

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YENİLENEBİLİR ENERJİ TABANLI ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ AKILLI ENERJİ
SİSTEMİNİN TASARIM VE DENETİMİ**

DOKTORA TEZİ

CEM MORKOÇ

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. UĞUR YÜZGEÇ

BİLECİK, 2023

10542040

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YENİLENEBİLİR ENERJİ TABANLI ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ AKILLI
ENERJİ SİSTEMİNİN TASARIM VE DENETİMİ**

DOKTORA TEZİ

CEM MORKOÇ

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. UĞUR YÜZGEÇ

BİLECİK, 2023

10542040

BEYAN

“Yenilenebilir Enerji Tabanlı Şebekeden Bağımsız Akıllı Enerji Sisteminin Tasarım Ve Denetimi” adlı doktora tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR	<input type="checkbox"/>	DESTEK ALINMAMIŞTIR	<input checked="" type="checkbox"/>
Destek alındı ise;			
Destekleyen Kurum:			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)	<input type="checkbox"/>		
2- TÜBİTAK	<input type="checkbox"/>		
3- Diğer:	<input type="checkbox"/>		
ETİK KURUL Onayı <input type="checkbox"/>			
ETİK KURUL karar tarih/sayı			

Cem Morkoç

Tarih

İmza

ÖN SÖZ

Bu tez çalışması sürecinde ilgi ve desteği ile her zaman yanımda olan, değerli hocam Prof. Dr. Uğur YÜZGEÇ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmam boyunca tez izleme komitesinde bulunarak bilimsel katkılarını ve fikirlerini sunan, değerli hocalarım Prof. Dr. Cihan KARAKUZU ve Doç. Dr. Serhat YILMAZ'a, ayrıca çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Gürhan ERTAŞGIN, değerli çalışma arkadaşlarım Doç. Dr. Harun ÖZBAY, Dr. Öğr. Üyesi Akif KARAFİL ve Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÜÇGÜN'e desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışması sürecinde, istemeyerek de olsa birlikte geçireceğimiz zamandan kısmak zorunda kalmam ve uzun laboratuvar çalışmalarım için bana gösterdikleri anlayış, sabır ve manevi desteklerinden dolayı, kendisi de bir akademisyen olan, değerli eşim Öğr. Gör. İlknur KIRAN MORKOÇ ve biricik kızım Duru MORKOÇ'a sonsuz teşekkür ederim.

Cem Morkoç

2023

ÖZET

YENİLENEBİLİR ENERJİ TABANLI ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ AKILLI ENERJİ SİSTEMİNİN TASARIM VE DENETİMİ

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de artan enerji ihtiyacının tükenir ve oldukça fazla çevresel olumsuz etkileri bulunan fosil tabanlı enerji kaynakları tarafından karşılanma oranı giderek azalmaktadır. Buna karşın yenilenebilir enerji sistemlerinin enerji depolama birimleri ile birlikte yaygın kullanımı enerji talebinin temiz ve sürdürülebilir olması açısından katkı sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı gerek coğrafi ve fiziki şartlar gerekse ekonomik nedenlerden dolayı ihtiyaç duyulabilecek YEK tabanlı, şebekeden bağımsız, enerji depolama sistemleri ile desteklenen, bir enerji sisteminin tasarlanması ve bu enerji sisteminin, gömülü kod üretimi yöntemi ile geliştirilen akıllı algoritmalar kullanılarak denetiminin sağlanmasıdır. Bu amaç doğrultusunda, bir şebekeden bağımsız DC enerji yönetim sisteminin tasarımı, benzetimi ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. YEK tabanlı enerji yönetim sistemi; PV paneller tercih edilerek oluşturulmuş bir enerji üretimi birimi, bataryalar tercih edilerek oluşturulmuş bir enerji depolama ve destek birimi ve yük biriminden meydana gelmektedir. Gerek bu birimlerin iç denetimleri gerekse bu birimler arasındaki enerji akışı ve yük talebinin kararlı ve sürekli bir şekilde karşılanmasının sağlanabilmesi için güç devreleri ve denetleme algoritmaları geliştirilmiştir. Bu güç devreleri ve denetleme algoritmaları, enerji üretimi birimi için PV panellerin MGNT denetimini gerçekleştirirken enerji depolama ve destek birimi için ise şarj veya deşarj denetimlerini gerçekleştirmektedir. Tüm bu denetimler için bulanık mantık ve bulanık mantık PID denetleyicili olmak üzere iki farklı denetleme algoritması geliştirilmiştir. Birimler arasındaki enerji akışı için kilit rol oynayan bataryaların SoC verisinin belirlenebilmesi için de ayrıca bir algoritma geliştirilmiştir.

Tasarlanan enerji yönetim sistemi için gerekli akım ve gerilim değerlerinin elde edilebilmesi için kullanılan ADC örnekleme frekansı ve denetim için kullanılan DC-DC dönüştürücülerin anahtarlama frekansı 10 KHz olarak belirlenmiştir. Enerji yönetim sisteminin benzetim çalışmaları için PSIM yazılımı, uygulama çalışmaları için ise Texas Instruments firmasının ürettiği TMS320F28335 sayısal sinyal işlemcisi kullanılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen YEK tabanlı enerji yönetim sisteminde, enerji üretimi, enerji depolama ve destek birimleri ve sisteme bağlanacak yük(ler)in farklı durumları için yedi farklı sistem çalışma durumu belirlenmiştir. Gerek sistemin gereksinimleri doğrultusunda anlık çalışma durumlarının değişimi gerekse ilgili çalışma durumunun gereksinimleri doğrultusunda DC-DC dönüştürücülerin anahtarlama sinyallerinin denetimi, geliştirilen denetim algoritmaları tarafından otonom olarak gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir Enerji Kaynakları, PV sistemler, Batarya Yönetimi, Bulanık Mantık Denetleyici, Bulanık Mantık PID Denetleyici.

ABSTRACT

DESIGN and CONTROL OF A RENEWABLE ENERGY BASED, OFF-GRID ENERGY SYSTEM

In our country, as in the whole world, the rate of meeting the increasing energy need by fossil-based energy sources, which are exhausted and have a lot of negative environmental effects, is gradually decreasing. On the other hand, the prevalence of RES's usage is increasing with the collaborations developed with the support of energy storage systems.

The aim of this thesis is to design an energy system based on RES, off grid, supported by energy storage systems that may be needed due to geographical, physical conditions and economic reasons, and to control this energy system using smart algorithms developed with the embedded code generation method. For this purpose, the design, simulation and implementation of an off-grid DC energy management system has been carried out. RES based energy management system; It consists of an energy production unit formed by choosing PV panels, an energy storage and support unit formed by choosing batteries, and a load unit. Power circuits and control algorithms have been developed in order to ensure that both the internal controls of these units and the energy flow between these units and load demand are met in a stable and continuous manner. These power circuits and control algorithms perform the MPPT control of the PV panels for the power generation unit, and charge or discharge controls for the energy storage and support unit. For all these controls, two different control algorithms, fuzzy logic controller-based and fuzzy logic PID controller-based, have been developed. An algorithm has also been developed to determine the SoC data of the batteries, which play a key role in the energy flow between the units.

The ADC sampling frequency and the switching frequency of the DC-DC converters used for the control of the system were determined as 10 KHz. PSIM software was used for the simulation studies of the energy management system, and the TMS320F28335 digital signal processor produced by Texas Instruments was used for the application studies.

In the RES-based energy management system developed within the scope of this thesis, seven different system operating states have been determined for different states of energy production, energy storage and support units and the load(s) to be connected to the

system. The control of the switching signals of DC-DC converters is carried out autonomously by the developed control algorithms, both in line with the requirements of the system and in line with the requirements of the relevant operating state.

Keywords: Renewable Energy Sources, PV systems, Battery Management, Fuzzy Logic Controller, Fuzzy Logic PID Controller.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	xx
1. GİRİŞ.....	1
2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI VE PV SİSTEMLER	8
2.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	8
2.2. Fotovoltaik Sistemler	11
2.2.1 PV Panel Matematiksel Modeli	14
2.2.2 Çevresel Etkenlerin PV Paneller Üzerindeki Etkisi	15
2.3. PV Sistemlerde Maksimum Güç Noktası Takibi.....	17
3. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ VE BATARYALAR	21
3.1. Enerji Depolama Sistemleri	21
3.2. Bataryalar.....	23
3.3. Batarya Yönetim Sistemleri.....	25
3.3.1 Batarya Şarj Yönetimi	25
3.3.2 Batarya Deşarj Yönetimi	28
3.3.3 Batarya Durum Gösterge Verileri	28
4. ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ VE DENETİM YÖNTEMLERİ.....	32
4.1. Dönüştürücüler	32
4.1.1 Düşürücü Tip (Buck) Dönüştürücü	33
4.1.2 Yükseltici Tip (Boost) Dönüştürücü	35
4.1.3 Düşürücü – Yükseltici Tip (Buck – Boost) Dönüştürücü.....	36

4.1.4 Çift Yönlü Düşürücü – Yükseltici (Bidirectional Buck – Boost) Dönüştürücü.....	38
4.2. Denetim Yöntemleri	39
4.3.1 PID Denetleyiciler	40
4.3.2 Bulanık Mantık Denetleyiciler	42
4.3.3 Bulanık Mantık PID Denetleyiciler.....	46
5. YEK TABANLI ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ	49
5.1. Enerji Üretimi Birimi (PV Panel)	50
5.2. Enerji Depolama Ve Destek Birimi (Batarya)	53
5.3. YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumları.....	58
5.4. YEK Tabanlı Enerji Sistemi Denetim Algoritmaları.....	64
5.4.1 Bulanık Mantık Denetleyici	64
5.4.2 Bulanık Mantık PID Denetleyici	69
5.5. Geliştirilen YEK Tabanlı Enerji Sistemi Devre Kartlarının Tasarımı	73
6. YEK TABANLI ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ BENZETİM ÇALIŞMALARI VE SONUÇLAR	82
6.1. Enerji Üretim Birimi Benzetim Çalışmaları	83
6.2. Enerji Üretim Birimi Benzetim Çalışmaları Sonuçları.....	87
6.3. Enerji Depolama Ve Destek Birimi Benzetim Çalışmaları.....	93
6.4. Enerji Depolama Ve Destek Birimi Benzetim Çalışmaları Sonuçları	96
6.5. SoC Algoritması Benzetim Çalışmaları Sonuçları	107
7. YEK TABANLI ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ UYGULAMA ÇALIŞMALARI VE SONUÇLAR	109
7.1. Enerji Yönetim Sistemi Deneysel Çalışma Test Düzenegi	109
7.2. Bulanık Mantık Denetleyicili Enerji Yönetim Algoritması Uygulama Çalışmaları Ve Sonuçları	112
7.2.1 MGNT Uygulama Çalışmaları Ve Sonuçları	112
7.2.2 Enerji Yönetim Sistemi Uygulama Çalışmaları Ve Sonuçları.....	114
7.3. Bulanık Mantık PID Denetleyicili Enerji Yönetim Algoritması Uygulama Çalışmaları Ve Sonuçları	134

7.3.1	MGNT Uygulama Çalışmaları Ve Sonuçları	134
7.3.2	Enerji Yönetim Sistemi Uygulama Çalışmaları Ve Sonuçları.....	136
7.4.	SoC Belirleme Uygulama Çalışması Ve Sonuçları	156
8.	SONUÇ	158
KAYNAKÇA.....		163

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1. Tez Kapsamında Ele Alınan Başlıkların İlgili Literatürdeki Durumu	5
Tablo 5.1. Perlight Marka PLM-100P/12 Model PV Panel Katalog Verileri.....	50
Tablo 5.2. Yuasa Marka NPW45-12 Model 12V VRLA Tip Batarya Katalog Verileri	53
Tablo 5.3. Yük Bağlı İken ve Bağlı Değil İken YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumları	59
Tablo 5.4. Akım ve Gerilim Sensörlerinin Kalibrasyon ve Kazanç Değerleri	81
Tablo 8.1. Geliştirilen Bulanık Mantık ve Bulanık Mantık PID Denetleyici Algoritmalarının MGNT Denetimi ve Enerji Sistemi Denetimi İçin İşe Koşulmasından Elde Edilen Sonuçlar	161
Tablo 8.2. Geliştirilen SoC Belirleme Algoritmasından Elde Edilen Sonuçlar.....	162

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. 1990 Yılından Günümüze, Enerji Üretiminde Kullanılan Kaynak Çeşitliliği ve Bu Üretilen Enerjinin Kullanıldığı Sektörlerin Dağılımı – Dünya Geneli.....	1
Şekil 1.2. 1990 Yılından Günümüze, Enerji Üretiminde Kullanılan Kaynak Çeşitliliği ve Bu Üretilen Enerjinin Kullanıldığı Sektörlerin Dağılımı (Türkiye geneli).....	2
Şekil 1.3. Tez Çalışması Konu Başlıkları.....	5
Şekil 2.1. YEK Türleri ve Enerji Kaynakları	8
Şekil 2.2. OECD Ülkeleri İçin Birincil Enerji Kaynakları İçerisinde YEK'lerin Kullanım Oranı	9
Şekil 2.3. Türkiye’de ve Dünyada PV Sistemler Kullanılarak Elde Edilen Enerji Miktarları.....	10
Şekil 2.4. Işık Tayfı	11
Şekil 2.5. Bir Güneş Pilinin Kesiti	12
Şekil 2.6. PV Hücresinin Eşdeğer Devre Modeli.....	14
Şekil 2.7. PV Panel Çıkış Akım ve Geriliminin Sıcaklıkla ve Işınım Miktarı ile Değişimi	16
Şekil 2.8. MGNT Destekli Bir PV Sistemin Genel Şeması	18
Şekil 2.9. İdeal Bir PV Pilin Akım – Gerilim (I – V) ve Güç – Gerilim (P – V) Karakteristikleri.....	19
Şekil 2.10. P&O MGNT Yöntemi Tipik Akış Şeması	20
Şekil 3.1. Farklı Enerji Depolama Birimleri İçin Güç ve Enerji Yoğunluğu Ragone Şeması.....	22
Şekil 3.2. Batarya Eşdeğer Devresi.....	24
Şekil 3.3. Sabit Potansiyel Şarj Yöntemi ile Şarj Olan Bir Bataryanın Şarj Eğrisi.....	26

