sıfır emisyon modu arasındaki geçişleri temsil eden simülasyon sonuçlarına bu bölümde yer verilmiştir. Normal seyir, e-yakıt sisteminin ve yakıt hücresi modülünün devreye alınması açısından en verimli ve anlamlı operasyon senaryosu olarak değerlendirilmiştir. Bu operasyonlarda, gemideki toplam yük güç faktörü açısından dengeli olduğundan, demirleme dışındaki diğer operasyonlara kıyasla ani yük değişimleri daha az gerçekleşmiş ve sistem daha stabil çalışabilmiştir. Seyir operasyonunun süresi uzun olduğundan, 10 günlük örnek bir operasyon süreci için güneş panellerine yönelik olarak yeterli ışıının bulunduğu ve bulunmadığı senaryolar ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Şekil 7.30'da, diğer operasyonlarla benzer şekilde e-yakıt sisteminin hazırlık süreci sunulmuştur.



Şekil 7.30: Normal seyir operasyonu başlangıç simülasyon sonucu.

Hazırlık aşaması $t = 2$ anında başlatılmıştır. Yakıt hücresi sistemi $t = 5$ anında devreye alınmış ve bu noktada dizel jeneratörlerin yük faktörleri azaltılmıştır. Batarya sistemi bu süreçte yük dengeleme işleviyle aktif olarak çalışmaktadır. Operasyonun $t = 6$ anında batarya şarj moduna geçmiş, DG1 ise minimum yük faktörüyle şebekeye bağlı şekilde aktif durumda kalmıştır. Batarya deşarj moduna geçtiğinde GFM modunda çalışır hâle gelmiş ve şebeke kararlılığı sağlandıktan sonra DG1, $t = 7$ anında bekleme moduna alınmıştır. Bu durumda yükün büyük bölümü yakıt hücresi tarafından karşılanmıştır. Bataryanın şarjdan deşarja geçişi, sistem kararlılığına bağlıdır. Bu koşullar altında, yakıt hücresi sistemi GFM modunda çalışmakta; böylece bataryanın deşarjına izin verecek referans gerilim ve frekans sağlanmaktadır. Batarya, $t = 8$ anında deşarj moduna geçmiş ve düşük yük faktöründe dengeleme görevini üstlenmiştir. Yakıt hücresi, $t = 9$ anından itibaren GFM moduna geçmiş ve batarya ile arasında yük paylaşımı gerçekleştirilmiştir. Başlangıç senaryosunda güneş ışınımının yeterli düzeyde olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle PV sisteminin şebekeye katkı sağladığı gösterilmiş, bu katkının diğer enerji kaynaklarının yük faktörleri üzerinde etkileri ortaya konmuştur.



Şekil 7.31: Normal seyir operasyonu simülasyon sonucu.

Şekil 7.31’de, hazırlık aşamasının tamamlandığı ve yakıt hücresi sisteminin sürekli olarak aktif durumda bulunduğu senaryo sunulmuştur. Güneş ışınımının yetersiz olduğu bu durumda, PV sisteminde enerji üretimi gerçekleşmemiştir ve sistem yalnızca yakıt hücresi ile batarya üzerinden çalıştırılmıştır. Bu operasyonda, yakıt hücresi üzerindeki yük faktörünün mümkün olduğunca sabit tutulması hedeflenmiştir. Bu nedenle, şebekedeki yük değişimlerine batarya sistemi tepki vererek yük dengeleme görevini üstlenmiştir. Bataryanın şarj moduna geçmesi gerektiği anda, $t = 3$ anında, şebeke kararlılığını sağlamak amacıyla DG1 düşük yük faktörüyle devreye alınmıştır. DG1, $t = 4$ anında ise tekrar bekleme moduna geçirilmiştir. Bu geçişler sırasında batarya, şarj olurken dahi GFM modunda çalışmış ve şebekeye referans gerilim ile frekans sağlamıştır. DG1 ise yalnızca geçici olarak kararlılığı desteklemek amacıyla devrede tutulmuştur.

Yakıt hücresi sistemi, $t = 4$ anında şebekede tek güç kaynağı olarak kalabilmektedir. Şebeke kararlılığının sağlanmış olması koşulu ve batarya sisteminin şarj olurken şebeke referansı GFM modunda sağlayabilmesi, bu çalışma şekline destek olmaktadır. Şebeke kararlılığını sürdürebilmek ve ani yük değişimlerine karşı sistem dengesini koruyabilmek için, $t = 6$ anında batarya yeterli SoC seviyesine ulaştığında deşarj moduna tekrar geçebilmekte ve bu durumda DG1 yeniden şebekeye bağlanmaktadır. Batarya deşarj konumunda iken ve şebeke kararlı olduğunda GFM olarak çalışmaya devam edebilmekte, böylece DG1 $t = 7$ anında tekrar devreden çıkarılabilmektedir.

Yakıt hücresi sisteminin kararlılığı sağlandığında, batarya ile paralel çalışarak GFM rolünü üstlenebilmekte ve sistemde esnek bir yük paylaşımı gerçekleştirilebilmektedir. Bu durum, sistemin çevrimsel olarak çalışabileceği bir kontrol döngüsünün oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Söz konusu operasyon, bölüm 5’te sunulan akış diyagramına uygun olarak EMS yapısının kural tabanlı şekilde çalışmasını gerektirmektedir. Bu bölümde, şebeke kararlılığı temel alınmış; bu hedef doğrultusunda yürütülen analizler ve geçiş senaryoları, ilgili simülasyon sonuçlarıyla desteklenmiştir.

BÖLÜM 8. SONUÇLAR

8.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması, konvansiyonel yük gemilerinin çevreci enerji sistemleriyle yeniden yapılandırılması, yani retrofit edilmesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Elkon Elektrik firmasının dahil olduğu Avrupa Birliği destekli GAMMA projesi, bu çalışmaya konu olmuş ve Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi İş Deneyimli Yüksek Lisans Programı kapsamında ele alınmıştır. Çalışma, özellikle Ufuk Avrupa programı ve IMO 2030/2050 hedefleri doğrultusunda fosil yakıt kullanımının azaltılması ve sera gazı emisyonlarının düşürülmesi amacıyla, metanol ve amonyak gibi yenilenebilir kaynaklı e-yakıtların denizcilik sektörüne entegrasyon potansiyelini incelemektedir. Bu alternatif yakıtların fiziksel ve kimyasal karakteristikleri, denizcilik operasyonlarına uygunlukları, çevresel kazanımları ile birlikte; toksisite, yanıcılık ve dönüşüm süreci kaynaklı zorlukları da kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Hidrojen üretimi amacıyla uygulanan metanol reformasyonu ve amonyak parçalanması gibi ön işlemler detaylandırılmış; bu süreçlerde kullanılan reaktörler, katalitik üniteler, ısı değiştiriciler gibi sistem bileşenleri ile PSA ünitesi aracılığıyla gerçekleştirilen saflaştırma adımları analiz edilmiştir. Elde edilen yüksek saflıktaki hidrojenin, proton değişim membranlı yakıt hücresi sistemine beslenerek elektrik enerjisine dönüştürülmesi sayesinde, gemi üzerindeki hotel yüklerinin karşılanması hedeflenmiş ve sistemin bu doğrultudaki teorik uygunluğu ortaya konmuştur.

Çalışmada, e-yakıt üretim sistemi, yakıt hücresi, batarya enerji depolama birimleri ve fotovoltaik panel yapısını içeren hibrit enerji altyapısı yalnızca enerji üretim performansı açısından değil; aynı zamanda güvenlik, kontrol ve izleme işlevleriyle birlikte bütüncül bir yapı içerisinde değerlendirilmiştir. Özellikle metanol ve amonyak gibi toksik ve yanıcı

özelliklere sahip kimyasal yakıtların gemi bünyesine entegre edilebilmesi için gerekli olan güvenlik stratejileri detaylı biçimde tanımlanmış ve bu stratejilere ilişkin akış diyagramları hazırlanmıştır. Bu kapsamda; sıcaklık, basınç, gaz sızıntısı, gaz algılama, batarya SoC ve hücre sıcaklığı gibi kritik parametrelerin gerçek zamanlı izlenmesine yönelik kontrol mantığı yapılandırılmış ve bu verilerin merkezi gözetim sistemine iletimine dair tasarımsal adımlar detaylandırılmıştır. Sistemde meydana gelebilecek olası anomalilerin tespiti durumunda, ilgili koruma mekanizmalarının otomatik olarak devreye girmesini sağlayacak kontrol mantığı kurgulanmış ve bu yapının devreye girme aşamaları açıklanmıştır. ESD sistemine ilişkin olarak başlatma ön koşulları, güvenli kapatma prosedürleri ve yeniden başlatma stratejileri; mantıksal kontrol diyagramları ve neden-sonuç ilişkilerine dayalı olarak modellenmiş, bu yapıların çalışabilirliği senaryo bazlı olarak kontrol edilmiştir. Tüm bu güvenlik yapıları; alarm yönetimi, veri iletimi, sistem erişilebilirliği ve merkezi kontrol stratejileri çerçevesinde entegre bir kontrol mimarisi oluşturacak şekilde kurgulanmıştır.

Çalışmada önerilen mikro şebeke yapısı, AA barasına dayalı hibrit sistem mimarisi çerçevesinde değerlendirilmiş ve şebeke senkronizasyonunun gereklilikleri sonuç odaklı olarak ele alınmıştır. Faz uyumu, frekans eşleşmesi ve gerilim düzeyinin belirli sınırlar içinde tutulması gibi parametreler, sistemin kararlı ve güvenli çalışması açısından kritik görülmüş; bu unsurlarda meydana gelebilecek sapmaların etkileri açıklanmıştır. Batarya ve yakıt hücresi eviricilerinin GFM ve GFL modlarına göre sınıflandırılması, mod geçişlerinin yönetimi ve kaynakların senkron bir şekilde devreye alınması açısından temel bir kontrol yaklaşımı oluşturmuştur. Bu yapıya uygun kontrol stratejileri ve ön senkronizasyon gereklilikleri sistematik olarak analiz edilmiştir. Güç paylaşımı, yük dengeleme ve mod geçişleri gibi temel işlevlerin temsili için oluşturulan matematiksel modeller ise, geliştirilen kontrol algoritmalarının yapılandırılmasına destek sağlamış ve senaryo bazlı simülasyonların kurgulanmasında yol gösterici bir rol üstlenmiştir. Bu sayede, sistemin gerçek operasyon koşullarına uygun şekilde çalışabileceği ortaya konmuştur.

Çalışmada, şebekeye bağlanma koşulları, enerji üretim ve yönetim sistemlerinin fonksiyonel yapıları, operasyon modları ve senaryo bazlı performans çıktıları kapsamlı biçimde incelenmiştir. Özellikle yakıt hücresi sistemi, batarya enerji depolama birimi, e-yakıt üretim zinciri ve fotovoltaik sistemlerin, entegre bir kontrol altyapısı aracılığıyla

EMS ve PMS ile birlikte değerlendirilmesi sağlanmıştır. Bu yapılar arasındaki işlevsel koordinasyon, gemi güç sisteminin sürdürülebilirliği, verimliliği ve kararlılığı açısından sistematik olarak analiz edilmiştir. EMS ve PMS katmanları, alt sistemlerle olan arayüzlerin tanımlanması, enerji yönlendirme algoritmalarının yapılandırılması ve senkronizasyon stratejilerinin uygulanması yoluyla birbiriyle uyumlu şekilde çalışacak biçimde tasarlanmıştır. Bu kapsamda, sıfır emisyon modu, hibrit mod ve bu modlar arasındaki geçiş senaryoları detaylandırılmış; operasyonel koşullar altında sistemin tepki davranışları senaryo bazlı olarak analiz edilmiştir.

Bu çalışmada geliştirilen sistem, her gemiye özgü ihtiyaçlara göre özelleştirilmiş (terzi usulü) bir yaklaşımla tasarlanmıştır; bu doğrultuda her bir alt sistemin kontrol algoritmaları, başlatma ön koşulları, bağlantı protokolleri ve şebeke üzerindeki görevleri ayrı ayrı yapılandırılmıştır. Özellikle batarya ve yakıt hücresi sistemlerinin; ani güç dalgalanmalarına, değişken enerji taleplerine ve yük tiplerine verdikleri tepkiler, senaryo bazlı olarak modellenmiş ve kontrolcü yapıları bu senaryolara uygun şekilde tasarlanmıştır. Fotovoltaik sistem ise üretiminin doğrudan ışınlam koşullarına bağlı olması nedeniyle, farklı gün ışığı senaryoları altında değerlendirilmiş ve sistemin kaynak çeşitliliğine karşı gösterdiği tepki analiz edilmiştir. Bu kapsamda yalnızca üretim kapasitesi değil, aynı zamanda güvenlik, süreklilik ve kaynaklar arası geçiş davranışları da dikkate alınarak EMS algoritmalarının sınır koşulları tanımlanmıştır.

Alt sistemlerin bağlantı ve kurulum koşulları ayrıntılı biçimde incelenmiş; özellikle batarya ve yakıt hücresi sistemlerinin AA baraya entegrasyonu, yük gemisinin gerçek operasyonel profiline göre yapılandırılmıştır. Mevcut dizel jeneratör sistemiyle birlikte çalışacak şekilde tasarlanan yeni enerji kaynakları, gemi üzerindeki yük profilini karşılamak üzere senaryolaştırılmıştır. Bu senaryolarda, e-yakıt sistemlerinin hazırlık süreleri dikkate alınarak operasyonel akışla senkronize geçiş planları yapılmış; geçiş süreçlerinde yük dengelemesi, sistem kararlılığı ve kaynak sürekliliği gibi performans kriterleri öncelikli olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen yeni yük analizleri, EMS-PMS koordinasyonu ile yürütülen mod yapılarını doğrulamış ve sistemin operasyonel kararlılığını sağlayabildiği gösterilmiştir.

Bu tez kapsamında geliştirilen enerji ve güç yönetim sistemi, AA barasına dayalı hibrit mikro şebeke mimarisi temel alınarak yapılandırılmış ve bu yapı doğrultusunda kontrol

stratejileri kurgulanmıştır. Sistem tasarımında batarya ve yakıt hücresi kaynakları, şebeke ile olan etkileşim düzeylerine göre GFM ve GFL modlar çerçevesinde sınıflandırılmış; bu modlar arasındaki geçişlerin güvenli biçimde gerçekleştirilmesi için senkronizasyon algoritmaları faz, frekans ve gerilim uyumu esas alınarak tanımlanmıştır.

Model kapsamında uygulanan senaryolarda, batarya sisteminin GFM modda çalışarak şebeke referansını oluşturduğu; yakıt hücresi sisteminin ise başlangıçta GFL modda sisteme dahil edilip, belirlenen eşik koşulları sağlandığında GFM moda geçiş yaptığı yapı başarıyla uygulanmıştır. Bu senaryo, enerji kaynaklarının kademeli entegrasyonunu mümkün kılmakta ve geçişler sırasında yük paylaşımında sistem kararlılığını sürdürmektedir. Özellikle batarya sisteminin geçici yük dengeleme ve GFM görevlerini aynı anda üstlenerek sistemin geçiş anlarında kararsızlığa düşmesini engellediği gözlemlenmiştir.