Şekil 4.1. Düşürücü Tip Bir Dönüştürücü İçin; Genel Devre Şeması, Anahtarlama Elemanı İletim – Kesim Durumlarındaki Devre Şemaları ve Sürekli Akım Modunda Kararlı Çalışma Durumu İçin Çalışma Eğrileri.....	34
Şekil 4.2. Yükseltici Tip Bir Dönüştürücü İçin; Genel Devre Şeması, Anahtarlama Elemanı İletim – Kesim Durumlarındaki Devre Şemaları ve Sürekli Akım Modunda Kararlı Çalışma Durumu İçin Çalışma Eğrileri.....	35
Şekil 4.3. Düşürücü – Yükseltici Tip Bir Dönüştürücü İçin; Genel Devre Şeması, Anahtarlama Elemanı İletim – Kesim Durumlarındaki Devre Şemaları ve Sürekli Akım Modunda Kararlı Çalışma Durumu İçin Çalışma Eğrileri.....	37
Şekil 4.4. Çift Yönlü Bir Dönüştürücü İçin; Genel Devre Şeması ve Anahtarlama Elemanları İletim – Kesim Durumlarındaki Devre Şemaları	39
Şekil 4.5. Denetim Yöntemleri.....	40
Şekil 4.6. PID Denetleyici Genel Şeması.....	40
Şekil 4.7. Bulanık Sistem Genel Şeması	43
Şekil 4.8. Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi (T-norm İçin min T-conorm İçin max Operatörleri Kullanılan)	44
Şekil 4.9. Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi (T-norm İçin Çarpım T-conorm İçin max Operatörleri Kullanılan)	44
Şekil 4.10. Sugeno Bulanık Modeli	46
Şekil 4.11. Bulanık Mantık PID Denetleyici Genel Şeması	47
Şekil 5.1. Şebekeden Bağımsız YEK Tabanlı Enerji Sisteminin Genel Şeması.....	49
Şekil 5.2. Enerji Üretimi Birimi Genel Şeması.....	51
Şekil 5.3. Enerji Depolama ve Destek Birimi Genel Şeması	54
Şekil 5.4. Geliştirilen Batarya Şarj/Deşarj Algoritması Şarj Kısmı Akış Diyagramı	55
Şekil 5.5. Geliştirilen Batarya Şarj/Deşarj Algoritması Deşarj Kısmı Akış Diyagramı	56
Şekil 5.6. Yük Bağlı İken ve Bağlı Değil İken YEK tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Durum Değerlendirme Tablosu.....	58

Şekil 5.7. YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumu 1 Şeması.....	60
Şekil 5.8. YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumu 2 Şeması.....	60
Şekil 5.9. YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumu 3 Şeması.....	61
Şekil 5.10. YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumu 4 Şeması	62
Şekil 5.11. YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumu 5 Şeması	62
Şekil 5.12. YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumu 6 Şeması	63
Şekil 5.13. YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumu 7 Şeması	63
Şekil 5.14. Enerji Üretim Birimi Bulanık Mantık Denetleyici Hata ve Hatanın Değişimi İçin Belirlenen Üyelik Fonksiyonları	65
Şekil 5.15. Enerji Üretimi Birimi Bulanık Mantık Denetleyici Kural Tabanı	66
Şekil 5.16. Enerji Üretimi Birimi Bulanık Mantık Denetleyici Çıkış Üyelik Fonksiyonları	67
Şekil 5.17. Enerji Depolama ve Destek Birimi Bulanık Mantık Denetleyici Hata ve Hatanın Değişimi İçin Oluşturulan Üyelik Fonksiyonları.....	68
Şekil 5.18. Enerji Depolama ve Destek Birimi Bulanık Mantık Denetleyici Kural Tabanı	68
Şekil 5.19. Enerji Depolama ve Destek Birimi Bulanık Mantık Denetleyici Çıkış Üyelik Fonksiyonları.....	69
Şekil 5.20. Hata ve Hatanın Değişimi İçin Belirlenen Üyelik Fonksiyonları	69
Şekil 5.21. a) K_p ve K_d Çıkışları İçin Kullanılan Üyelik Fonksiyonu, b) α Çıkışı İçin Kullanılan Üyelik Fonksiyonu	70
Şekil 5.22. Örnek Adım Cevabı	71
Şekil 5.23. Oransal Kazanç, K_p , İçin Oluşturulan Kural Tablosu.....	72
Şekil 5.24. Türevsel Kazanç, K_d , İçin Oluşturulan Kural Tablosu	72
Şekil 5.25. α İçin Oluşturulan Kural Tablosu.....	72
Şekil 5.26. YEK Tabanlı Enerji Yönetimi Sistemi İçin Tasarlanan Devre Şeması	74

Şekil 5.27. TMS320F2833x Blok Diyagramı	75
Şekil 5.28. Sistem İçin Tasarlanan Modüler Devre Kartları (Ana Kart – Sol Üstte, Akım ve Gerilim Ölçme Kartı – Sağ Üstte, Aşırı Akım ve Gerilim Koruma Kartı – Sağ Ortada, PWM Tampon Kartı – Sağ Altta ve DSP Kontrol Kartı – Sol Altta).....	75
Şekil 5.29. Ana Kart (Üstten Görünüm – Solda, Altan Görünüm – Sağda)	76
Şekil 5.30. Akım ve Gerilim Ölçüm Kartı (Üstten Görünüm – Solda, Altan Görünüm – Sağda).....	77
Şekil 5.31. Aşırı Akım ve Gerilim Koruma Kartı (Üstten Görünüm – Solda, Altan Görünüm – Sağda).....	77
Şekil 5.32. Darbe Genlik Modülasyonu Tampon Kartı (Üstten Görünüm – Solda, Altan Görünüm – Sağda).....	78
Şekil 5.33. DSP Kontrol Kartı (Üstten Görünüm – Üstte, Altan Görünüm – Altta).....	78
Şekil 5.34. Direnç – Kondansatör – Diyot Bastırma (RCD Snubber) Devresi	79
Şekil 5.35. RCD Bastırma Devresi.....	80
Şekil 5.36. Tasarlanan sistemin donanımı (tüm modüller birleştirilmiş olarak).....	81
Şekil 6.1. Ölçekleme ve Kalibrasyon İşlemleri Örnek Görüntüsü	83
Şekil 6.2. PV Panel Modelinin PSIM Yazılımında Kütüphaneden Seçilmesi	84
Şekil 6.3. PV Modül Parametre Girişi ve Hesaplamaların Gerçekleştirilmesi	85
Şekil 6.4. PV Modülün Hesaplanan Parametrelerinin Benzetim Modeline Aktarılması	85
Şekil 6.5. PV Panellerin MGNT Denetimi İçin PSIM Ortamında Benzetim Şeması	87
Şekil 6.6. Bulanık Mantık Denetleyicili MGNT Benzetim Çalışması Sonuçları.....	88
Şekil 6.7. Güncellenmiş Bulanık Mantık Denetleyicili MGNT Benzetim Sonuçları (Benzetim Süresi 1,5sn.).....	89
Şekil 6.8. Bulanık Mantık PID Denetleyicili MGNT Benzetim Sonuçları (Benzetim Süresi 1,5sn.)	89
Şekil 6.9. Bulanık Mantık Denetleyicili MGNT Benzetim Çalışması Sonuçları 0,25sn.	90

Şekil 6.10. Bulanık Mantık PID Denetleyicili MGNT Benzetim Çalışması Sonuçları 0,25sn.....	91
Şekil 6.11. Bulanık Mantık Denetleyicili MGNT Benzetim Sonuçları (Mamdani)	92
Şekil 6.12. Bulanık Mantık Denetleyicili MGNT Benzetim Sonuçları (Sugeno).....	92
Şekil 6.13. Bulanık Mantık PID Denetleyicili MGNT Benzetim Sonuçları (Mamdani)	92
Şekil 6.14. Bulanık Mantık PID Denetleyicili MGNT Benzetim Sonuçları (Sugeno) ..	92
Şekil 6.15. Batarya Modelin PSIM Yazılımında Kütüphaneden Seçilmesi.....	93
Şekil 6.16. Batarya Modeli Parametre Girişi ve Hesaplamaların Gerçekleştirilmesi	94
Şekil 6.17. Batarya Şarj/Deşarj Denetimi İçin PSIM Ortamında Benzetim Şeması.....	95
Şekil 6.18. Bulanık Mantık Denetleyici Algoritmasının Batarya Şarj Denetimi İçin Uygulanmasından Elde Edilen Sonuçlar	97
Şekil 6.19. Bulanık Mantık PID Denetleyici Algoritmasının Batarya Şarj Denetimi İçin Uygulanmasından Elde Edilen Sonuçlar	98
Şekil 6.20. Bulanık Mantık Denetleyici Algoritmasının Batarya Deşarj Denetimi İçin Uygulanmasından Elde Edilen Sonuçlar	99
Şekil 6.21. Bulanık Mantık PID Denetleyici Algoritmasının Batarya Deşarj Denetimi İçin Uygulanmasından Elde Edilen Sonuçlar	100
Şekil 6.22. 3 Aşamalı Şarj Denetimi Benzetim Çalışması Sonuçları.....	100
Şekil 6.23. 3 Aşamalı Şarj Denetimi Benzetim Çalışması Sonuçları – Hata, Hatanın Değişimi ve Bulanık Mantık Denetleyicinin Kuralları.....	101
Şekil 6.24. Benzetim Sonuçları – Batarya Deşarj İşlemi	102
Şekil 6.25. Bulanık Mantık Denetleyicili 3 Aşamalı Batarya Şarj Benzetim Sonuçları (Mamdani)	104
Şekil 6.26. Bulanık Mantık Denetleyicili 3 Aşamalı Batarya Şarj Benzetim Sonuçları (Sugeno)	104
Şekil 6.27. Bulanık mantık PID Denetleyicili 3 Aşamalı Batarya Şarj Benzetim Sonuçları (Mamdani)	105

Şekil 6.28. Bulanık Mantık PID Denetleyicili 3 Aşamalı Batarya Şarj Benzetim Sonuçları (Sugeno)	105
Şekil 6.29. Bulanık Mantık Denetleyicili Batarya Deşarj Benzetim Sonuçları (Mamdani)	106
Şekil 6.30. Bulanık Mantık Denetleyicili Batarya Deşarj Benzetim Sonuçları (Sugeno)	106
Şekil 6.31. Bulanık Mantık PID Denetleyicili Batarya Deşarj Benzetim Sonuçları (Mamdani)	107
Şekil 6.32. Bulanık Mantık PID Denetleyicili Batarya Deşarj Benzetim Sonuçları (Sugeno)	107
Şekil 6.33. Deşarj Sürecinde Batarya Modelinin ve Amper Saat Sayımı ile Belirlenen SoC Değerlerinin Karşılaştırılması.....	108
Şekil 6.34. Şarj Sürecinde Batarya Modelinin ve Amper Saat Sayımı ile Belirlenen SoC Değerlerinin Karşılaştırılması	108
Şekil 7.1. Deneysel Çalışma Test Düzeneği – Birimler	110
Şekil 7.2. Deneysel Çalışma Test Düzeneği – Elemanlar	111
Şekil 7.3. Bulanık Mantık Denetleyicili Enerji Yönetim Algoritması MGNT Başarım Oranı	113
Şekil 7.4. Enerji Üretim Birimi Akım (Kırmızı), Gerilim (Siyah), Güç (Gri), MGNT Başarım Oranı (Mavi) ve Enerji (Pembe) Değerleri	113
Şekil 7.5. Elde Edilen DC Bara Gerilimi (Mavi), Akımı (Turkuaz) ve Gücü (Kırmızı) ve Batarya Gerilimi (Mor), Akımı (Yeşil) ve Gücü (Kırmızı) (100Ω için).....	115
Şekil 7.6. Enerji Üretimi Birimi Akım (Kırmızı), Gerilim (Siyah), Güç (Gri), ve MGNT Başarım Oranı (Mavi) ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (100Ω için).....	116
Şekil 7.7. Çalışma Durumlarının Geçiş Anları (Büyütülmüş Olarak – 100Ω için)	117
Şekil 7.8. Enerji Üretimi Birimi ve Enerji Depolama ve Destek Birimi Anahtarlama Sinyallerinin Değişimi (100Ω için)	119

Şekil 7.9. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (50Ω için).....	119
Şekil 7.10. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (50Ω için).....	120
Şekil 7.11. Çalışma Durumlarının Geçiş Anları (Büyütülmüş Olarak – 50Ω için)	121
Şekil 7.12. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (25Ω için).....	122
Şekil 7.13. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (25Ω için).....	122
Şekil 7.14. Çalışma Durumlarının Geçiş Anları (Büyütülmüş Olarak – 25Ω için)	123
Şekil 7.15. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (13Ω için).....	124
Şekil 7.16. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (13Ω için).....	124
Şekil 7.17. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (13Ω için – 2 PV Panel Seri Bağlı 34,4V, 100W).....	125
Şekil 7.18. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (13Ω için – 2 PV Panel Seri Bağlı 34,4V, 100W)	126
Şekil 7.19. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (13Ω için – 2 PV Panel Seri ve Paralel Bağlı 34,4V, 150W)	127
Şekil 7.20. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (13Ω için – 2 PV Panel Seri ve Paralel Bağlı 34,4V, 150W)	127
Şekil 7.21. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (500W/m ² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin).....	129
Şekil 7.22. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (500W/m ² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin)	130

Şekil 7.23. Enerji Üretimi Birimi ve Enerji Depolama ve Destek Birimi Anahtarlama Sinyallerinin Değişimi (500W/m ² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin)	131
Şekil 7.24. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (1000W/m ² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin).....	132
Şekil 7.25. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (1000W/m ² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin)	133
Şekil 7.26. Enerji Üretimi Birimi ve Enerji Depolama ve Destek Birimi Anahtarlama Sinyallerinin Değişimi (1000W/m ² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin)	134
Şekil 7.27. Bulanık Mantık PID Denetleyicili Enerji Yönetim Algoritması MGNT Başarım Oranı.....	135
Şekil 7.28. Enerji Üretim Birimi Akım (Kırmızı), Gerilim (Siyah), Güç (Gri), MGNT Başarım Oranı (Mavi) ve Enerji (Pembe) Değerleri	135
Şekil 7.29. Elde Edilen DC Bara Gerilimi (Mavi), Akımı (Turkuaz) ve Gücü (Kırmızı) ve Batarya Gerilimi (Mor), Akımı (Yeşil) ve Gücü (Kırmızı) (100Ω için)	137
Şekil 7.30. Enerji Üretimi Birimi Akım (Kırmızı), Gerilim (Siyah), Güç (Gri) ve MGNT Başarım Oranı.....	137
Şekil 7.31. Çalışma Durumlarının Geçiş Anları (Büyütülmüş Olarak – 100Ω için) ...	138
Şekil 7.32. Enerji Üretimi Birimi ve Enerji Depolama ve Destek Birimi Anahtarlama Sinyallerinin Değişimi (100Ω için)	140
Şekil 7.33. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (50Ω için).....	141
Şekil 7.34. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (50Ω için).....	141
Şekil 7.35. Çalışma Durumlarının Geçiş Anları (Büyütülmüş Olarak – 50Ω için)	142
Şekil 7.36. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (25Ω için).....	143

Şekil 7.37. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (25Ω için).....	143
Şekil 7.38. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (25Ω için – 34,4V, 150W)	144
Şekil 7.39. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (25Ω için – 34,4V, 150W) (Büyütülmüş Olarak)	144
Şekil 7.40. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (25Ω için – 34,4V, 150W) .	145
Şekil 7.41. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (13Ω için).....	146
Şekil 7.42. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (13Ω için).....	146
Şekil 7.43. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (13Ω için – 2 PV Panel Seri Bağlı 34,4V, 100W)	147
Şekil 7.44. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (13Ω için – 2 PV Panel Seri Bağlı 34,4V, 100W)	148
Şekil 7.45. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (13Ω için – 2 PV Panel Seri ve Paralel Bağlı 34,4V, 150W)	149
Şekil 7.46. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (13Ω için – 2 PV Panel Seri ve Paralel Bağlı 34,4V, 150W)	149
Şekil 7.47. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (500W/m ² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin).....	151
Şekil 7.48. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (500W/m ² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin)	152

Şekil 7.49. Enerji Üretimi Birimi ve Enerji Depolama ve Destek Birimi Anahtarlama Sinyallerinin Değişimi (500W/m ² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin)	153
Şekil 7.50. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (1000W/m ² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin).....	154
Şekil 7.51. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (1000W/m ² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin)	155
Şekil 7.52. Enerji Üretimi Birimi ve Enerji Depolama ve Destek Birimi Anahtarlama Sinyallerinin Değişimi (1000W/m ² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin)	156
Şekil 7.53. Geliştirilen SoC Belirleme Algoritmasından Belirlenen Bir Güneşlenme Senaryosun Doğrultusunda Elde Edilen SoC Değerinin Değişimi – DSP Oscilloscope Ekranı	157
Şekil 7.54. Geliştirilen SoC Belirleme Algoritmasından Belirlenen Bir Güneşlenme Senaryosun Doğrultusunda Elde Edilen SoC Değerinin Değişimi – Büyütülmüş Hali	157

KISALTMALAR ve SİMGELER LİSTESİ

- AC** : Alternatif Akım - AA (Alternating Current)
- ADC** : Analog Dijital Dönüştürücü (Analog to Digital Converter)
- AM** : Hava Kütle Oranı (Air Mass)
- BM** : Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)
- ÇD** : Çalışma Durumu
- DC** : Doğru Akım – DA (Direct Current)
- DoC** : Şarj Derinliği (Depth of Charge)
- DoD** : Deşarj Derinliği (Depth of Discharge)
- DSP** : Sayısal Sinyal İşlemci (Digital Signal Processor)
- EMK** : Elektro Motor Kuvvet (Electromotive Force)
- FF** : Doldurma Faktörü (Fill Factor)
- FLC** : Bulanık Mantık Denetleyici (Fuzzy Logic Controller)
- IGBT** : Yalıtımlı Kapılı İki Kutuplu Transistör (Insulated-Gate Bipolar Transistor)
- MGN** : Maksimum Güç Noktası (Maximum Power Point)
- MGNT** : Maksimum Güç Noktası Takibi (Maximum Power Point Tracking)
- MOSFET** : Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
- MPC** : Model Öngörülü Kontrol (Model Predictive Control)
- OECD** : Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (Organisation for Economic Co-operation and Development)
- P&O** : Saptır & Gözle (Perturb & Observe)
- PI** : Oransal – İntegral (Proportional – Integral)
- PID** : Oransal – İntegral – Türevsel (Proportional – Integral – Derivative)
- PV** : Fotovoltaik (Photovoltaic)
- PWM** : Darbe Genlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
- RCD** : Direnç – Kondansatör – Diyot (Resistor – Capacitor – Diode)
- SCI** : Seri İletişim Arayüzü (Serial Communication Interface)
- SMC** : Kayan Kip Denetleyici (Sliding Mode Controller)
- SMES** : Süper İletken Manyetik Enerji Depolama (Super Magnetic Energy Storage)

SoC : Şarj Durumu (State of Charge)

SoH : Sağlık Durumu (State of Health)

STC : Standart Test Koşulları (Standart Test Conditions)

TTL : Transistör – Transistör Logic

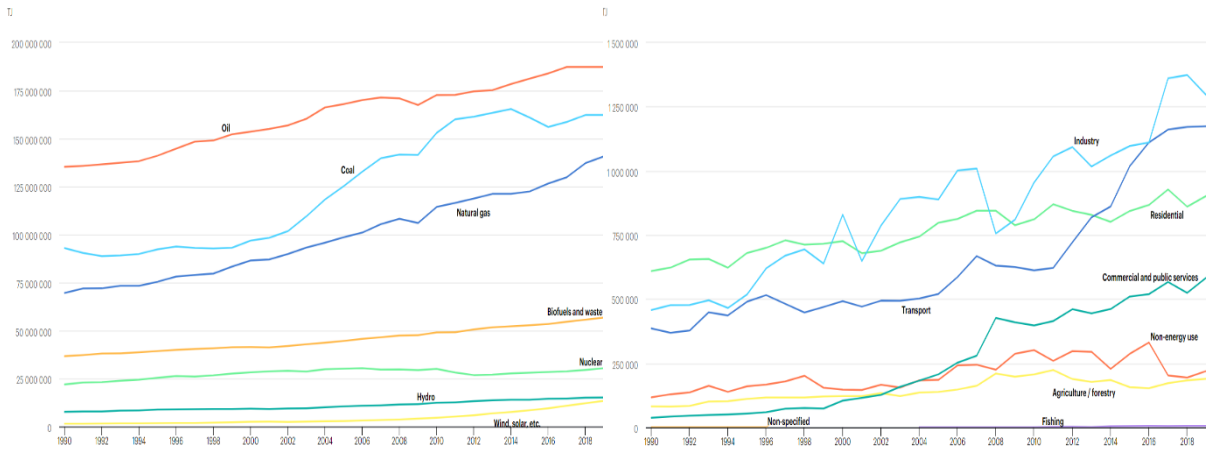
VRLA : Valf Ayarlı Kurşun-Asit (Valve Regulated Lead–Acid)

YEK : Yenilenebilir Enerji Kaynakları (Renewable Energy Sources)

YSA : Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network)

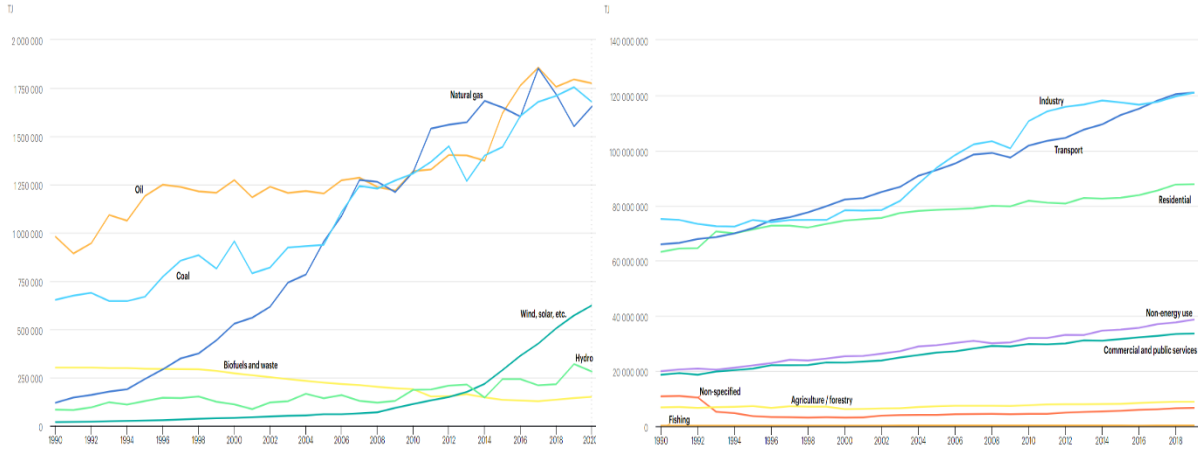
1. GİRİŞ

Günümüzde ısıtma, aydınlatma, taşımacılık gibi alanlarda ve tabii ki tüm endüstri uygulamalarında ihtiyaç duyulan enerjinin büyük oranda fosil kaynaklı yakıtlar tarafından karşılandığı görülmektedir (I.E.A. - International Energy Agency, 2022). Fakat fosil kaynaklı yakıtların kullanımının uzun vadede dünyamız dolayısı ile de insanlık için oldukça büyük tehditler oluşturacağı öngörülmektedir. Endüstri açısından bakıldığında, sınırlı rezervi bulunan, enerji üretiminde büyük paya sahip özellikle petrol ve doğal gaz gibi fosil kaynaklı yakıtların azalması, buna bağlı olarak artacak olan maliyetler ve dolayısıyla bu durumun sosyo-ekonomik sonuçları ön plana çıkarken, çevre açısından bakıldığında ise, fosil kaynaklı yakıtların kullanılması sonucunda ortaya çıkan zararlı emisyonlar ve sera gazlarının çevre üzerindeki giderek artan etkileri ve bu etkilerin küresel ısınma benzeri sonuçları bu tehditler arasında sayılabilir. Ayrıca, enerji üretiminde kullanılan tükenir kaynakların giderek azalması, bu kaynakların arzını sağlayan ülkelerde yaşanan olumsuz durumlar ve ticaret politikalarındaki değişimler, savaşlara dahi neden olabilecek enerji krizlerini de beraberinde getirebilmektedir. Şekil 1.1 ve 1.2’de dünya geneli ve Türkiye için 1990 yılından günümüze, enerji üretiminde kullanılan kaynak çeşitliliği ve bu üretilen enerjinin tüketildiği sektörlerin dağılımı görülmektedir.



Şekil 1.1. 1990 Yılından Günümüze, Enerji Üretiminde Kullanılan Kaynak Çeşitliliği ve Bu Üretilen Enerjinin Kullanıldığı Sektörlerin Dağılımı – Dünya Geneli

Kaynak: (Energy Statistics Data Browser, IEA, 2022)



Şekil 1.2. 1990 Yılından Günümüze, Enerji Üretiminde Kullanılan Kaynak Çeşitliliği ve Bu Üretilen Enerjinin Kullanıldığı Sektörlerin Dağılımı (Türkiye geneli)

Kaynak: (Energy Statistics Data Browser, IEA, 2022)

Buna göre, enerji üretiminde kullanım oranı en yüksek olan kaynaklar dünyada da ülkemizde de petrol, kömür ve doğalgaz olmakla beraber, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK)'lerin özellikle ülkemizdeki kullanım oranlarındaki artış da dikkate değerdir. Ayrıca, üretilen enerjinin daha çok endüstri, taşımacılık ve konut gibi alanlarda kullanılmakta olduğu ve özellikle taşımacılık sektöründe harcanan enerjideki ivme artışı da dikkat çekicidir.

Fosil kaynaklı yakıtların kullanımı sonucu ortaya çıkan tehdit ve olumsuzlukların farkındalığındaki artışın sonucu olarak; güneş, rüzgâr, jeotermal, biokütle gibi YEK'lerin her geçen gün daha fazla ülke tarafından tercih edilmeye başlandığı ve YEK'ler ile enerji üretimi konusunda yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarına ayrılan bütçelerin de artış gösterdiği görülmektedir. Küresel sera gazı emisyonlarının %55'inden sorumlu, en az 55 taraf ülke tarafından, 2015 yılının Aralık ayında imzalanan Paris Anlaşması'na göre, karbon nötr hedefinin yatırım, üretim, istihdam politikalarında köklü değişikliğe yol açacağı ve bu sürecin 2053 vizyonunun ana unsurlarından biri olarak kabul edileceği ifade edilmiştir (Delbeke vd., 2019: 23). Bu gibi sebeplerle, son yıllarda fosil kaynaklı yakıtların tüketimini azaltarak YEK'lerin kullanımını yaygınlaştırmayı amaç edinmiş çalışmaların sayısı da giderek artmaktadır. YEK'lerin, özellikle 2013 yılı sonrasında yapılan teşvik ve yatırımlarla, ülkemizde de diğer enerji kaynakları ile rekabet edebilir hale geldiği görülmektedir (*Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2021 Yılı Faaliyet Raporu*, 2022: 143).

Elektrik enerjisinin temininde verim, maliyet ve kaynağın yaygın olarak bulunması gibi şartlar göz önünde bulundurulduğunda özellikle güneş ve rüzgâr enerjisinin kullanımı, diğer YEK'lere göre daha ön plana çıkmaktadır. Mevcut elektrik şebekesinden uzak olması veya coğrafi şartların zorluğu nedeni ile elektrik şebekesinden enerji alamayan kırsal bölgelerde bulunan yapı ve üretim alanlarının bu ihtiyaçlarının karşılanması için alternatif çözüm arayışları YEK'leri gündeme taşımaktadır. Ayrıca elektrik enerjisini mevcut şebekeden karşılayabilen fakat ekonomik nedenlerle kendi enerjisini üreterek kullanmak isteyen yapı ve üretim alanlarının talepleri de yine YEK'lerin kullanılması ile karşılanabilmektedir. Bunun yanı sıra, kara ile bağlantısı olmayan tesisler (petrol arama istasyonları vb.) ve araçların (elektrikli araçlar, yatlar, uzay araçları, vb.) enerji ihtiyaçları da yine YEK'lerin kullanımı ile karşılanabilmektedir.

Tüm bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda YEK tabanlı, şebekeden bağımsız enerji sistemleri gerek endüstrinin gerekse bireylerin giderek artan oranda gereksinim duyduğu enerjinin üretim ve dağıtımındaki ekonomik sorunlar ve çevresel tehditlerin üstesinden gelinebilmesi için güvenilirlik, ulaşılabilirlik ve verimlilik gibi özellikleri ile benzersiz bir fırsat oluşturmaktadır.

Belirlenen çalışma bölgesinin meteorolojik ve jeomorfolojik koşullarına bağlı olarak, şebekeden bağımsız enerji sistemlerinde enerji üretimi için farklı YEK'ler tercih edilebilmekle birlikte tercih edilen bu YEK'lerin bazı özel gereksinimleri karşılaması istenmektedir (Kubalik vd., 2014: 345). Bunlar:

- Harici elektrik şebekelerinden gelen enerjiye bağımlı olmadan otonom çalışma,
- Kararlı enerji üretimi ve tüketimi ile çalışma,
- Enerji depolama imkânı,
- Dengeli enerji akışı yönetimi yapabilme
- Farklı yük tiplerine hizmet verebilme,
- Çift yönlü güç akışına izin verebilme, vb. olabilir.

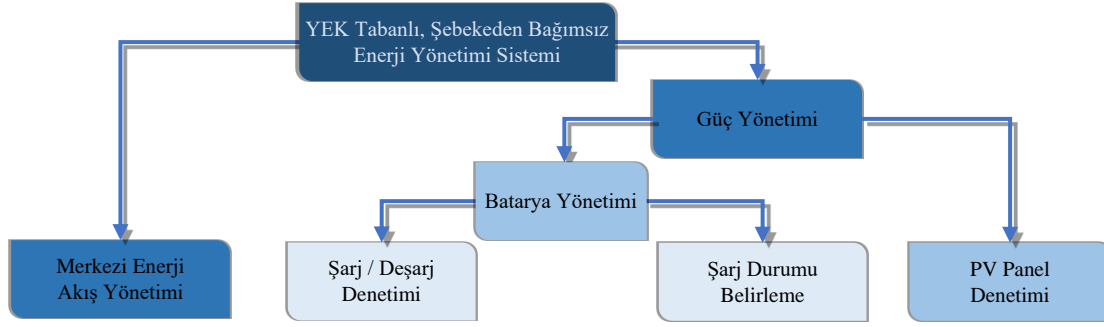
Uygun şekilde kullanıldığı takdirde dünyanın giderek artan, sınırsız enerji ihtiyacını fazlasıyla karşılayabilecek potansiyele sahip olan güneş enerjisi, sağladığı yaklaşık 3.850.000 Exajoule enerji miktarı ile diğer YEK'ler arasında farklı bir yere sahiptir (Messenger ve Abtahi, 2020: 21). Ayrıca, doğal olarak sonsuz olan bu enerji kaynağı sürdürülebilirlik açısından da oldukça değerlidir. Fotovoltaik (Photovoltaic – PV) sistemler, yüksek üretim ve ilk yatırım

maliyetine ve düşük enerji verimliliğine sahip olması gibi dezavantajlarına rağmen, avantajlarının daha ağır gelmesi nedeni ile kullanım yaygınlığı giderek artan bir YEK olarak tercih edilmektedir.