Her bir enerji kaynağının devreye alınma sıralaması, yük faktörü eşikleri, GFM-GFL geçiş kriterleri ve senkronizasyon ön koşulları mantıksal kurallarla belirlenmiş; böylece EMS algoritmasının kararlılık ve süreklilik gereksinimlerine yanıt verecek şekilde bütüncül olarak yapılandırılması sağlanmıştır. Geliştirilen kontrol stratejisinin mod geçişleri, yük paylaşımı ve enerji yönlendirme kararları açısından teorik modelleme ile yüksek düzeyde örtüştüğü, oluşturulan senaryolar ile ortaya konmuştur. Özellikle demirleme operasyonu gibi düşük ve sabit yük profiline sahip senaryolarda, yakıt hücresinin GFL modda devreye alınarak batarya ile birlikte GFM moduna geçmesi, referans gerilim ve frekansın başarıyla oluşturulmasını sağlamıştır.

Bu yapı, yalnızca geçiş stratejilerinin değil, aynı zamanda EMS'in modüler, genişletilebilir ve farklı operasyonel koşullara uyarlanabilir yapısının doğrulanması açısından da önemlidir. Böylece, sistemin sahada uygulanabilirliği ve dizel jeneratör bağımlılığını azaltmaya yönelik potansiyeli senaryo bazlı olarak değerlendirilmiştir.

Kargo operasyonları ve BWTS ile birlikte yürütülen yükleme işlemleri, yüksek güç gereksinimi nedeniyle sistemin esnekliğini ve kaynaklar arası geçiş yeteneğini test etmek açısından kritik olmuştur. Bu senaryolarda, yakıt hücresi sistemi yük devralma yetkinliği sayesinde üç dizel jeneratörle çalışması gereken durumlarda yalnızca iki jeneratörün kullanımıyla operasyonun sürdürülebilir şekilde tamamlanabildiği gösterilmiştir. Aynı zamanda batarya sistemi, hızlı güç değişimlerine yanıt vererek hem ani yüklenmeleri

dengelemiş hem de şebeke kararlılığını desteklemiştir. PV sisteminden elde edilen üretim ise doğrudan baskın bir rol oynamasa da, özellikle batarya şarj sürecinde destekleyici katkı sağlamıştır.

Liman operasyonlarında, uluslararası regülasyonlar nedeniyle e-yakıt sisteminin yalnızca seyir hâlindeyken devreye alınabileceği bir kontrol yapısı uygulanmıştır. Bu senaryoda yakıt hücresi, denize açıldıktan sonra devreye alınmış; batarya ile birlikte sistemin referans üretimini üstlenmiş ve dizel jeneratörler yük paylaşımından kademeli olarak çekilmiştir. Batarya, hem şarj hem de deşarj modlarında GFM olarak çalışarak şebekeye referans sağlamış, böylece yakıt hücresi devreye girene kadar sistem kararlılığını sürdürmüştür.

Normal seyir operasyonları, sıfır emisyon modunun uzun süreli ve kesintisiz uygulanabildiği, sistem performansının en stabil ve ideal biçimde test edildiği senaryoları oluşturmuştur. Simülasyonlar, PV katkısı bulunsun ya da bulunmasın, yakıt hücresi ve batarya kombinasyonunun sistem yükünü dengelemede yeterli olduğunu ve dizel jeneratörlerin yalnızca şebeke kararlılığının tehlikeye girdiği geçici durumlarda devreye alındığını göstermiştir. Bu sayede, sistemin emisyon azaltımı hedeflerine ulaşabildiği, operasyonel sürekliliği sağlayabildiği ve kaynaklar arası geçişleri kararlılıkla gerçekleştirebildiği doğrulanmıştır.

Tüm bu senaryolarda EMS yazılımı, batarya SoC, yük talebi ve PV üretim durumu gibi değişkenleri göz önünde bulundurarak kaynakları sırayla ve kontrollü şekilde devreye almış; GFM-GFL geçişlerinde herhangi bir kararsızlık oluşmadan yük paylaşımını başarıyla gerçekleştirmiştir. Simülasyon çıktıları, sistemin kararlı, sürdürülebilir ve çevresel regülasyonlara uyumlu bir şekilde çalışabileceğini göstermektedir. Böylece, geliştirilen EMS yapısının farklı operasyonel koşullarda güvenilir biçimde çalıştığı ve dizel jeneratör bağımlılığını önemli ölçüde azaltabildiği ortaya konmuştur.

8.2. Öneriler

Bu tez kapsamında yürütülen çalışmalar, konvansiyonel yük gemilerinin hibrit enerji sistemleriyle yeniden yapılandırılması sürecinde enerji yönetim stratejilerinin uygulanabilir olduğunu ortaya koymuş; özellikle GFM-GFL dinamiklerine dayalı mod geçişlerinin sistem kararlılığı, yük paylaşımı ve kaynak sürekliliği üzerindeki etkileri

başarıyla değerlendirilmiştir. Elde edilen bulguların, GAMMA projesi kapsamında geliştirilecek hibrit enerji çözümlerinin tasarımı ve saha uygulamaları için referans teşkil etmesi ve proje çıktılarının optimizasyon sürecine katkı sunması beklenmektedir. Bununla birlikte, sistemin performansını daha da geliştirmek ve farklı koşullarda uygulanabilirliğini artırmak amacıyla aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

- 1- Mevcut sistem kural tabanlı bir EMS algoritması ile kontrol edilmektedir. Ancak özellikle dinamik yük profillerine sahip uzun süreli seyir senaryolarında, MPC (Model Öngörülü Kontrol) gibi öngörücü ve optimizasyon temelli yöntemlerin kullanılması, enerji verimliliğini ve kaynak kullanım dengesini artırabilir. Bu nedenle, ileriye dönük çalışmalarda kural tabanlı EMS ile MPC tabanlı yaklaşımlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmelidir.
- 2- Tezde oluşturulan modelin doğrulama süreci simülasyon ortamında yürütülmüş olsa da, sistemin gerçek performansını daha doğru yansıtabilmesi için dijital ikiz temelli bir yapının geliştirilmesi gereklidir. Gerçek operasyonlardan alınacak sıcaklık, basınç, SoC, üretim-güç verileri gibi sensör tabanlı ölçümlerle modelin dinamik olarak güncellenmesi, hem kontrol algoritmalarının doğruluğunu artıracak hem de bakım ve güvenlik yönetimine katkı sağlayacaktır.
- 3- Metanol ve amonyak gibi e-yakıtların saflık dereceleri, reformasyon sıcaklıkları ve katalitik reaksiyon süreleri, saha koşullarında test edilmelidir. Elde edilen hidrojenin yakıt hücresine aktarılmadan önceki saflaştırma aşamaları, sistemin genel verimliliğini doğrudan etkileyen unsurlardır. Bu nedenle, farklı saflık derecelerinin sistem performansı üzerindeki etkileri gelecek çalışmalarda incelenmelidir.
- 4- Bu tezde kuru yük gemisi üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Ancak sistemin tanker, römorkör, yolcu gemisi gibi farklı gemi tiplerine göre modifiye edilmesi, yük profili ve operasyon süresine göre sistem mimarisinin yeniden modellenmesini gerektirir. Özellikle kısa süreli yüksek yük çeken gemilerde batarya boyutlandırması ve yakıt hücresi seçimi farklılık gösterebilir.
- 5- Tez kapsamında PV sistemi destekleyici bir rol üstlenmiştir. Gelecek çalışmalarda, PV sistemlerinin üretim verisi üzerinden optimize edilen batarya şarj-deşarj algoritmaları geliştirilmeli, ayrıca gemiye entegre edilebilecek düşük profilli rüzgâr türbinleri ile farklı yenilenebilir kaynakların entegrasyon

senaryoları değerlendirilmelidir. Böylece, sıfır emisyon modunun daha uzun süre kullanılabilir hâle gelmesi sağlanabilir.