Bir şebekeden bağımsız enerji sisteminin yegâne enerji kaynağı olan YEK'lerin en büyük dezavantajı, doğası gereği oldukça değişken olan sistem parametrelerine sahip olmasıdır. YEK'lerin bu dezavantajına rağmen sistemin kararlı bir şekilde çalışmasının gerekliliği ise YEK tabanlı, şebekeden bağımsız sistemlerin tasarımında karşılaşılan ve kesinlikle aşılması gereken en büyük sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Sisteme bağlı olan herhangi bir yükün herhangi bir anda talep edeceği enerjinin mümkün olan en uzun sürede ve kararlı bir şekilde karşılanabilmesi oldukça önemlidir. Bu doğrultuda, enerji depolama sistemleri, YEK tabanlı şebekeden bağımsız enerji sistemlerindeki bu büyük probleme çözüm olarak kullanılabilir.

Bu tez çalışmasının amacı gerek coğrafi ve fiziki şartlar gerekse ekonomik nedenlerden dolayı ihtiyaç duyulabilecek YEK tabanlı, şebekeden bağımsız, enerji depolama sistemleri ile desteklenen, bir enerji sisteminin tasarlanması ve bu enerji sisteminin, gömülü kod üretimi yöntemi ile geliştirilen akıllı algoritmalar kullanılarak denetiminin sağlanmasıdır. YEK tabanlı enerji sistemi; PV paneller tercih edilerek oluşturulmuş bir enerji üretimi birimi, bataryalar tercih edilerek oluşturulmuş bir enerji depolama ve destek birimi ve yük biriminden meydana gelmektedir. Böylelikle, oldukça değişken sistem parametrelerine sahip YEK'lerden elde edilen kararsız ve değişken güce rağmen enerji depolama sistemlerinin desteği ile enerji sistemine bağlanacak herhangi bir yükün herhangi bir anda talep edeceği güç, mümkün olan en uzun sürede ve kararlı bir şekilde karşılanabilecektir.

Bu çalışma, iki temel başlık etrafında şekillenmektedir. Bunlar, bir enerji sisteminin farklı çalışma durumlarında, birimleri arasındaki enerji akışının denetlendiği merkezi enerji akış yönetimi ve birimlerinin kendi iç denetimlerinin gerçekleştirildiği güç yönetimi başlıklarıdır. Bu başlıklardan güç yönetimi ise enerji üretim birimi elemanı olan PV panellerin denetimi (maksimum güç noktası takibi) ve enerji depolama ve destek birimi elemanı olan bataryaların yönetimi olmak üzere iki alt başlık altında incelenebilir. Batarya yönetimi alt başlığı ise şarj/deşarj denetimi ve şarj durumu (State of Charge - SoC) belirleme olacak şekilde iki alt başlık altında incelenebilir. İlgili literatür Şekil 1.3'te de verildiği üzere bu başlıklar doğrultusunda incelenmiştir.



Şekil 1.3. Tez Çalışması Konu Başlıkları

Yapılan literatür araştırması sonucunda elde edilen veriler Tablo 1’de verilmiştir. Buna göre, YEK’ler, PV sistemler, enerji depolama sistemleri ve bataryalar kullanılarak şebekeden bağımsız veya şebeke bağlantılı birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, birbirinden farklı türde YEK’ler, depolama elemanları ve elektronik devre topolojileri tercih edilmiştir.

Tablo 1.1. Tez Kapsamında Ele Alınan Başlıkların İlgili Literatürdeki Durumu

Merkezi Enerji Akış Yönetimi	Şarj / Deşarj Denetimi	Şarj Durumu Belirleme	PV Panel Denetimi	Çalışma Sayısı
✓				73
	✓			102
		✓		27
			✓	86
✓	✓			48
	✓	✓		19
		✓	✓	12
	✓		✓	53
✓		✓		9
✓			✓	31
✓	✓	✓		8
	✓	✓	✓	11
✓	✓		✓	23
✓		✓	✓	5
✓	✓	✓	✓	5

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etmek üzere PV paneller tercih edildiğinde, verimleri oldukça düşük olan bu sistemlerin her durumda, sürekli olarak azami verimle çalışabilmesi için denetimlerinin hassas bir şekilde yapılması gerekmektedir. Literatürde maksimum güç noktası takibi (MGNT) olarak geçen bu denetim probleminin, birçok farklı çalışmada farklı yaklaşımlar ile ele alındığı görülmektedir (Adhikari, 2013: 53; Adhikari ve Li, 2014: 1273; An ve Lu, 2015: 917; Biswas vd., 2016: 1535; Cai vd., 2018: 7711; Chen, 2012: 17; Chiang vd., 2009: 4345; Costabeber vd., 2015: 696; Dong, 2016: 14; Fouad vd., 2017: 1506; Gules vd., 2008: 2764; Jain ve Singh, 2017: 41; Karthikeyan ve Gupta, 2017: 471; Khajesalehi vd., 2015: 897; Killi ve Samanta, 2015: 5550; Kotra ve Mishra, 2017: 3641; Koutroulis vd.,

2001: 46; Kulaksiz, 2007: 30; Kumar vd., 2017: 2562; Lopez-Lapena, 2018: 9668; Nakir, 2012: 10; Natsheh vd., 2013:193; Nejabatkhah vd., 2012: 2310; Olteanu, 2016: 33; Peter ve Agarwal, 2012: 4888; Rezkallah vd., 2015: 1391; Salve, 2014: 18; Sekhar ve Mishra, 2016: 1661; Shaw, 2015: 26; Thang vd., 2015: 1387; Y. Wang vd., 2016: 174; Y. Zhang vd., 2012: 3).

Enerji depolama sistemleri için bataryalar tercih edildiğinde, ömürlerinin verimli kullanılabilmesi ve aşırı şarj veya derin deşarj gibi tehlike oluşturabilecek durumların meydana gelmesinin engellenmesi için ise batarya yönetiminin çok iyi yapılması gerekmektedir. Literatürde batarya yönetim sistemleri olarak geçen bu denetim probleminin birçok farklı çalışmada farklı yaklaşımlar ile ele alındığı görülmektedir (Adhikari ve Li, 2014: 1273; Alam vd., 2013: 3878; Bastos vd., 2014: 2490; Çalışkan, 2011: 33; Das ve Agarwal, 2015: 4721; Dong, 2016: 16; Garcia-Trivino vd., 2018: 731; Garcia vd., 2014: 1110; Jha vd., 2017: 904; Kai Sun vd., 2011: 3037; Ke vd., 2015: 1141; Kewat vd., 2018: 395; Kollimalla vd., 2014: 1139; Kubalik vd., 2014: 346; J. Li vd., 2015: 6; Madaci vd., 2015: 6; Maheswari vd., 2017: 1089; Mahmood ve Jiang, 2017a: 6362; Mahmud vd., 2017: 2663; Natsheh vd., 2013: 193; Nejabatkhah vd., 2012: 2312; Nor vd., 2018: 1141; Rusch ve Stahlkopf, 2009: 4; Saxena vd., 2018: 6594; Sechilariu vd., 2013: 1611; Sun vd., 2016: 2604; Tavlaşoğlu, 2015: 8; Teleke vd., 2010: 118; Thang vd., 2015: 1388; Thirugnanam vd., 2018: 6775; L. Wang vd., 2018: 3385; Ye Zhang vd., 2012: 2; Zeraati vd., 2016: 3583). Ayrıca batarya yönetimi için kilit bir veri olan SoC verisinin elde edilebilmesi için de birçok çalışma yapıldığı görülmektedir (Adhikari, 2013: 75; Alam vd., 2016: 1565; Gavrilita vd., 2015: 18; Ge vd., 2018: 2269; Golsorkhi vd., 2017: 2839; X. Li vd., 2013 : 467; Lin vd., 2016: 1892; Madaci vd., 2015: 7; Mahmood ve Jiang, 2017b: 1904; Özden, 2014: 45; Sharma ve Mishra, 2018: 530; Sun vd., 2016: 2605; Wijewardana, 2016: 52; Xiong Liu vd., 2011: 280; Ye Zhang vd., 2012: 3).

Bir enerji sisteminde birimlerin farklı durumları için sistemin farklı çalışma durumlarının belirlenmesi ve bu doğrultuda ilgili birimlerin ve bu birimler arasındaki güç akışının da iyi yönetilmesi gerekmektedir. İlgili literatür incelendiğinde, bu enerji yönetimini gerçekleştirmek üzere birçok çalışmanın yapıldığı görülmektedir (Basaran vd., 2017: 645; Dali vd., 2010: 2591; Delghavi vd., 2016: 1482; Goli ve Shireen, 2014: 1423; Indu Rani vd., 2013: 3192; Kai Sun vd., 2011: 3034; Karimi vd., 2016: 3527; Khorsandi vd., 2014: 794; J. Li vd., 2015: 4; Mahmood ve Jiang, 2017a: 6365; Mao vd., 2014: 1330; Marra vd., 2014: 978; Serban ve Serban, 2010: 2986; Seul-Ki Kim vd., 2008: 1678; Sharma ve Mishra, 2018: 533; Sota vd., 2014: 839; Xiong Liu vd., 2011: 283; Ye Zhang vd., 2012: 4; Zeng vd., 2015: 3496; J. Zhao vd., 2017: 46; H. Zhu vd., 2014: 3600).

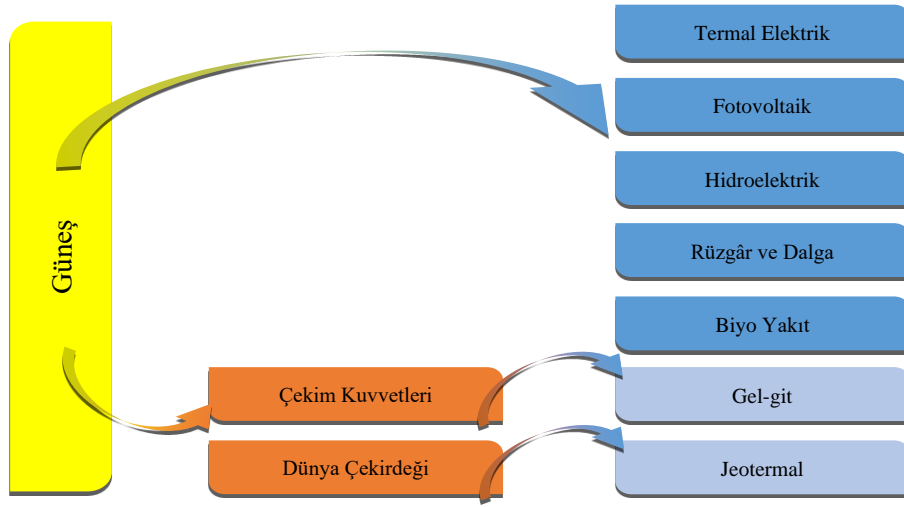
Bu tez çalışması; YEK tabanlı, şebekeden bağımsız, PV panellerden meydana gelen bir enerji üretimi birimi, bataryalardan meydana gelen bir enerji depolama ve destek birimi içeren, PV paneller için MGNT denetiminin bataryalar için şarj/deşarj denetiminin geliştirilen bulanık mantık ve bulanık mantık Oransal – İntegral – Türevsel (Proportional – Integral – Derivative – PID) denetleyici tabanlı denetim algoritmaları kullanılarak gerçekleştirildiği, sistem çalışma durumlarının otonom olarak belirlendiği ve bu durumlardaki enerji akışının gereksinimleri karşılayacak şekilde yine otonom olarak yapıldığı ve ayrıca geliştirilen algoritma sayesinde SoC verisinin de belirlendiği bir enerji yönetim sisteminin benzetim ve gerçek hayat uygulama çalışmalarını ihtiva etmektedir. Geliştirilen YEK tabanlı enerji yönetim sisteminin, esnek ve uyarlanabilir güç sistemi topolojisi, otonom ve merkezi enerji akış yönetimi, doğrusal olmayan sistem parametreleri olan YEK uygulamalarında yetersiz kalan klasik denetleme algoritmaları yerine geliştirilen bulanık mantık veya bulanık mantık PID tabanlı denetleme algoritmaları gibi avantajları sayesinde literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında Bölüm 2’de YEK’ler ve PV sistemler, Bölüm 3’te enerji depolama sistemleri ve bataryalar, Bölüm 4’te enerji yönetim sistemleri ve denetim yöntemleri, Bölüm 5’te geliştirilen YEK tabanlı enerji yönetim sistemi, Bölüm 6’da YEK tabanlı enerji yönetim sistemi benzetim çalışmaları ve sonuçları, Bölüm 7’de YEK tabanlı enerji yönetim sistemi uygulama çalışmaları ve sonuçları ele alınmıştır. Bölüm 8’de ise elde edilen sonuçlar hakkında genel bir değerlendirme yapılarak çalışmanın geliştirilebilmesi için yapılabilecek olası ileri çalışma önerilerine yer verilmiştir.

2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI VE PV SİSTEMLER

2.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

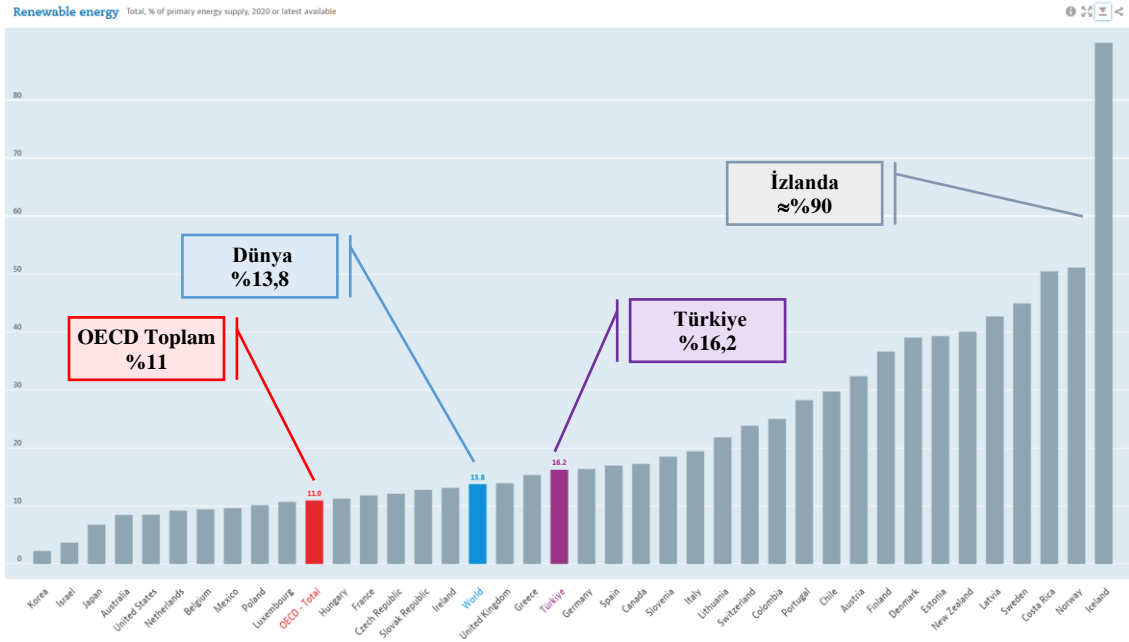
YEK'ler, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun'da; "Hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal, biyokütle, biyogaz, dalga, akıntı enerjisi ve gel-git gibi fosil olmayan enerji kaynakları" olarak tanımlanmaktadır. Oranı değişkenlik göstermekle birlikte tanımda bahsi geçen bu enerji türlerinin tamamı, Şekil 2.1'de görüldüğü üzere, güneş kaynaklıdır. Geliştirilen farklı dönüşüm yöntem ve süreçleri, asıl ve tek kaynak olan güneşten çeşitli enerji türlerinin elde edilebilmesini sağlamaktadır (Kaltschmitt vd., 2007: 24).



Şekil 2.1. YEK Türleri ve Enerji Kaynakları

Kaynak: (Freris ve Infield, 2008: 19)

Fosil yakıtların gerek bilinen rezerv miktarlarıyla dünya enerji ihtiyacını daha uzun süre karşılayamayacağı, gerekse çevreye olan zararlı etkilerinin oldukça fazla olduğu gerçeği dikkate alındığında, YEK'e olan gereksinim daha net bir şekilde ortaya çıkmaktadır (Acaroğlu, 2013: 18). Şekil 2.2'de birincil enerji kaynakları içerisinde YEK'lerin kullanım oranları görülmektedir.



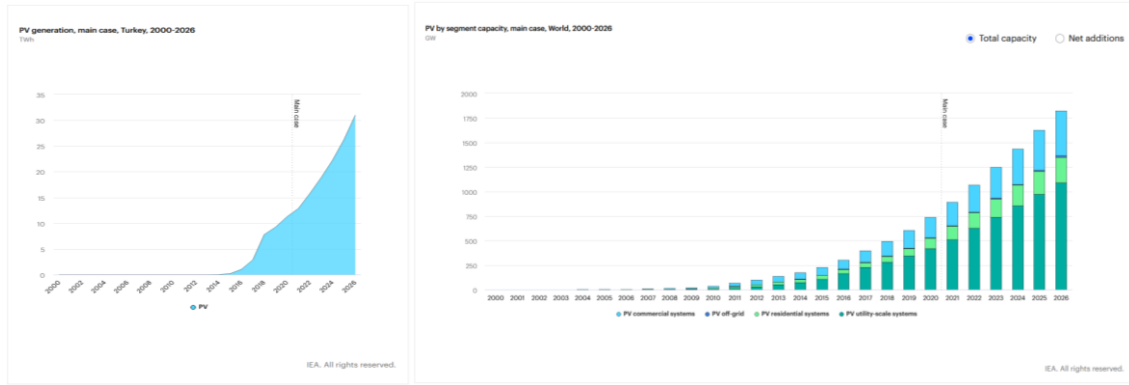
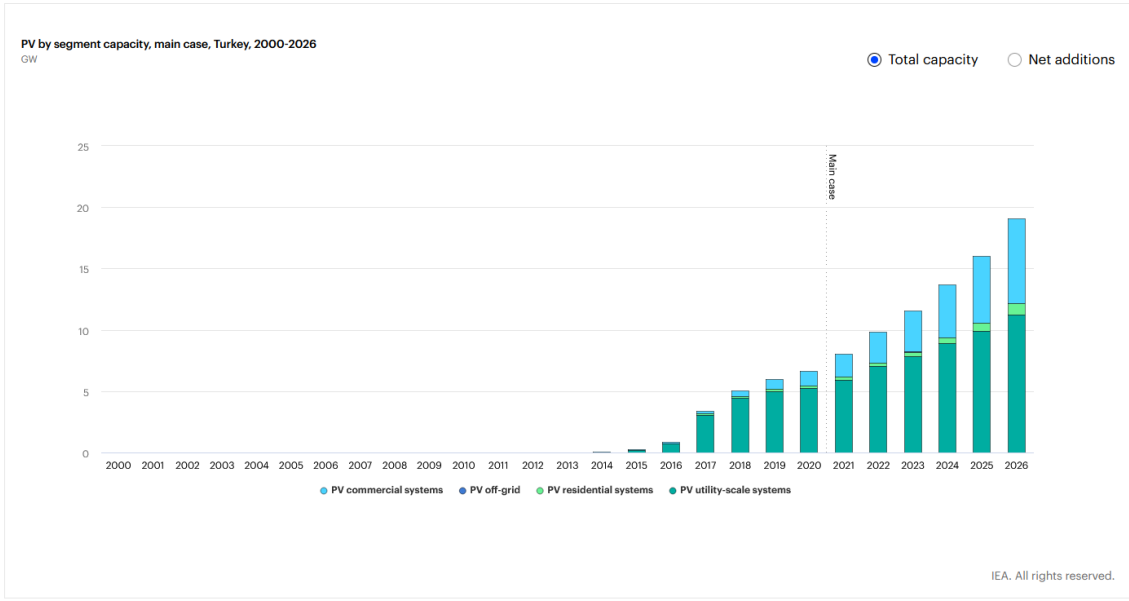
Şekil 2.2. OECD Ülkeleri İçin Birincil Enerji Kaynakları İçerisinde YEK'lerin Kullanım Oranı

Kaynak: (Renewable energy | Energy | OECD iLibrary, 2022)

Buna göre, birincil enerji kaynakları içerisinde YEK'lerin kullanım oranı bakımından ülkemiz, Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (Organisation for Economic Co-operation and Development – OECD) ülkeleri ve dünya ortalamasının üzerindedir.

Tükenmeyen ve sınırsız bir enerji kaynağı olmasının yanı sıra nispeten düşük işletme maliyetleri gibi avantajlarından dolayı güneş enerjisinin YEK'ler arasında kullanım oranı giderek artmaktadır. Şekil 2.3'te verilen, 2000 yılından günümüze Türkiye'de ve dünyada PV sistemler kullanılarak elde edilen ve 2026 yılına kadar ulaşılması öngörülen enerji miktarları, bu artışın bir göstergesi olarak görülebilir.

Ayrıca, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre; 2022 yılı Eylül ayı sonu itibarıyla ülkemizdeki kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı; %30,9'u hidrolik enerji, %24,7'si doğal gaz, %20,6'sı kömür, %10,9'u rüzgâr, %8,8'i güneş, %1,6'sı jeotermal ve %2,4'ü ise diğer kaynaklar şeklindedir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Bilgi Merkezi, 2023).

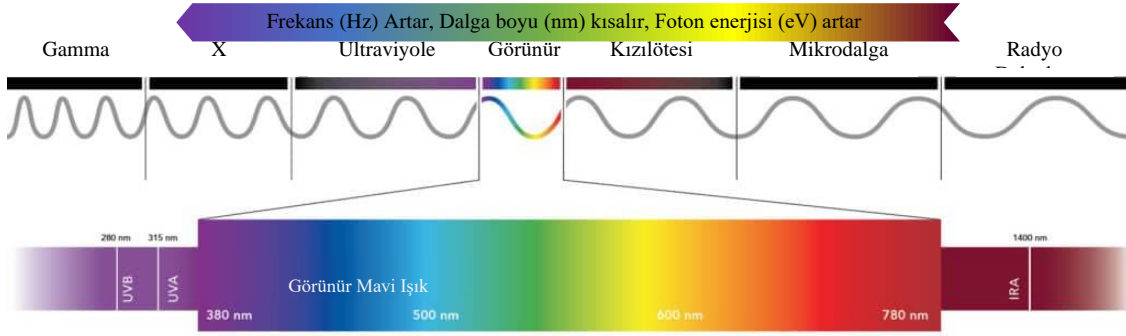


Şekil 2.3. Türkiye’de ve Dünyada PV Sistemler Kullanılarak Elde Edilen Enerji Miktarları

Kaynak: (Energy Statistics Data Browser, IEA, 2022)

Bir nükleer santral gibi çalışan güneş, nükleer enerji dışında diğer tüm enerji kaynaklarının da ana kaynağı konumundadır. Ancak, güneşte açığa çıkan enerjinin yalnız küçük bir kısmı yeryüzüne ulaşabilmektedir. Yüzeyindeki ışınım miktarı $3,846 \times 10^{26}$ W olan güneş, oldukça uzakta olması (yaklaşık olarak 150 milyon kilometre) nedeni ile dünyaya ancak 1367 W/m^2 (bu değer aynı zamanda güneş sabitidir) ışınım ulaştırabilmektedir. Dünyaya ulaşan ışınım miktarı bu denli azalmasına rağmen canlılar için hala oldukça ölümcül bir değerdedir. Bu ölümcül ışınım miktarının büyük bir kısmı neyse ki ozon tabakası tarafından yansıtılmakta ve yine bir kısmı da atmosfer tarafından emilmektedir. Böylelikle, yeryüzüne ulaşan ışınım miktarı güneşin pozisyonuna bağlı olarak ancak $0 - 1100 \text{ W/m}^2$ değerleri arasında değişim gösterebilmektedir. (McEvoy vd., 2012: 23; Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM), 2014; Zekai, 2008: 27).

Yeryüzüne ulaşan güneş ışığı, farklı frekanstaki elektromanyetik dalgaların bileşiminden meydana gelmektedir. Bu elektromanyetik dalgalar içerisinde yer alan görünür ışınlar dünya için gerekli olan enerjiyi sağlamaktadır. Güneşten dünyamıza gelen ışığın dalga boyu, frekans ve foton enerjileri Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Işık Tayfi

Işığın bir yerden başka bir yere gitmesi dalga boyu ile ifade edilmektedir. Işınının dalga boyu küçüldükçe frekansı artmakta ve bununla birlikte enerji kaynağı olarak kullanılabilir olan foton enerjisi de artmaktadır (Luque ve Hegedus, 2003: 102).

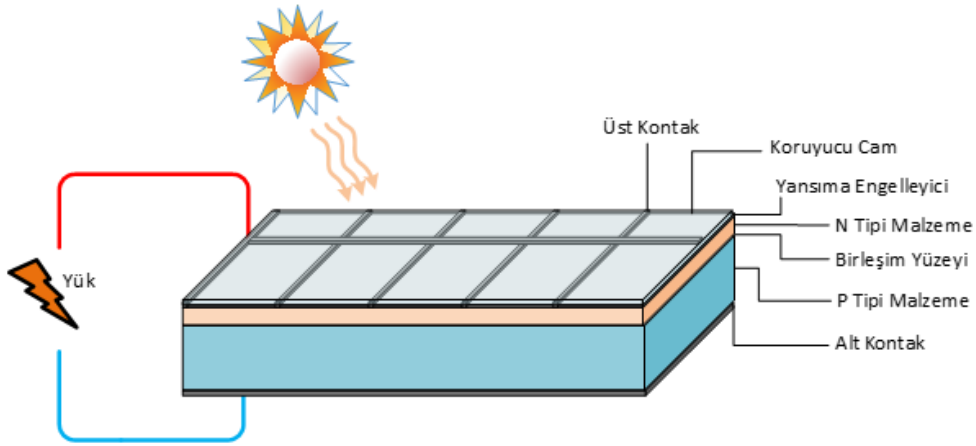
2.2. Fotovoltaik Sistemler

PV sistemler, geliştirildiği farklı yarı iletken malzemeler ile fotovoltaik etkiyi kullanarak ışık enerjisini doğrudan elektrik enerjisine (Doğru Akım, DA – DC) dönüştüren bir teknolojidir. Ancak 1900'lerin ortalarında günümüz PV sistemlerinde kendisine yer bulan olan fotovoltaik etki kavramı, 1839 yılında Fransız bilim adamı Edmund Becquerel tarafından bulunmuştur (Salve, 2014: 1). Yarı iletken malzemelerin birleşim yüzeyine düşen foton, enerjisini bir elektrona vererek düştüğü yüzeyin atomları ile etkileşime girmektedir. Becquerel, aldığı bu enerji sayesinde daha yüksek enerji durumuna yükseltelen elektronun atomdan serbest kalabilmesi durumunu fotovoltaik etki olarak tanımlamıştır (Sayema Shahiitul, 2011: 4). Bu serbest elektronların sağladığı potansiyel ise elektrik akımı olarak değerlendirilebilmektedir (Goswami, 2022: 519).

PV sistemler, üzerine düşen güneş ışığını elektriğe dönüştüren, güneş pili olarak da adlandırılan, PV hücrelerden meydana gelmektedir. Bu PV hücrelerin çıkış gerilimleri bir sistemi beslemek için oldukça yetersiz olduğundan, daha yüksek güç çıkışı elde etmek amacıyla çok sayıda (36 – 72) güneş pili seri bağlanarak, güneş pili modülü veya PV modül adı verilen yapılar oluşturulmaktadır. Kullanılan sistemin güç gereksinimlerine bağlı olarak bu modüller de birbirlerine seri, paralel veya seri-paralel olacak şekilde bağlanabilmektedir (Öztürk, 2008).

Seri bağlantı ile çıkış akımı aynı kalmakta ve çıkış gerilimi seri bağlanan modül miktarı kadar artmaktadır. Paralel bağlantı ile de çıkış gerilimi aynı kalmakta ve çıkış akımı paralel bağlanan modül miktarı kadar artmaktadır. Modüllerin fiziksel ve elektriksel olarak bir araya getirilmesi ile oluşan yapıya panel adı verilmektedir. Yine kullanılan sistemin güç gereksinimlerine bağlı olarak bu paneller de birbirlerine seri, paralel veya seri-paralel olacak şekilde bağlanabilmektedir. Çalışma ilkeleri aynı olmakla birlikte farklı yarı iletken malzemeler ve yöntemler kullanarak güneş pilleri tekli kristal, çoklu kristal ve ince film olarak üretilebilmektedir (Küpeli, 2005: 67).

Güneş pilleri, bir bölgesi P tipi, diğer bölgesi N tipi katkı malzemesi ile katkılandırılan yarı iletken malzemelerin birleşiminden meydana gelmektedir. N tipi malzeme üzerinde üst kontak ve üst kontakın üzerinde ise fotonların yansımalarını engelleyen yansımaya engelleyici kaplama yer almaktadır. Güneş pilini dış etkenlerden korumak için koruyucu cam, saydam bir yapıştırıcı ile yansımaya engelleyiciye yapıştırılmıştır. N tipi malzeme ile P tipi malzeme arasında birleşim bölgesi yer almaktadır. N tipi malzemenin üzerine düşen güneş ışığı fotovoltaiik etki sayesinde elektron-delik çiftleri oluşturmakta ve böylelikle P-N uçlarında bir potansiyel fark meydana gelmesi sağlanmaktadır. P tipi malzemenin altında ise alt kontak yer almaktadır. Yük ise üst kontak ile alt kontak arasında bağlanmaktadır. Bir güneş pilinin kesiti Şekil 2.5'te verilmiştir (Goswami, 2022: 534).



Şekil 2.5. Bir Güneş Pilinin Kesiti

Bir PV panelin üretimi ve ömrünü tamamladıktan sonra geri dönüştürülmesi veya atıklarının bertaraf edilmesi gibi süreçler göz ardı edilirse, ki bu konular ile ilgili yapılan birçok araştırma mevcuttur (Vácha vd., 2021: 6; Xie vd., 2018: 658; Yıldız vd., 2020: 9), güneşten elde edilen enerjinin çevreyi olumsuz yönde etkileyecek hiçbir etkisinin olmadığı söylenebilir.