- 6- Uluslararası denizcilik kuralları, e-yakıt sistemlerinin liman içi kullanımına sınırlamalar getirmektedir. Bu nedenle, geminin coğrafi konumuna ve operasyonel durumuna bağlı olarak EMS yazılımında otomatik olarak mod değiştirebilen kontrol mantıkları geliştirilmeli; regülasyon uyumlu geçiş yapıları gelecekteki projelerde yer almalıdır.
- 7- Normal seyir operasyonlarında elde edilen kararlılık göz önüne alındığında, gelecekteki çalışmalar bu tür uzun süreli sıfır emisyon senaryolarında sistemin yalnızca batarya ve yakıt hücresi ile ne kadar süre boyunca şebeke kararlılığını koruyabileceğini incelemelidir. Bu tür analizler, özellikle açık deniz taşımacılığında jeneratör bağımlılığını minimuma indirmek adına yol gösterici olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Cullinane, K., and Bergqvist, R. (2014). Emission control areas and their impact on maritime transport. *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, 28, 1–13.
- [2] Eyring, V., Isaksen, I. S., Berntsen, T., Collins, W. J., Corbett, J. J., Endresen, Ø., and Stevenson, D. S. (2010). Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. *Atmos. Environ.*, 44(37), 4735–4771.
- [3] International Maritime Organization. (2020). Prevention of Air Pollution from Ships (Annex VI of MARPOL). IMO.
- [4] Yang, Z., Bonsall, S., and Wang, J. (2012). Reducing shipping emissions: How to balance environmental and economic interests. *Marine Policy*, 36(5), 1133–1143.
- [5] Lindstad, H., Eskeland, G. S., and Psaraftis, H. N. (2015). Maritime emission reduction measures and their impact on transport cost and modal shift. *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, 36, 113–124.
- [6] Notteboom, T. (2011). The impact of low sulfur fuel requirements in shipping on the competitiveness of short sea shipping. *Marit. Econ. Logist.*, 13(1), 59–76.
- [7] Norwegian Maritime Authority. (2017). Measures to reduce emissions in World Heritage Fjords. Report to the Ministry of Climate and Environment.
- [8] Lin, B., and Lin, C.-Y. (2006, Mayıs). Compliance with international emission regulations: Reducing the air pollution from merchant vessels. *Marine Policy*.
- [9] Deniz, C., and Zincir, B. (2016). Environmental and economic evaluation of alternative marine fuels. *J. Clean. Prod.*, 113, 438–449.
- [10] Peng, Y. (2017). An Improved Droop Control Strategy for Parallel Inverters in Microgrids. *Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Beijing, China, 1-6. <https://doi.org/10.1109/EI2.2017.8245514>.
- [11] Jin, C., Gao, M., Lv, X., and Chen, M. (2012). A seamless transfer strategy of islanded and grid-connected mode switching for microgrid based on droop control. In *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 969–973). Raleigh, NC, USA. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342714>.
- [12] Guerrero, J. M., de Vicuna, L. G., Matas, J., Castilla, M., and Miret, J. (2004, September). A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(5), 1205–1213. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.833451>.
- [13] Zhang, H., Xiang, W., Lin, W., and Wen, J. (2021, Kasım). Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: Control strategy, stability, application, and challenges. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 9(6), 1239–1256. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2021.000257>.

- [14] Rocabert, J., Luna, A., Blaabjerg, F., and Rodríguez, P. (2012, Kasım). Control of power converters in AC microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(11), 4734–4749. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2199334>.
- [15] Hosseinzadeh, M., and Salmasi, F. R. (2015, Temmuz). Robust optimal power management system for a hybrid AC/DC micro-grid. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(3), 675–687. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2405935>.
- [16] Qi, N., Huang, K., Fan, Z., and Xu, B. (2025). Long-term energy management for microgrid with hybrid hydrogen-battery energy storage: A prediction-free coordinated optimization framework. *Applied Energy*, 377, 124485. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124485>.
- [17] Loskutov, A., Dar'enkova, A., Lipuzhin, I., Shalukho, A., Bedretdinov, R., Vanyaev, V., and Shakhov, A. (2024). Energy management system for hybrid PEMFC-battery power source for stationary consumers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 55.
- [18] Liu, S., Guo, X., and Zhang, L. (2019). An improved assessment method for FMEA for a shipboard integrated electric propulsion system using fuzzy logic and DEMATEL theory. *Energies*, 12, 3162. <https://doi.org/10.3390/en12163162>.
- [19] Wang, H., Boulougouris, E., Theotokatos, G., Priftis, A., Shi, G., Dahle, M., and Tolo, E. (2020). Risk assessment of a battery-powered high-speed ferry using formal safety assessment. *Safety*, 6, 39. <https://doi.org/10.3390/safety6030039>.
- [20] Ruggiero, V. (2021). New approach to the fire risk and firefighting in small ships, as consequence of latest developments in Industry 4.0 for the use of hybrid propulsion. *Procedia Computer Science*, 180, 4–12. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.121>.
- [21] Zhang, W., and Yan, X. (2017). Fire risk assessment of battery powered ship using entropy cloud method. In *2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)* (pp. 331–336). Banff, AB, Canada. <https://doi.org/10.1109/ICTIS.2017.8047785>.
- [22] Aarskog, F. G., Hansen, O. R., Strømgren, T., and Ulleberg, Ø. (2020). Concept risk assessment of a hydrogen driven high speed passenger ferry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(2), 1359–1372. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.128>.
- [23] Methanol Institute. (2016). Physical properties of pure methanol. Methanol Tech & Safety Data. Boiling point 64.6 °C, critical point 239 °C / 8.084 MPa, freezing point –97.6 °C.
- [24] Thermopedia. (2011). Methanol. A-to-Z of Thermal & Fluids Engineers. Boiling 337.6 K, melting 175.6 K, critical 512.6 K & 8.1035 MPa. thermopedia.com.
- [25] Engineering ToolBox. (n.d.). Ammonia – properties at gas-liquid equilibrium. Triple point –77.65 °C @ 0.0609 bar; critical point 132.41 °C @ 113.4 bar.
- [26] IEA-AMF. (2023). Alternative fuels: Ammonia. Fuel information. NH₃ LHV 18.6 MJ/kg, 12.7 MJ/L (–33 °C); CH₃OH LHV 19.9 MJ/kg, 15.65 MJ/L (25 °C).
- [27] Engineering ToolBox. (n.d.). Methanol – thermophysical properties. Flash point 11 °C; autoignition 464 °C; flammability limits ~6–36% vol.
- [28] Kruse, J. A. (1992). Methanol poisoning. *Intensive Care Medicine*, 18, 391–397. <https://doi.org/10.1007/BF01694340>.
- [29] Methanol Institute. (2023). Marine methanol – future-proof shipping fuel. Methanol burns with an invisible flame (no carbon-to-carbon bonds to produce soot).