Bu gibi avantajlarına ek olarak, PV sistemleri üstün kılan diğer özellikler şu şekilde sıralanabilir (Deveci ve Kasnaoğlu, 2016: 12634; Kocaman, 2003: 194);

- Tamamen sessiz çalışmaktadır,
- Hareket eden parçalar içermemektedir,
- Çalışma sırasında herhangi bir zararlı atık yaymamaktadır,
- Şebekeden bağımsız sistemler için uygundur,
- Kurulumu kolaydır ve tasarımı iyi yapılmış bir sistemde enerji ihtiyacına göre ölçek değişiklikleri kolaylıkla yapılabilmektedir,
- Zor iklim koşullarına karşı daha az hassastır,
- Çok az bakım gerektirir, kullanım ömürleri uzundur,
- Taşınabilir bir kaynaktır.

PV panellerin güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme verimi, konumlandırıldığı yerdeki eğim açısı, gölgeleme, toz, güneş ışınım miktarı ve sıcaklık gibi çevresel etkenler nedeni ile %6 – 20 aralığında sınırlı kalmaktadır (Karafil, 2016: 49).

PV güç sistemleri genellikle üretilen enerjinin kullanım şekline, üretilen gerilimin cinsine, güç bakımından büyüklüğüne ve diğer enerji kaynakları ile bağlantı durumuna göre sınıflandırılmaktadır. PV güç sistemi, DC ve/veya Alternatif Akım (AA – AC) üretecek şekilde, şebekeden bağımsız, karma (hibrit) ve şebeke bağlantılı olacak şekilde çalıştırılabilmektedir. Ayrıca PV sistemler, küçük (10 kW'a kadar olan güçler), orta (10 kW ile 500 kW arası) ve büyük güçlü (500 kW'tan büyük) olarak da sınıflandırılmaktadır.

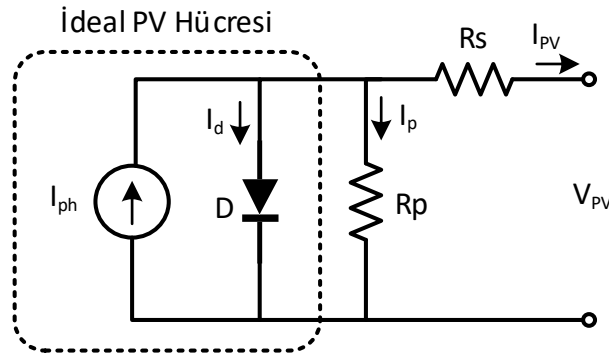
PV panel üretici firmaları, kataloglarında laboratuvar ortamlarında gerçekleştirdikleri testler sonucu, Standart Test Koşulları (STC, Standard Test Condition) olarak adlandırılan 1000 W/m² güneş ışınım şiddeti, 25 °C hücre sıcaklığı ve hava kütle oranı (AM) 1,5 şartlarındaki bir PV panelin elektriksel değerlerini vermektedir. STC dışındaki değişimlerde PV panelin elektriksel değerleri bilinmemektedir. Değişen atmosferik şartlarda da PV panelin elektriksel değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Özellikle şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı sistemlerin tasarımında değişen atmosferik şartlar göz önünde bulundurularak hesaplamaların yapılması daha doğru sonuçlar vermektedir (Besli vd., 2010: 27; Islam vd., 2014: 1).

Çevresel etkenlerden kolaylıkla etkilenme ve verimlerinin az olması gibi olumsuzlukları nedeni ile PV sistemler, güç dönüştürücüleri, maksimum güç noktası takibi gibi birtakım ek güç sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. PV sistemlerin bu olumsuzluklarına ilerleyen bölümlerde

yer verilmiştir. PV panellerin farklı durumlardaki cevabının geliştirilen sistem üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi için ise PV panel matematiksel modelinden faydalanılmaktadır.

2.2.1 PV Panel Matematiksel Modeli

Bir güneş pili hücrenin eşdeğer devresi, bu hücrelerin bir araya gelmesi ile oluşturulan PV panellerden elde edilen enerjinin incelenebilmesi için kullanılmaktadır. Güneş pili hücreleri, N tipi ve P tipi yarı iletken malzemeler kullanılarak geliştirildiğinden modellenmesi için karmaşık olmayan ve benzer yapıya sahip olan diyot tercih edilmektedir. Fiziksel yapısının yanı sıra bir güneş pili hücrenin akım-gerilim karakteristiği güneş ışınımı olmadığı durumda diyot ile oldukça benzerlik göstermektedir. Güneş pili hücrelerinden elde edilen enerji akım kaynağı ile modellenirken, kayıplar ise seri ve paralel dirençler ile modellenmektedir. İdeal bir güneş pili hücrenin elektriksel eşdeğer devresi Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Islam vd., 2014: 2; W. Zhu vd., 2011: 731).



Şekil 2.6. PV Hücrenin Eşdeğer Devre Modeli

PV hücrenin PV akımı (I_{ph}), hücre üzerine düşen güneş ışınım miktarı ile doğru orantılıdır ve Eşitlik 2.1 ile elde edilebilmektedir:

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i \cdot (T_c - T_r)] \cdot \frac{G}{G_r} \quad (2.1)$$

Burada;

I_{ph} : PV hücrenin PV akımı

I_{sc} : STC'deki kısa devre akımı

K_i : Kısa devre akımının sıcaklık katsayısı ($0,0017A/^{\circ}C$)

T_c : PV hücre sıcaklığı ($^{\circ}K$)

T_r : Referans sıcaklık ($25^{\circ}C$ için $298,15^{\circ}K$)

G: W/m² deki güneş ışınım miktarı

G_r: Referans güneş ışınım miktarını (1000W/m²) göstermektedir.

Diyot akımı (I_d), gerilime ve ters sızıntı akımına (I_o) bağlı olarak Eşitlik 2.2'deki gibi bulunmaktadır:

$$I_d = I_o \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V_d}{A \cdot k \cdot T_c}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Burada;

q: Elektrik yükü (1,602x10⁻¹⁹C)

k: Boltzman sabiti (1,3806505x10⁻²³J/K)

A: Diyot kalite faktörünü temsil etmektedir.

Paralel direnç (R_p) geçen akımın denklemini Eşitlik 2.3:

$$I_p = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V_{PV} + I_{PV} \cdot R_s}{R_p} \quad (2.3)$$

PV hücrenin çıkış akımı ve gerilimi Eşitlik 2.4, Eşitlik 2.5 ve Eşitlik 2.6:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (2.4)$$

$$V_{PV} = V_D - I_{PV} \cdot R_s \quad (2.5)$$

$$I_{PV} = I_{ph} - \left[e^{\left(\frac{q \cdot (V_{PV} + I_{PV} \cdot R_s)}{A \cdot k \cdot T_c} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{PV} + I_{PV} \cdot R_s}{R_p} \quad (2.6)$$

ile matematiksel model elde edilebilir (Krishan vd., 2013: 647; Villalva vd., 2009: 1201).

2.2.2 Çevresel Etkenlerin PV Paneller Üzerindeki Etkisi

PV paneller, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan elektronik cihazlardır. Dolayısı ile ışınım, sıcaklık gibi çevresel etkenlerdeki değişim çıkış gücünde de değişimlere neden olmaktadır.

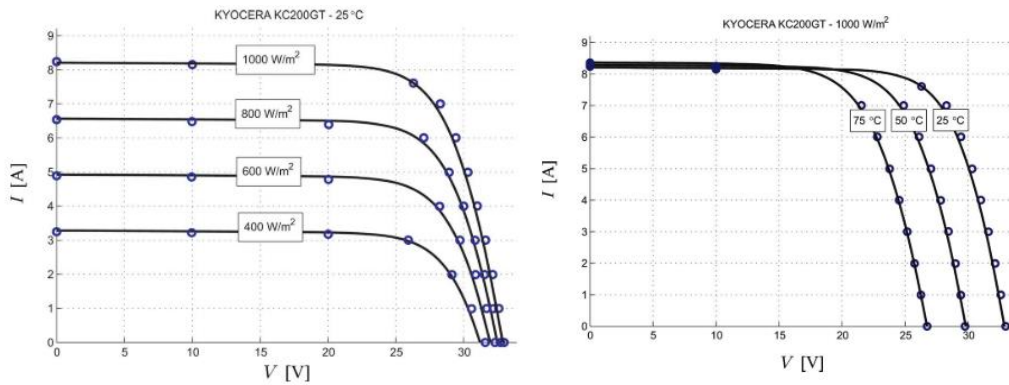
Yapısında bulunan katkılandırılmış P ve N tipi malzemeler sayesinde çıkışında elde edilen gerilim ve akım ile üzerine düşen ışınım miktarı arasında karmaşık bir bağlantı bulunmaktadır. Öyle ki, matematiksel modelinden de görüldüğü üzere, bir PV panelden elde

edilen gerilim ve akım, hücre üzerine düşen güneş ışığının bir fonksiyonudur. Diğer bir değişle, üzerine düşen ışınım miktarı, PV panel çıkış gücünü doğrudan etkilemektedir.

Fakat yapılan araştırmalar, sanılanın aksine, ışınım miktarı ne kadar fazla olursa o kadar fazla güç üretilebilir fikrinin doğru olmadığını göstermektedir. Belirli bir değere kadar çıkış gücüne doğru orantılı olarak etki eden ışınım miktarı, çok yükseldiği takdirde serbest elektron üreten hücrelerin doyuma ulaşmasına neden olmakta ve bu nedenle çıkış gücü de önemli ölçüde azalmaktadır (Islam vd., 2014: 2).

Matematiksel modeline bakıldığında PV panellerden elde edilen gücü büyük oranda etkileyen diğer bir çevresel etkenin ise sıcaklık olduğu görülmektedir. STC’de kullanılan 25°C’nin altındaki veya üzerindeki sıcaklık değerlerinin PV panel çıkış gücünü olumsuz olarak etkilediği yapılan çalışmalar sonucunda belirlenmiştir (Villalva vd., 2009: 1200).

Bu iki büyük çevresel etkenin, PV panel çıkışındaki güce olan etkisi şöyle özetlenebilir. Işınım miktarı arttıkça PV panel akımı da artmakta, bununla birlikte panel gerilimi ise çok az bir artış göstermektedir. Dolayısı ile PV panel gücü de ışınım miktarı ile orantılı olarak artmaktadır. PV panel sıcaklığı arttıkça PV panel akımı bir miktar artmakta, fakat gerilimi ise düşmektedir. Gerilimdeki düşüş akımdaki artışa oranla çok daha büyük olduğundan PV panel çıkış gücü ise sıcaklık ile orantılı olarak azalmaktadır. Bu değişimler Şekil 2.7’de görülmektedir. Bu durumlar göz önüne alınarak iki çevresel etken değerlendirildiğinde, yüksek ışınım, düşük sıcaklık koşullarının PV sistemler için en ideal kombinasyonu oluşturduğu görülmektedir (Karafil, 2016: 49). Fakat tabii ki belirli bir sıcaklık değerinin altına inilmesinin veya belirli bir ışınım miktarının üzerine çıkılmasının da yine PV panel veriminin düşmesi ile sonuçlanacağı da unutulmamalıdır. Uç hava koşullarında, bu limitlerin aşılması için gölgeleme sistemleri kullanılabilir.



Şekil 2.7. PV Panel Çıkış Akım ve Geriliminin Sıcaklıkla ve Işınım Miktarı ile Değişimi

PV panellerin çıkış gücünü, dolayısı ile verimini etkileyen diğer çevresel etkenler ise eğim açısı, konumlandırıldığı bölgenin bakışı, gölgelenme, tozlanma ve çıkışına bağlanan yükteki değişimler vb. olarak sayılabilmektedir (Fouad vd., 2017: 1501).

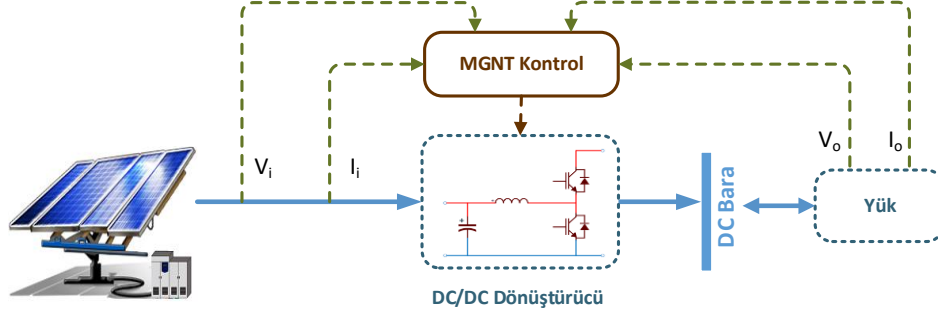
Çevresel etkenlerin üzerindeki bu gibi büyük etkilerden dolayı düşük verimle çalışan, değişken ve kararsız bir enerji kaynağı olarak addedilen PV sistemler, DC-DC dönüştürücü gibi elektronik devreler ve Maksimum Güç Noktası Takibi gibi kontrol uygulamaları ile bu olumsuzluklarından sıyrılarak tercih edilen bir YEK halini almaktadır.

2.3. PV Sistemlerde Maksimum Güç Noktası Takibi

Bir PV sisteminin veriminin çevresel etkenlere bağlı olarak büyük oranda değiştiği bu doğrultuda çıkış gücünün de değişkenlik gösterdiğinden önceki bölümde bahsedilmiştir. Tipik bir PV sistemde, PV paneller, sistemin toplam maliyetinin %57'sine, tekabül etmektedir (Hua ve Lin, 2003: 1130). Bir PV sistem için yapılan ilk yatırım maliyetlerinin de oldukça yüksek olduğu göz önünde bulundurulduğunda, PV panellerin herhangi bir çevresel etkenden bağımsız olarak azami güç elde edebilecek şekilde maksimum güç noktasında (MGN) çalıştırılması daha da önem kazanmaktadır. Çevresel etkenler değiştiğinde, bir PV sisteminin MGN'si de değişmektedir. Değişen sistem parametreleri sonrasında bu yeni MGN'nin yeniden bulunması gerekmektedir. MGNT sistemleri, sürekli olarak bir sonraki yeni MGN'yi bularak, PV panellerden azami güç elde etmeyi amaçlamaktadır.

Bağlı olan yüke sürekli olarak maksimum güç aktarabilmek için panel karakteristiklerini ayarlayan DC-DC dönüştürücü devreleri ve kontrol algoritmaları içeren MGNT sistemleri, bir PV paneli sürekli olarak azami verimle ($\approx 98\%$) çalışmaya zorlayan sistemlerdir. Yapılan çalışmalar, MGNT sistemlerinin panel verimini %45'e kadar arttırabildiğini göstermektedir (Koutroulis vd., 2001: 48; Santos vd., 2006: 776).

Elde edilen enerji miktarının gün içinde değişkenlik gösterdiği PV sistemler, bağlanan yükün güç talebinin kararlı bir şekilde karşılanabilmesi için bazı ek sistemlere gereksinim duyabilmektedir. Şekil 2.8'de de görüldüğü üzere devreye bir adet DC-DC dönüştürücü kullanılarak bağlı olan yük(ler)e istenen miktarda güç kararlı bir şekilde aktarılabilir. PV panellerden elde edilen gerilim değerini giriş, yükün talep ettiği gerilim değerini ise çıkış olarak değerlendiren dönüştürücünün yapısı ve tasarımı ise, giriş ile çıkış arasındaki farka göre belirlenmektedir (Mohan vd., 1995: 161).

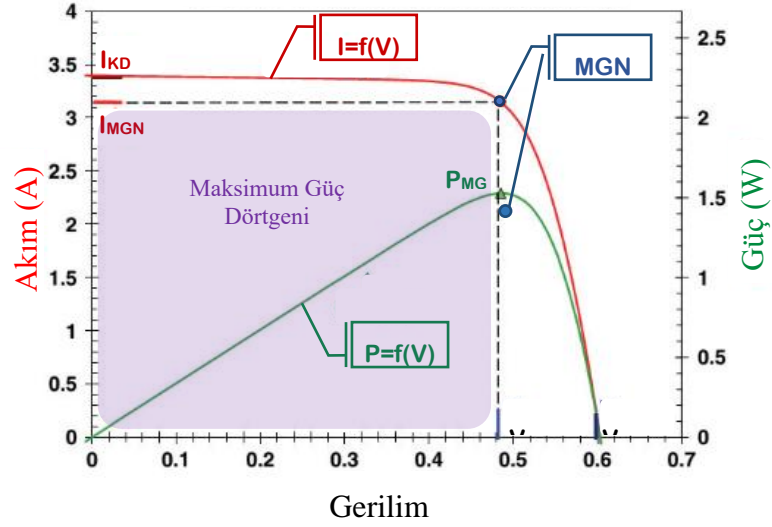


Şekil 2.8. MGNT Destekli Bir PV Sistemin Genel Şeması

Tipik Bir PV hücresinin, akım-gerilim ($I - V$) ve güç-gerilim ($P - V$) karakteristik eğrileri Şekil 2.9'da görülmektedir. Daha önce bahsi geçen etkenlere bağlı olarak PV hücresi bu eğriler üzerindeki herhangi bir noktada çalıştırılabilmektedir. Burada üç önemli nokta bulunmaktadır; güneş pilinin elektriksel performansını belirlemekte de kullanılan iki parametre olan açık devre gerilimi V_{oc} ve kısa devre akımı I_{sc} ve PV hücrenin o anki koşullara bağlı olarak azami güç verebileceği MGN.

Maksimum ışınım altında çıkış uçları kısa devre edildiğinde PV hücrenin sağlayabileceği maksimum akım değeri olan kısa devre akımı, PV hücre matematiksel modelinde kullanılan I_{ph} foto-akımını elde edebilmek için önemli bir parametredir. Maksimum hücre gerilimi ise, yine maksimum ışınım altında çıkış uçları boşa bırakıldığında PV hücrenin sağlayabileceği maksimum gerilim değeridir. Kısa devre ve açık devre şartlarında güç sıfırdır.

Güneş pili, maksimum gerilim V_m ve maksimum akım I_m durumunda maksimum güç üretmektedir. Eğrilerde bulunan maksimum akım ve maksimum gerilim noktalarının kesiştiği noktalar MGN olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.9'da gösterilen maksimum güç dörtgeni (taralı alan) ise maksimum güç noktasında üretilen gücü temsil etmektedir. Bunun yanı sıra, Doldurma Faktörü (Fill Factor - FF) adı verilen, güneş hücresinin kalitesinin bir ölçüsü olarak da değerlendirilebilecek, bir önemli parametre daha bulunmaktadır. Doldurma faktörü, PV hücresinin verebileceği maksimum gücün kısa devre akımı ve açık devre gerilimi değerlerinin çarpımı ile elde edilen teorik maksimum güce oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu değer 0,5 ile 0,82 arasında olması gerekirken 0,7 üzerinde olması tercih sebebidir (Arjyadhara ve Chitralekha, 2013: 218).



Şekil 2.9. İdeal Bir PV Pilin Akım – Gerilim (I – V) ve Güç – Gerilim (P – V) Karakteristikleri

Kaynak: (Zekai, 2008: 248)

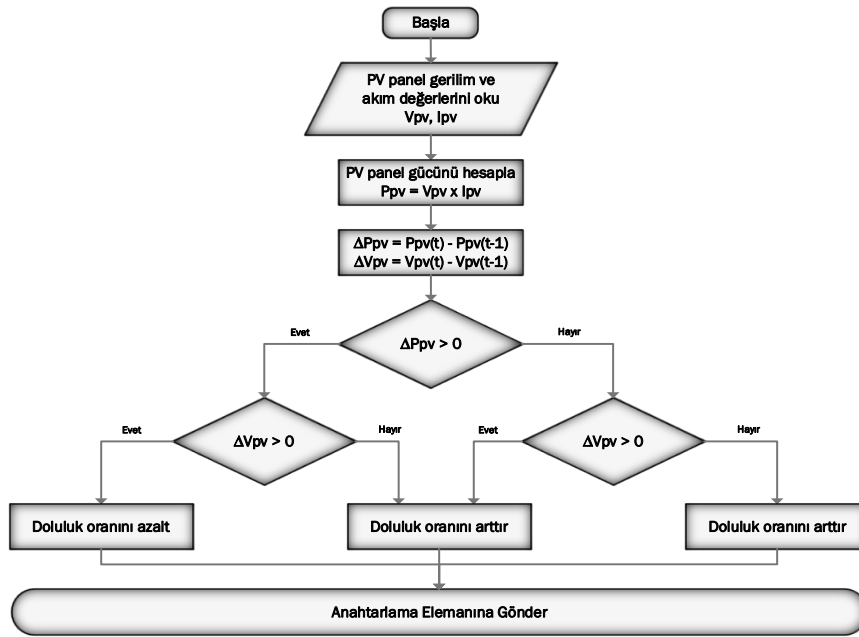
MGNT algoritmalarının problem tanımı, Şekil 2.9’da görüldüğü üzere herhangi bir andaki ışınım ve sıcaklık değerleri için akım – gerilim (I – V) veya güç – gerilim (P – V) eğrisi üzerinde tek bir değere karşılık gelen anlık çalışma noktasının çevresel etkenlerden bağımsız olarak tespit edilmesi ve bu noktanın sürekli olarak MGN’ye yakınlştırılması olarak görülmektedir (Altas ve Sharaf, 2008: 391).

Bir PV panelden azami güç elde edebilmek üzere PV paneli sürekli olarak maksimum güç noktasında çalıştırmaya zorlayan çeşitli MGNT yöntemleri, probleme yaklaşım şekilleri bakımından dolaylı ve doğrudan olmak üzere iki ana grupta ele alınabilmektedir. Verimlerinin oldukça düşük olabilmesi nedeni ile kendisine daha az yer bulan dolaylı yöntemlerde, PV paneller için daha önceden yapılmış deneysel çalışmaların sonuçları ve PV karakteristik değerleri belirli hesaplamalardan geçirilerek MGN tahmin edilebilmektedir (Faranda vd., 2008: 446). Doğrudan yöntemlerde ise PV çıkış gerilim, akım ve gücü sürekli olarak okunmakta, bu değerler bir önceki değerler ile karşılaştırılmakta ve PV panel çalışma noktasını MGN’ye ulaştırmak üzere dönüştürücü devreler için referans anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir.

Doğrudan yöntemler, karmaşıklık, sensör gerekliliği, MGN’ye yakınsama hızı, maliyet, etkin çalışma aralığı gibi parametrelerden dolayı çeşitlilik göstermekle birlikte (Esrar ve Chapman, 2007: 439; Masoum vd., 2002: 514) iletkenlik değişiminin çalışma noktasının konumu üzerindeki etkisinin değerlendirildiği Artımlı iletkenlik (Incremental Conductance - IC) ve gerilimin değiştirilerek üretilen güç üzerindeki etkisinin değerlendirildiği Saptır ve gözle

(Perturb & Observe - P&O) en sık kullanılan yöntemler olarak öne çıkmaktadır(Kant vd., 2017: 1715; Koutroulis vd., 2001: 46; Reverter ve Gasulla, 2017: 6195; Santos vd., 2006: 773; Thang vd., 2015: 1388).

Tipik bir P&O yöntemi akış şeması Şekil 2.10’da görülmektedir. PV panel gerilimi, kasıtlı olarak belirlenen bir değer kadar değiştirilmektedir (arttırma veya azaltma). Buna saptırma adı verilmektedir. Akabinde PV panelden elde edilen güç miktarı PV panel gerilimi değiştirilmeden önceki güç ile karşılaştırılmaktadır. Eğer PV panelden elde edilen güç miktarı artıyor ise, PV panel gerilimindeki değişime aynı yönde devam edilmektedir. Aksine PV panelden elde edilen güç miktarı azalıyor ise, PV panel gerilimindeki değişime ters yönde olacak şekilde devam edilmektedir (Benyahia vd., 2014: 15200; Rahrah vd., 2015: 13669). Kolay uygulanabilir ve karmaşık olmayan bir doğrudan MGNT yöntemi olan P&O yöntemi, çalışma mantığından dolayı gerçek MGN etrafında sürekli bir salınım yapan bir sonuç elde edilmesi ve ışınımında çok hızlı değişimler olması durumunda MGNT performansında düşüşlerin olabilmesi gibi birtakım olumsuzluklara da sahiptir (Zeddini vd., 2016: 175).



Şekil 2.10. P&O MGNT Yöntemi Tipik Akış Şeması

P&O yöntemini, Yapay Sinir Ağları (YSA) (Natsheh vd., 2013: 194) veya Bulanık Mantık (BM) (Stimoniaris vd., 2016: 815) gibi akıllı modeller ile destekleyerek kullanmak, bu gibi olumsuzluklarının beraberinde getirdiği sorunları aşmada yardımcı olabilmektedir. Elbette ki, hesaplama karmaşıklığındaki artış ile birlikte bir mikrodenetleyici gerektireceği ve bu nedenle de sistem maliyetinin artacağı da göz önünde bulundurulmalıdır.

3. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ VE BATARYALAR

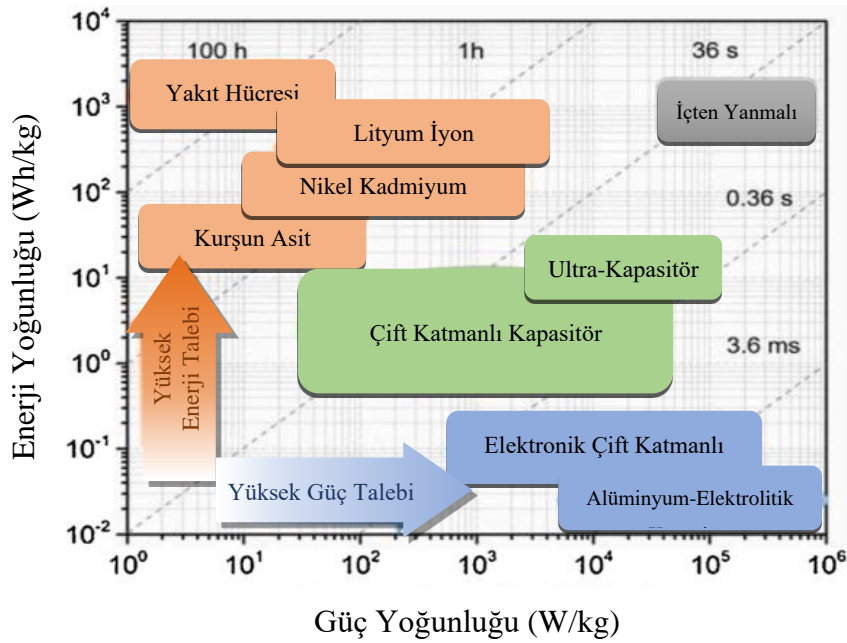
3.1. Enerji Depolama Sistemleri

YEK tabanlı enerji sistemlerinde, YEK'lerden elde edilen enerjinin doğrudan yüklere aktarıldığı uygulamalar gerçekleştirilebilmektedir. Bu tip bir PV sistemi içeren YEK tabanlı enerji sisteminde, PV panellerden elde edilen güç doğrudan yüke aktarılabilir gibi, daha verimli bir enerji tedarigi sağlayabilmek için, bir DC-DC dönüştürücü aracılığı ile ve hatta MGNT uygulaması yapılarak da aktarılabilir. Hem kurulumu kolay olan hem de işletme açısından düşük maliyetli olan bu tip sistemler; ek olarak kullanılacak DC-DC dönüştürücü ve MGNT uygulamalarının desteğine rağmen, güneş ışınımının yükü besleyecek kadar yeterli olmadığı durumlarda, kararlı ve sürekli bir enerji akışının sağlanamaması gibi kritik bir dezavantaja sahiptir (González vd., 2012: 11090).

Özellikle şebekeden bağımsız YEK tabanlı enerji sistemleri söz konusu olduğunda, yetersiz enerji üretimi durumlarında şebekeden destek alabilme imkanının olmayışı, bu dezavantajı daha da kritik hale getirmektedir. Bu durumda, PV sistemlerle birlikte rüzgâr vb. farklı YEK'ler kullanarak YEK'lerin çeşitliliğini arttırmak bir çözüm yöntemi olarak tercih edilebilmektedir. Örneğin, ışınımın yetersiz olduğu durumlarda rüzgâr enerjisinden faydalanılarak sistemin enerji ihtiyacı karşılanmaya çalışılmaktadır. Fakat, bu çözüm çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Bu gibi olumsuz durumların üstesinden gelebilmek için, kullanılan YEK tabanlı enerji sistemlerine, bir enerji depolama ve destek sistemi dahil etmek kalıcı ve daha iyi sonuç veren bir çözüm olarak ön plana çıkmaktadır. Enerji üretim birimi ile bu enerjiyi harcayan yük birimi arasında bir enerji depolama biriminin tercih edilmesi, birimler arasındaki enerji alışverişi sırasında dağıtım sistemi üzerinde oluşabilecek olumsuz etkilerin giderilmesi, güç kalitesinin yükseltilmesi, kapasite artışı sağlanması ve enerji kalitesini bozabilecek etkilerinin azaltılmasına yönelik katkı sağlamaktadır.

PV tabanlı bir enerji sisteminde, ışınımın yeterli olduğu durumlarda, elde edilen enerji ile yükün talebi karşılandıktan sonra kalan enerjinin (fazla üretilen enerji), ışınımın yetersiz olduğu ve/veya ışınımın olmadığı (gece) durumlarda yük talebinin karşılanmasında kullanılmak üzere depolanabilmesi, ancak enerji depolama ve destek sistemleri ile mümkün olmaktadır. Böylelikle yükün enerjisiz kalması engellenebilmektedir. Fakat, kullanılan depolama elemanları ve bunların denetimi için gerekli olan kontrol sistemleri, maliyet artışını ve uygulama karmaşıklığını da beraberinde getirmektedir.

Enerji depolama ve destek birimi, her biri farklı avantaj ve dezavantajlara sahip olan bataryalar, volanlar, süper iletken manyetik enerji depolama (SMES), ultra kapasitörler, yakıt hücreleri, sıkıştırılmış hava veya su depolama veya bunların farklı kombinasyonları kullanılarak oluşturulabilmektedir (Illindala vd., 2004: 3). Tercih edilecek olan enerji depolama bileşenlerinin seçiminde, enerji üretiminde kullanılan YEK'lerin çıkış güç profili ve sistemden enerji talep edecek olan yük profili önemli etkenlerdir. YEK'lerin kesintili doğası gereği değişkenlik gösteren enerji çıkışını telafi edebilmek üzere yüksek enerji yoğunluğuna sahip enerji depolama birimleri gerekmekte iken yük talebindeki yüksek güçlü kısa süreli pikleri bastırmak üzere yüksek güç yoğunluğuna sahip enerji depolama birimleri gerekmektedir. Örneğin bir depolama sistemi için batarya veya ultra-kapasitör birimlerinden hangisinin tercih edilebileceği ile ilgili yapılan bir çalışmada Şekil 3.1'de verilen Ragone şeması geliştirilmiş ve buna göre seçim yapılmasının uygun olabileceği belirtilmiştir (Schlemmer vd., 2021: 3). Buna göre, depolama birimi olarak yalnızca batarya veya ultra-kapasitör kullanmak aşırı boyutlandırılmış büyük miktarda enerji birimleri kurgulanmasını gerektirebilmektedir.