- [30] SEA-LNG. (2021, Eylül 17). Fuel comparisons must consider energy density. *Maritime Executive*. One tonne of methanol contains ~36% of the energy of one tonne of LNG.
- [31] BIMCO. (2025, Mart 27). IMO issues interim guidelines for ammonia-fueled ships. IMO MSC.1/Circ.1687 approved at MSC 109; goal-based safety framework for ammonia fuel (toxicity, materials, etc.).
- [32] DNV. (2022, Kasım 24). Methanol as an alternative fuel – regulations available. *Maritime Impact*. IMO MSC.1/Circ.1621 (2020) interim guidelines enable methanol-fueled ships under IGF Code.
- [33] Methanol Institute. (2021). Methanol bunkering technical reference. Methanol bunkering is very similar to MGO or HFO; remains liquid at ambient temperature and pressure.
- [34] Methanol Institute. (2023, Mayıs). Marine methanol – future-proof shipping fuel. Storing and bunkering methanol is easier and cheaper than ammonia, hydrogen, or LNG.
- [35] NIOSH – CDC. (1994). Ammonia IDLH documentation. 300–500 ppm for 30 min is maximum survivable; 2500–5000 ppm short exposures fatal.
- [36] IEA-AMF. (2023). Alternative fuels: Ammonia. Flammability limits ~15–28% vol, min. ignition energy ~680 mJ (very low flame speed ~0.07 m/s).
- [37] IMO. (2020, Aralık). MSC.1/Circ.1621: Interim guidelines for safety of ships using methyl/ethyl alcohol as fuel. Goal-based requirements for arrangement, installation, control of machinery using methanol.
- [38] IMO. (2025, Şubat). MSC.1/Circ.1687: Interim guidelines for safety of ships using ammonia as fuel. High-level safety measures for design, fuel containment, bunkering, toxicity mitigation, equivalent to conventional fuels.
- [39] Atchison, J. (2024, December 12). IMO approves interim fuel guidelines (ammonia). *Ammonia Energy Assoc*. Notes that ammonia is not a “low-flashpoint fuel” under IGF Code, requiring SOLAS amendments by 2026 to formally include ammonia.
- [40] IEA-AMF. (2023). Ammonia engines for marine. Dual-fuel (pilot diesel) large engines expected by 2024; ammonia’s low flame speed necessitates high compression or H₂ doping for stable combustion.
- [41] Trangwachirachai, K., Rouwenhorst, K., Lefferts, L., and Faria Albanese, J. A. (2024). Recent progress on ammonia cracking technologies for scalable hydrogen production. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 49, 100945. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100945>.
- [42] Richard, S., Santos, A., Olivier, P., and Gallucci, F. (2024). Techno-economic analysis of ammonia cracking for large scale power generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 71, 571–587. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.308>.
- [43] Ghasemzadeh, K., Harasi, J. N., Amiri, T. Y., Basile, A., and Iulianelli, A. (2020). Methanol steam reforming for hydrogen generation: A comparative modeling study between silica and Pd-based membrane reactors by CFD method. *Fuel Processing Technology*, 199, 106273. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106273>.
- [44] Mei, D., Qiu, X., Liu, H., Wu, Q., Yu, S., Xu, L., Zuo, T., and Wang, Y. (2022). Progress on methanol reforming technologies for highly efficient hydrogen production and applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.134>.

- [45] Yusuf, N., and Almomani, F. (2023). Highly effective hydrogenation of CO₂ to methanol over Cu/ZnO/Al₂O₃ catalyst: A process economy & environmental aspects. *Fuel*, 332, 126027. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126027>.
- [46] Linde Engineering. (2015). Purification of hydrogen by pressure swing adsorption. https://assets.linde.com//media/global/engineering/engineering/home/products-and-services/process-plants/adsorption-and-membrane-plants/hydrogen-recovery-and-purification/ha_h_1_1_e_09_150dpi_nb.pdf.
- [47] Luberti, M., and Ahn, H. (2022). Review of Polybed pressure swing adsorption for hydrogen purification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(20), 10911–10933. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.147>.
- [48] Wang, Y., Wu, Q., Mei, D., and Wang, Y. (2020). Development of highly efficient methanol steam reforming system for hydrogen production and supply for a low temperature proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(46), 25317–25327. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.285>.
- [49] Sadeq, A., Homod, R., Hussein, A., Togun, H., Mahmoodi, A., Isleem, H., Patil, A., and Hedayati, A. (2024). Hydrogen energy systems: Technologies, trends, and future prospects. *The Science of The Total Environment*, 939, 173622. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173622>.
- [50] Onalaja, O., Abdullahi, Y., and Taofeek, L. (2024). Review of hydrogen fuel cell technology and its application. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.170421621.10747750/v1>.
- [51] Le, P. A., Trung, V. D., Nguyen, P. L., Bac Phung, T. V., Natsuki, J., and Natsuki, T. (2023, Eylül 25). The current status of hydrogen energy: An overview. *RSC Advances*, 13(40), 28262–28287. <https://doi.org/10.1039/d3ra05158g>.
- [52] Nkwambe, M. S., Sutherland, T., Seodigeng, T., and Musamba, B. (2024). Energy storage through a regenerative hydrogen fuel cell in a hybrid system of renewable energy for power generation. *Chemical Engineering Transactions*, 108, 73–78.
- [53] ISO 7240-13:2020. (2020). Fire detection and alarm systems — Part 13: Compatibility assessment of system components. *International Organization for Standardization*.
- [54] International Maritime Organization (IMO). (2016). International code of safety for ships using gases or other low-flashpoint fuels (IGF Code).
- [55] IMO. (2010). SOLAS (International convention for the safety of life at sea), Chapter II-2: Regulation 7: Fire safety regulations covering fire prevention, detection, and extinguishing systems on ships.
- [56] European Maritime Safety Agency (EMSA). (2023). Guidance on the safety of battery energy storage systems (BESS) on board ships.
- [57] IMO. (2022). MSC.1-Circ.1647 - Interim guidelines for the safety of ships using fuel cell power installations.
- [58] IMO. (2017). RESOLUTION MSC.422(98) - Amendments to the international code of safety for ships using gases or other low-flashpoint fuels (IGF Code).
- [59] Tasneef. (2022). Rules for the type approval of fuel cell power modules.
- [60] IMO. (2011). IMO Res.MSC.339(91), Annex, Amendments to the International Code for Fire Safety System (FFS Code), Chapter 9.
- [61] IMO. (2010). IMO Res.MSC.311(88), Annex, Amendments to the International Code for Fire Safety System (FFS Code), Chapter 9.

- [62] Elsevier. (n.d.). Reliability engineering & system safety. *ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/journal/reliability-engineering-and-system-safety>.
- [63] Dadashzadeh, M., Kashkarov, S., Makarov, D., and Molkov, V. (2018). Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(12), 6462–6475. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.195>.
- [64] Srivastava, S., and Butler-Burry, K. L. (2006). Expert-system method for automatic reconfiguration for restoration of shipboard power systems. *Generation, Transmission and Distribution*, 153, 253–260. <https://doi.org/10.1049/ipgtd:20045185>.
- [65] Matheys, J., et al. (2009). Comparison of the environmental impact of five electric vehicle battery technologies using LCA. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 1(3), 318–329.
- [66] Menteş, A., and Akyıldız, H. (2019). Hibrit tahrik sistemli gemilerde risk değerlendirmesi. *GİDB Dergi*, 17, 33–42. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1044254>.
- [67] Soares, F., Carvalho, L., Costa, I., Iria, J., Bodet, J.-M., Jacinto, G., Lecocq, A., Roessner, J., Caillard, B., and Salvi, O. (2015). The STABALID project: Risk analysis of stationary Li-ion batteries for power system applications. *Reliability Engineering & System Safety*, 140, 142–175. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.04.004>.
- [68] Luna, M., La Tona, G., Accetta, A., Pucci, M., Pietra, A., and Di Piazza, M. C. (2023). Optimal management of battery and fuel cell-based decentralized generation in DC shipboard microgrids. *Energies*, 16(4), 1682. <https://doi.org/10.3390/en16041682>.
- [69] Collados-Rodríguez, C., Westerman Spier, D., and Cheah-Mane, M. (2023). Preventing loss of synchronism of droop-based grid-forming converters during frequency excursions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 148, 108989. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.108989>.
- [70] Guo, R., Li, Q., and Zhao, N. (2022). An overview of grid-connected fuel cell system for grid support. *Energy Reports*, 8(Supplement 10), 884–892. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.211>.
- [71] Prabakar, K., Velaga, Y. N., Flores, R., Brouwer, J., Chase, J., and Sen, P. K. (2022). Enhancing distribution system resiliency using grid-forming fuel cell inverter. 38–42. <https://doi.org/10.1109/REPEC55671.2022.00015>.
- [72] Babu, V. V., Roselyn, J. P., Nithya, C., and Sundaravadivel, P. (2024). Development of grid-forming and grid-following inverter control in microgrid network ensuring grid stability and frequency response. *Electronics*, 13, 1958. <https://doi.org/10.3390/electronics13101958>.
- [73] Luna, M., La Tona, G., Accetta, A., Pucci, M., Pietra, A., and Di Piazza, M. C. (2023). Optimal management of battery and fuel cell-based decentralized generation in DC shipboard microgrids. *Energies*, 16, 1682. <https://doi.org/10.3390/en16041682>.
- [74] Ebinyu, E., Abdel-Rahim, O., Mansour, D.-E. A., Shoyama, M., and Abdelkader, S. M. (2023). Grid-forming control: Advancements towards 100% inverter-based grids—A review. *Energies*, 16, 7579. <https://doi.org/10.3390/en16227579>.

- [75] Liu, B., Song, Z., Yu, B., Yang, G., and Liu, J. (2024). A feedforward control-based power decoupling strategy for grid-forming grid-connected inverters. *Energies*, 17, 424. <https://doi.org/10.3390/en17020424>.
- [76] Ahmed, H., Biricik, S., and Benbouzid, M. (2021, June). Linear Kalman filter-based grid synchronization technique: An alternative implementation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6), 3847–3856. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3019790>.
- [77] Sharma, D., Sadeque, F., and Mirafzal, B. (2022). Synchronization of inverters in grid forming mode. *IEEE Access*, 10, 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3167521>.
- [78] Wei, Z., Pan, W., Ma, D., and Zhong, Q. (2022). An improved second order generalized integrators phase locked loop for flexible DC transmission. *Energy Reports*, 8(Supplement 5), 1406–1412. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.119>.
- [79] Rathnayake, D. B., Razzaghi, R., and Bahrani, B. (2022, Nisan). Generalized virtual synchronous generator control design for renewable power systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 13(2), 1021–1036. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2022.3143664>.
- [80] Moradi, M., Eskandari, M., and Hosseinian, S. (2016). Cooperative control strategy of energy storage systems and micro sources for stabilizing microgrids in different operation modes. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78, 390–400. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.12.002>.
- [81] Ciobotaru, M., Teodorescu, R., and Blaabjerg, F. (2006). A new single-phase PLL structure based on second order generalized integrator. In *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference* (pp. 1–6). Jeju, Korea (South). <https://doi.org/10.1109/pesc.2006.1711988>.
- [82] Rodriguez, P., Teodorescu, R., Candela, I., Timbus, A. V., Liserre, M., and Blaabjerg, F. (2006). New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions. In *2006 IEEE Power Electronics Specialists Conference* (pp. 1–7). <https://doi.org/10.1109/PESC.2006.1712059>.
- [83] Rodríguez, F. J., Bueno, E., Aredes, M., Rolim, L. G. B., Neves, F. A. S., and Cavalcanti, M. C. (2008). Discrete-time implementation of second order generalized integrators for grid converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(6), 176–181. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2001065>.
- [84] Xie, M., Wen, H., Zhu, C., and Yang, Y. (2017). DC offset rejection improvement in single-phase SOGI-PLL algorithms: Methods review and experimental evaluation. *IEEE Access*, 5, 12810–12819. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2719721>.
- [85] Boyra, M., and Thomas, J. (2011). A review on synchronization methods for grid-connected three-phase voltage source converters under unbalanced and distorted conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(6), 1643–1652. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2068573>.
- [86] Ciobotaru, M., Teodorescu, R., Candela, I., Timbus, A., and Blaabjerg, F. (2007). A new single-phase PLL structure based on second order generalized integrator. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(5), 1714–1723. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.898657>.
- [87] Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., García de Vicuña, L., and Castilla, M. (2004). A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters

- in distributed generation systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(5), 1205–1213. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.825127>.
- [88] Lei, L., Elgendy, M. A., Wade, N., Ethni, S., and Hasanien, H. M. (2018). Power sharing between parallel inverters in microgrid by improved droop control. In *2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)* (pp. 1–6). Glasgow, UK. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2018.8541970>.
- [89] De Brabandere, K., Bolsens, B., Van den Keybus, J., Woyte, A., Driesen, J., and Belmans, R. (2007, Temmuz). A voltage and frequency droop control method for parallel inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(4), 1107–1115. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.900456>.
- [90] Patel, S., Chakraborty, S., Lundstrom, B., Salapaka, S. M., and Salapaka, M. V. (2021, Mart). Isochronous architecture-based voltage-active power droop for multi-inverter systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(2), 1088–1103. <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3037159>.
- [91] IEEE Standards Coordinating Committee 22. (2019). IEEE recommended practice for monitoring electric power quality. *IEEE Std 1159-2019*. <https://standards.ieee.org/ieee/1159/6124/>.
- [92] Shouhong, Feng & Shunlai, Wang & Jianfang, Tang & Weilin, Li. (2018). Improved Control Method for Parallel Connected Inverter Systems. 1839-1844. 10.1109/POWERCON.2018.8602259.
- [93] Ye, P., et al. (2017). An improved droop control strategy for parallel inverters in microgrid. In *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)* (pp. 1–5). Beijing, China. <https://doi.org/10.1109/EI2.2017.8245514>.
- [94] Liu, Z., and Liu, J. (2015). Unified control based seamless transfer of microgrids. In *2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)* (pp. 1477–1482). Seoul, Korea (South). <https://doi.org/10.1109/ICPE.2015.7167974>.
- [95] De Brabandere, K., Bolsens, B., Van den Keybus, J., Woyte, A., Driesen, J., and Belmans, R. (2007, Temmuz). A voltage and frequency droop control method for parallel inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(4), 1107–1115. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.900456>.
- [96] Jin, C., Gao, M., Lv, X., and Chen, M. (2012). A seamless transfer strategy of islanded and grid-connected mode switching for microgrid based on droop control. In *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2012)* (pp. 969–973). <https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342714>.
- [97] Meng, X., Liu, Z., Liu, J., Wu, T., Wang, S., and Liu, B. (2017). A seamless transfer strategy based on special master and slave DGs. In *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia)* (pp. 1553–1558). Kaohsiung, Taiwan. <https://doi.org/10.1109/IFEEC.2017.7992277>.
- [98] C. -T. Lee, R. -P. Jiang and P. -T. Cheng, "A grid synchronization method for droop controlled distributed energy resources converters," *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Phoenix, AZ, USA, 2011, pp. 743-749, doi: 10.1109/ECCE.2011.6063844.
- [99] Liu, Y., and Peng, M. (2024). Research on peak load shifting for hybrid energy system with wind power and energy storage based on situation awareness. *Journal of Energy Storage*, 82, 110472. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110472>.

- [100] Baumler, A., Azib, T., Meng, J., Benterki, A., and Boukhnifer, M. (2024). Reward function design for reinforcement learning-based energy management strategy for a fuel cell/supercapacitor hybrid electric vehicle. In *2024 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD)* (pp. 1–6). Paris, France. <https://doi.org/10.1109/ICCAD60883.2024.10554034>.
- [101] Ghadbane, H. E., Barkat, S., Houari, A., et al. (2024). A load following energy management strategy for a battery-supercapacitor hybrid power system implemented with a PIL co-simulation approach. *Smart Grids and Energy*, 9, 32. <https://doi.org/10.1007/s40866-024-00214-4>.
- [102] Aghmadi, A., Hussein, H., and Mohammed, O. A. (2023). Enhancing energy management system for a hybrid wind solar battery based standalone microgrid. In *2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)* (pp. 1–6). Madrid, Spain. <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194769>.
- [103] Duan, Q., Yang, X., Wang, Y., Zhou, C., Tang, T., and Ke, S. (2024). Hybrid energy storage energy management collaborative optimization method for improving power quality in ship power grids. In *2024 21st International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)* (pp. 126–131). Chengdu, China. <https://doi.org/10.1109/ICHQP61174.2024.10768700>.
- [104] Kamagaté, Y., and Shah, H. A. (2024). Effective dynamic energy management algorithm for grid-interactive microgrid with hybrid energy storage system. *Scientific Reports*, 14, 20294. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70599-w>.
- [105] Macias Fernandez, A., Kandidayeni, M., Boulon, L., and Trovão, J. P. (2023, September). Effects of price range variation on optimal sizing and energy management performance of a hybrid fuel cell vehicle. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 38(3), 1626–1638. <https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3240723>.
- [106] Song, Q., Chen, J., Chen, J., and Chen, G. (2024, Ocak). Completely decentralized energy management system for fuel cell-battery-ultracapacitor hybrid energy storage system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(1), 438–449. <https://doi.org/10.1109/TIE.2023.3243302>.
- [107] N. -D. Nguyen, C. Yoon and Y. I. Lee, "A Standalone Energy Management System of Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles Using Model Predictive Control," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 5, pp. 5104-5114, May 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3186369.
- [108] Canale, M., Carello, M., and Cerrito, F. (2023). An optimal approach to energy management of a hybrid fuel-cell competition vehicle. In *2023 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (pp. 1–6). Milan, Italy. <https://doi.org/10.1109/VPPC60535.2023.10403227>.
- [109] Kimura, R., et al. (2021). A method to design a power flow and energy management controller for battery and EDLC hybrid electric vehicle. In *2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* (pp. 1–6). Kyoto, Japan. <https://doi.org/10.1109/ISIE45552.2021.9576437>.
- [110] Ma, R., Chai, X., Geng, R., Xu, L., Xie, R., Zhou, Y., Wang, Y., Li, Q., Jiao, K., and Gao, F. (2023). Recent progress and challenges of multi-stack fuel cell systems: Fault detection and reconfiguration, energy management strategies, and

- applications. *Energy Conversion and Management*, 285, 117015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117015>.
- [111] Zhu, L., Liu, Y., Zeng, Y., Guo, H., Ma, K., Liu, S., and Zhang, Q. (2024). Energy management strategy for fuel cell hybrid ships based on deep reinforcement learning with multi-optimization objectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 93, 1258–1267. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.10.192>.
- [112] Farrokhi, E., Ghoreishy, H., and Ahangar, R. (2024). Optimization-based power management for battery/supercapacitor hybrid energy storage system with load estimation capability in a DC microgrid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 155, 109665. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109665>.
- [113] Tavagnutti, A. A., Chiandone, M., Bosich, D., and Sulligoi, G. (2023). A stability-aimed PMS for shipboard zonal DC microgrids: The C-HIL tests on real-time platform. In *2023 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)* (pp. 453–457). Alexandria, VA, USA. <https://doi.org/10.1109/ESTS56571.2023.10220502>.
- [114] Balestra, L., and Schjøberg, I. (2021). Energy management strategies for a zero-emission hybrid domestic ferry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(77), 38490–38503. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.091>.
- [115] MathWorks. (2022). *Droop control in decentralized inverter-based AC microgrid* [MATLAB Central File Exchange]. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/106230-droop-control-in-decentralized-inverter-based-ac-microgrid>
- [116] MathWorks. (2021). *Visualize droop characteristic of synchronous generators* [MATLAB Central File Exchange]. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/83948-visualize-droop-characteristic-of-synchronous-generators>

EKLER

EK A: Hibrit Sistem EMS Yazılımı

```
function [P_FC_set, P_PV_set, P_BATT_discharge, P_BATT_charge,
BATT_Charge_Enable, BATT_Discharge_Enable, P_DGEN_set, DGEN_start,
PV_Priority_Enable, Batt_GFM, FC_GFM, mode] = EMS_step_AC( ...
    P_Load_Total, n_FC, n_BATT, t_runtime, SoC_BATT, V_BATT, P_PV,
    DGEN_n_status, DGEN_n_available)

% EMS_step şebeke EMS adım fonksiyonu

% P_Load_Total Toplam yük talebi [kW]

% n_FC Yakıt hücresi verimi (0–1)

% n_BATT Batarya verimi (0–1)

% t_runtime Simülasyon adım süresi [h]

% SoC_BATT Batarya doluluk oranı [%]

% V_BATT Batarya gerilimi [V]

% P_PV PV üretim gücü [kW]

% DGEN_n_status [1x3] Dizel jeneratör çalışma durumu (logical)

% DGEN_n_available [1x3] Dizel jeneratör kullanılabilirlik (logical)

persistent params mem

if isempty(mem)

    % Parametreler

    params.FC_max = 1100; % kW
```

```

params.BATT_max    = 500;  % kW
params.PV_max      = 210;  % kW
params.SoC_min     = 10;   % %
params.SoC_max     = 90;   % %
params.SoC_hyst    = 5;    % %
params.DGEN_max    = [800 800 800]; % kW
params.FC_start_delay = 0.1; % h GFL'den GFM'e geçiş süresi
mem.FC_timer       = 0;
mem.FC_GFM_active  = false;
end
P_FC_set           = 0;
P_PV_set           = 0;
P_BATT_discharge   = 0;
P_BATT_charge      = 0;
BATT_Charge_Enable = false;
BATT_Discharge_Enable = false;
P_DGEN_set         = zeros(1,3);
DGEN_start         = false(1,3);
PV_Priority_Enable = false;
Batt_GFM           = false;
Batt_GFL           = false;
FC_GFM             = false;
FC_GFL             = false;
mode               = 0;
% --- Mod seçimi ---

```

```

if all(~DGEN_n_status) && (n_FC>0 || P_PV>0)

    mode = 0; % Zero Emission

elseif any(DGEN_n_available) && P_Load_Total > (n_FC*params.FC_max +
n_BATT*params.BATT_max + P_PV)

    mode = 2; % DGS

else

    mode = 1; % Hybrid

end

% --- PV öncelikli katkı ---
P_PV_set = min(P_PV, params.PV_max);
PV_Priority_Enable = (P_PV_set > 0);
rem = P_Load_Total - P_PV_set;

% --- Mode bazlı işleyiş ---
switch mode

    case 0 % Zero Emission

        % Dizel jeneratörler pasif

        % Batarya GFM, PV ve FC GFL olarak başlar

        Batt_GFM = true;

        Batt_GFL = false;

        if n_FC>0 && rem>0

            FC_GFL = true; FC_GFM = false;

            P_FC_set = min(n_FC*params.FC_max, rem);

            rem = rem - P_FC_set;

            % GFL'den GFM'e geçiş

            mem.FC_timer = mem.FC_timer + t_runtime;

```

```

        if mem.FC_timer >= params.FC_start_delay

            FC_GFM = true; FC_GFL = false;

        end

    end

    % Batarya deşarj stabilite için

    if rem>0 && SoC_BATT > params.Soc_min

        P_BATT_discharge = min(n_BATT*params.BATT_max, rem);

        BATT_Discharge_Enable = true;

        rem = rem - P_BATT_discharge;

    end

    % rem>0 ise dizel desteği

    if rem>0

        share = rem/3;

        for i=1:3

            if DGEN_n_available(i)

                P_DGEN_set(i) = min(params.DGEN_max(i), share);

                DGEN_start(i) = true;

            end

        end

    end

end

case 1 % Hybrid

    % Dizel jeneratör GFM referans

    Batt_GFM = false;

    Batt_GFL = true;

```

```

if n_FC>0 && rem>0

    FC_GFL = true;

    P_FC_set = min(n_FC*params.FC_max, rem);

    rem = rem - P_FC_set;

end

% Batarya deşarj

if rem>0 && SoC_BATT > (params.Soc_min - params.Soc_hyst)

    P_BATT_discharge = min(n_BATT*params.BATT_max, rem);

    BATT_Discharge_Enable = true;

    rem = rem - P_BATT_discharge;

end

% Dizel jeneratör droop paylaşım

if rem>0

    share = rem/3;

    for i=1:3

        if DGEN_n_available(i)

            P_DGEN_set(i) = min(params.DGEN_max(i), share);

            DGEN_start(i) = true;

        end

    end

end

end

% Yakıt hücresi devreye alma köprüsü

if ~mem.FC_GFM_active && n_FC>0

    mem.FC_timer = mem.FC_timer + t_runtime;

    if mem.FC_timer >= params.FC_start_delay

```

```

        mem.FC_GFM_active = true;

    end

end

if mem.FC_GFM_active

    FC_GFM = true; FC_GFL = false;

end

% Batarya şarj

if SoC_BATT < params.SoC_min && P_PV_set>0

    P_BATT_charge = min(n_BATT*params.BATT_max, P_PV_set);

    BATT_Charge_Enable = true;

end

case 2 % DGS

    % Tüm yük dizel jeneratörlerle

    for i=1:3

        if DGEN_n_available(i)

            P_DGEN_set(i) = min(params.DGEN_max(i), P_Load_Total/3);

            DGEN_start(i) = true;

        end

    end

end

end

end

%% ZeroEmissionMode.m

function out = ZeroEmissionMode(P_Load, n_FC, n_BATT, dt, SoC, P_PV, params,
mem)

```

```

% PV katkısı her zaman önceliklidir

P_PV_set = min(P_PV, params.PV_max);

rem = P_Load - P_PV_set;

% Yakıt hücresi GFL başlatılır

if n_FC>0 && rem>0

    P_FC_set = min(n_FC*params.FC_max, rem);

    FC_GFL = true;

    rem = rem - P_FC_set;

    % GFL→GFM gecikmesi kontrol edilir
    mem.FC_timer = mem.FC_timer + dt;

    if mem.FC_timer >= params.FC_delay

        FC_GFL = false;

        FC_GFM = true;

    else

        FC_GFM = false;

    end

else

    P_FC_set = 0;

    FC_GFL = false;

    FC_GFM = false;

end

% Batarya GFM modda referans oluşturur

Batt_GFM = true;

Batt_GFL = false;

if rem>0 && SoC > params.Soc_min

```

```

P_BATT_discharge = min(n_BATT*params.BATT_max, rem);

BATT_Discharge_Enable = true;

rem = rem - P_BATT_discharge;

else

    P_BATT_discharge = 0;

    BATT_Discharge_Enable = false;

end

% Gerekiyorsa dizel jeneratör desteği

P_DGEN_set = zeros(1,3);
DGEN_start = false(1,3);
if rem>0
    share = rem/3;
    for i=1:3
        P_DGEN_set(i) = min(params.DGEN_max(i), share);
        DGEN_start(i) = true;
    end
end

end

% Çıkış yapılandırması
out = struct(
    'mode', 0,...          % Zero Emission modu
    'P_PV_set', P_PV_set,...
    'P_FC_set', P_FC_set,...
    'P_BATT_discharge', P_BATT_discharge,...
    'P_DGEN_set', P_DGEN_set,...
    'DGEN_start', DGEN_start,...

```

```

    'FC_GFL', FC_GFL,...
    'FC_GFM', FC_GFM,...
    'Batt_GFM', Batt_GFM,...
    'Batt_GFL', Batt_GFL,...
    'PV_Priority_Enable', P_PV_set>0);
end

%% HybridMode.m

function out = HybridMode(P_Load, n_FC, n_BATT, dt, SoC, P_PV, DGEN_avail,
params, mem)
    % PV üretimi sisteme aktarılır
    P_PV_set = min(P_PV, params.PV_max);
    rem = P_Load - P_PV_set;
    % Yakıt hücresi GFL olarak başlar
    if n_FC>0 && rem>0
        P_FC_set = min(n_FC*params.FC_max, rem);
        FC_GFL = true;
        rem = rem - P_FC_set;
        % GFL→GFM geçiş zamanlayıcısı
        mem.FC_timer = mem.FC_timer + dt;
        if mem.FC_timer >= params.FC_delay
            FC_GFL = false;
            FC_GFM = true;
        else
            FC_GFM = false;
        end
    end
end

```

```

else

    P_FC_set = 0;

    FC_GFL = false;

    FC_GFM = false;

end

% Batarya GFL veya gerektiğinde GFM

Batt_GFL = true;

Batt_GFM = false;

if rem>0 && SoC > params.Soc_min - params.Soc_hyst

    P_BATT_discharge = min(n_BATT*params.BATT_max, rem);

    BATT_Discharge_Enable = true;

    rem = rem - P_BATT_discharge;

else

    P_BATT_discharge = 0;

    BATT_Discharge_Enable = false;

end

% Gerektiğinde batarya GFM droop ile destek

if rem>0 && FC_GFM

    Batt_GFM = true;

    % droop paylaşımı için basit oransal dağıtım

    totalDroop = params.droop_B + params.droop_FC;

    addBatt = rem * (params.droop_B / totalDroop);

    addFC = rem * (params.droop_FC / totalDroop);

    P_BATT_discharge = P_BATT_discharge + addBatt;

    P_FC_set = P_FC_set + addFC;

```

```

    rem = 0;

end

% Batarya şarj gereksinimi

if SoC < params.Soc_min && P_PV_set>0

    P_BATT_charge = min(n_BATT*params.BATT_max, P_PV_set);

    BATT_Charge_Enable = true;

else

    P_BATT_charge = 0;

    BATT_Charge_Enable = false;

end

% Dizel jeneratör komutları

P_DGEN_set = zeros(1,3);

DGEN_start = false(1,3);

if rem>0

    share = rem/3;

    for i=1:3

        if DGEN_avail(i)

            P_DGEN_set(i) = min(params.DGEN_max(i), share);

            DGEN_start(i) = true;

        end

    end

end

% Çıkış

out = struct(

    'mode', 1,...          % Hybrid modu

```

```
'P_PV_set', P_PV_set,...  
'P_FC_set', P_FC_set,...  
'P_BATT_discharge', P_BATT_discharge,...  
'P_BATT_charge', P_BATT_charge,...  
'P_DGEN_set', P_DGEN_set,...  
'DGEN_start', DGEN_start,...  
'FC_GFL', FC_GFL,...  
'FC_GFM', FC_GFM,...  
'Batt_GFL', Batt_GFL,...  
'Batt_GFM', Batt_GFM,...  
'PV_Priority_Enable', P_PV_set>0,...  
'BATT_Charge_Enable', BATT_Charge_Enable);  
end
```