Şekil 3.1. Farklı Enerji Depolama Birimleri İçin Güç ve Enerji Yoğunluğu Ragone Şeması

Kaynak: (Schlemmer vd., 2021: 3)

Bataryalar, uygun maliyet ve verimlilik gibi özellikleri nedeni ile birçoğu hali hazırda geliştirme aşamasında veya seri üretimden çok uzak olan diğer depolama birimlerine nazaran çok daha yaygın bir kullanım alanına sahiptir (Zhang vd., 2010: 2). Elektrikli araçlardan taşınabilir cihazlara, elektrik şebekesi kaynaklı dalgalanma veya kesintiler gibi durumların

kabul edilemeyeceği cep telefonu vericileri veya hastane gibi kritik alanlardan şebekeden bağımsız tüm enerji sistemlerine kadar birçok uygulamada ana enerji depolama birimi olarak bataryalar kullanılmaktadır (González vd., 2012: 11091).

3.2. Bataryalar

Çeşitli alanlardaki birçok uygulamanın ihtiyaç duyduğu enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesinde literatürde kullanım yaygınlığı oldukça fazla olan tekrar şarj edilebilir bataryalar tercih edilmektedir. Uzun süreli enerji depolama sağlayan batarya sistemleri ile YEK'lerin kesintili ve değişken bir enerji kaynağı olmasından veya yükte meydana gelen değişimlerden kaynaklanan üretim-tüketim dengesizliği giderilerek daha kararlı ve dengeli enerji sistemleri oluşturulabilmektedir (Glavin vd., 2008: 1688).

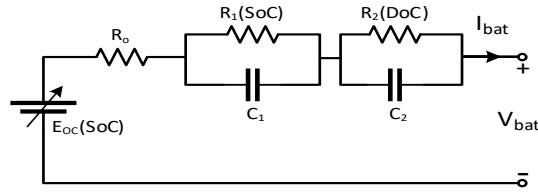
Kurşun asit, nikel kadmiyum, nikel metal hidrit, lityum, vanadyum redoks ve sodyum sülfür gibi genellikle kimyasal olarak içeriğindeki maddeler ile isimlendirilen, farklı özellik ve çeşitlerde bataryalar bulunmaktadır (Zhang vd., 2010: 1). Şebekeden bağımsız bir YEK tabanlı enerji sistemine destek vermek üzere işe koşulacak bir depolama biriminden beklenen bazı özellikler şöyle sıralanabilmektedir (Kubalik vd., 2014: 345):

- Kendi kendine deşarj olma oranının az olması
- Düşük şarj akımlarında dahi verimli çalışmaya devam edebilmesi
- Yoğun şarj/deşarj döngüsel çalışmaya uygun olması
- Derin deşarja uygun olması
- Bakım gereksinimlerinin az olması
- Kullanım ömürlerinin uzun olması
- Uç iklim şartlarında karakteristik özelliklerinde değişimin az olması, vb.

Kurşun asitli batarya tipi; düşük maliyet, dayanıklılık, güvenilirlik, yüksek şarj ve deşarj oranları ve oldukça yüksek çevrim ömürleri gibi avantajları nedeni ile özellikle YEK tabanlı enerji uygulamaları için oldukça iyi bir tercih olarak ön plana çıkmaktadır.

Tipik bir YEK tabanlı enerji sisteminde önemli rol oynayan bataryaların, farklı durumlarda davranışının incelenebilmesi için matematiksel modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Bu doğrultuda, tipik bir bataryanın eşdeğer devresi, Şekil 3.2'den de görüldüğü üzere, bir değişken gerilim kaynağı, bir seri dahili direnç (R_0) ve bu dirence seri olan iki paralel direnç-kondansatör ($R - C$) koldan meydana gelmektedir. Bataryanın matematiksel modeli için akım ve zamanın lineer olmayan bir fonksiyonu olan SoC, bu değer için bir fonksiyonu olan açık devre

gerilimi ve şarj derinliği (Depth of Charge - DoC) kullanılmaktadır (Barsali ve Ceraolo, 2002: 16; Jackey, 2007: 220).



Şekil 3.2. Batarya Eşdeğer Devresi

Şekil 3.2’de verilen batarya modelinin matematiksel eşitlikleri Eşitlik 3.1 – 3.5 ’te verilmektedir (Glavin vd., 2008: 1689).

$$E_{oc} = E_0 - K_e(1 - SoC) \quad (3.1)$$

$$R_1 = R_{10}e^{-K_1(1 - SoC)} \quad (3.2)$$

$$R_2 = R_{20}/DoC \quad (3.3)$$

$$SoC = 1 - 1/C_n \int i_{bat} d\tau_1 \quad (3.4)$$

$$DoC = 1 - 1/C(i_{avg}) \int i_{bat} d\tau_2 \quad (3.5)$$

Burada, SoC bataryanın şarj durumu, DoC bataryanın şarj derinliği, C_n batarya kapasitesi, $C(i_{avg})$ akıma bağlı batarya kapasitesi (üretici tarafından verilir), E_0 tam şarjlı bataryanın açık devre gerilimi, K_e sıcaklıkla gerilim değişimi sabiti ($V/^\circ C$), R_{10} birinci RC koldaki direnç değeri(ohm), τ_1 birinci RC koldaki zaman sabiti (sn.) K_1 sıcaklıkla direnç değişimi sabiti, R_{20} ikinci RC koldaki direnç değeri (ohm) ve τ_1 ikinci RC koldaki zaman sabitidir (sn.).

Güneşten elde edilen kesintili ve değişken enerji, MGNT destekli DC-DC dönüştürücü vasıtası ile maksimum güç üretimi yapılarak ortak DC bara hattına aktarılmaktadır. Ortak DC bara hattına bağlı batarya grubu, çift yönlü enerji transfer imkânı sunan DC-DC dönüştürücü vasıtası ile şarj/deşarj edilerek enerjinin çift yönlü aktarımı sağlanmaktadır. Üretilen enerji, batarya grubunda depolanmakta ve böylelikle YEK’lerin enerji üretimindeki kararsızlık problemi, enerji depolama sistemleri ile önemli oranda çözülmektedir.

PV benzeri YEK’ler, değişken çıkış gücü nedeni ile enerji depolama birimi elemanı olarak kullanılan bataryaların şarj edilmesi için uygun bir enerji kaynağı değildir. PV sistemler ile şarj edilen bir batarya için, ışınımın düşük olduğu durumlarda uygun şarj/deşarj döngüsü

sağlanamayabilmektedir. Bu durumda, sülfatlaşma ve tabakalaşmaya neden olan düşük SoC, batarya kullanım ömrünü olumsuz yönde etkilemektedir (Dunlop ve Farhi, 2001: 275 ; Hund, 1999: 4). Şarj yönetiminin iyi yapılamamasından kaynaklanan, batarya ömrünün kısalmasına ve veriminin düşmesine neden olan diğer bir tehlike ise aşırı şarj durumu olarak görülmektedir.

Ayrıca, bataryalar nispeten düşük enerji yoğunluğuna sahip olmaları ve kendi kendine deşarj olmalarından dolayı, batarya sisteminin büyüklüğüne bağlı olarak, bir enerji sistemini ancak birkaç gün destekleyecek kadar güç sağlayabilmektedir. Kullanılan batarya tipine göre farklılık göstermekle birlikte belirli aralıklarla bakım gerektirmesi veya ömürlerinin dolması ile birlikte yenileri ile değiştirilmesi gerekliliği de bataryaların diğer sorunları olarak değerlendirilmelidir. Tüm bu olumsuzluklar göz önünde bulundurulduğunda, bataryaların kullanım ömürlerinin verimli bir şekilde değerlendirilebilmesi için şarj ve deşarjının iyi yönetilmesini sağlayacak olan batarya yönetim sistemleri oldukça önem kazanmaktadır.

3.3. Batarya Yönetim Sistemleri

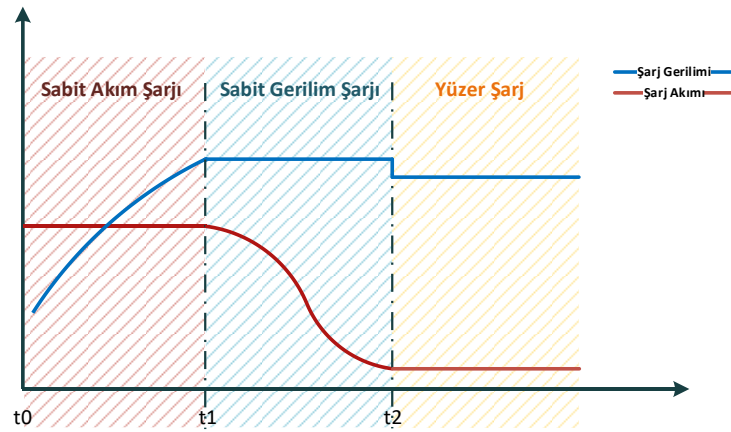
Batarya yönetim sistemleri; bataryayı analiz ederek durumunun belirlenmesini, şarj veya deşarj sırasında durumunun takip edilmesini sağlayan bir denetleme sistemidir. Gerek bataryanın gerekse enerji sağlayacağı sistemin zarar görmesini engellemeyi ve kullanım ömürlerini uzatmayı amaçlayan bu denetleme süreci; şarj durumunda bataryanın ihtiyaç duyduğu gücün depolanmasını, deşarj durumunda ise bataryanın besleyeceği sisteme gerekli gücün aktarılmasını sağlayacak şekilde gerçekleşmektedir.

3.3.1 Batarya Şarj Yönetimi

Bir batarya için şarj, elektrik enerjisinin batarya hücresi içerisinde kimyasal enerjiye dönüştürülerek depolanması için yapılan bir dönüştürme işlemidir. Böylelikle, elektrik enerjisi ile çalışan bir sistemin gereksinim duyduğu enerji, batarya içerisinde kimyasal olarak depolanan enerji ile karşılanabilmektedir.

Şarj devresinden elde edilen akımın sabit bir değerinde bataryaya aktarılmasıyla bataryayı şarj etme mantığına dayanan Sabit Akım Şarjı (Constant Current Charge) ve benzeri birçok farklı yöntem, şarj işlemi için kullanılabilir. Fakat kullanılan şarj yöntemleri incelendiğinde daha çok tercih edilen yöntem olarak Sabit Potansiyel Şarj (Constant Potential Charge) yönteminin öne çıktığı görülmektedir. Sabit Potansiyel Şarj yönteminde, batarya sabit bir gerilim değeri ile şarj olurken, şarj akımı değişkenlik göstermektedir (Mahmuddin vd., 2017: 2).

Sabit Potansiyel Şarj yöntemi kullanılan uygulamalar gereksinimler doğrultusunda farklılık gösterebilmektedir. Önceliği işlem karmaşıklığının artmasının engellenmesi olan bazı uygulamalarda batarya, sadece sabit gerilim uygulanarak şarj edilmekte iken önceliği batarya ömrünün daha etkin kullanılması olan bazı uygulamalarda ise üç aşamalı şarj yaklaşımından yararlanılmaktadır. Şekil 3.3'te üç aşamalı sabit potansiyel şarj yöntemi ile şarj olan bir bataryanın şarj grafiği görülmektedir. Sabit Akım (Bulk) Şarjı, Sabit Gerilim (Absorption) Şarjı ve Yüzer (Floating – Maintenance) Şarj olarak adlandırılan bu üç aşama şu şekilde tanımlanmaktadır.



Şekil 3.3. Sabit Potansiyel Şarj Yöntemi ile Şarj Olan Bir Bataryanın Şarj Eğrisi

Sabit Akım Şarjı, batarya durumunun ve ihtiyaçlarının belirlendiği, ardından batarya şarjının büyük kısmının gerçekleştirilebilmesi için yüksek sabit akım şarjı uygulandığı ilk aşamadır. Bu aşamada sabit olarak uygulanan akım değeri, bataryanın aşırı ısınarak zarar görmesine veya ömrünün azalmasına neden olmayacak, mümkün olan en yüksek değer olarak belirlenir. Bataryanın doğal emilim oranı olarak bilinen bu değer, aynı zamanda bataryaların üretici katalog verilerinde akım veya gerilim değeri olarak da verilebilmektedir. Tipik bir 12V'luk kuru batarya için batarya uçlarındaki gerilim 14,6 – 14,8V civarında iken bu değerler sulu bataryalar için daha da yüksek olabilmektedir. Jel bataryalarda bu gerilim değerleri 14,2-14,3V aralığındadır. Bu değerlerin aşılması bataryanın tipine göre farklılık göstermekle birlikte, gaz çıkışı, fiziksel hasar ve hatta patlamalara dahi neden olabilmektedir. Bu nedenle bataryaların şarjı söz konusu olduğunda bu limit değerlerin aşılmamasına ayrıca özen gösterilmesi gerekmektedir. Tipik bir 12V'luk bataryanın sabit akım aşamasında şarj edilebileceği akım değeri C/10 olarak belirlenir. Burada C, bataryanın Ah ile ifade edilen kapasite değeridir. Örneğin, 100Ah'lik bir batarya için C/10 akım değeri 10A değerine karşılık gelmektedir. Bu aşama, şarj işlemine ihtiyaç duyacak derecede boşalmış olan bataryaların,

yeniden şarjı için oldukça önemlidir. Bu aşamada batarya henüz tam şarja ulaşamayacağı için aşırı şarj durumu riski bulunmamaktadır. Burada, batarya gerilimi veya SoC belirli bir eşik değere gelene kadar, bataryanın izin verilen en yüksek akım değeri ile ve bu değer sabit tutulacak şekilde şarj edilmesi önemlidir.

Sabit Gerilim Şarjı, bataryanın tam dolu (%100) duruma ulaştırılabilmesi için batarya şarj akımının yaklaşık olarak $C/50$ ile $C/100$ değerine düşene kadar sabit gerilim şarjı uygulandığı ikinci aşamadır. Batarya gerilimi belirlenen değerde (bir önceki aşamada ulaşılan gerilim seviyesi) sabit kalırken batarya akımının tam şarja doğru giderek azaldığı bu aşama, emme aşaması olarak da adlandırılmaktadır. Batarya SoC $\approx\%95$ 'e ulaştığında veya batarya uçlarındaki gerilim belirli bir eşik değere ulaştığında geçilen bu aşama, SoC $\approx\%100$ olana veya batarya şarj akımı belirlenen bir eşik değere düşünceye kadar sabit gerilim şarjı uygulanarak devam etmektedir. Batarya, şarj akımının giderek azalması ile batarya için oldukça zararlı olan aşırı ısınma gibi bir durum meydana gelmeden tam şarj durumuna ulaştırılmaktadır. Bataryanın kalan $\approx\%5$ 'lik şarj işleminin gerçekleştirildiği bu aşama, $\approx\%95$ 'inin gerçekleştirildiği sabit akım şarjı aşamasına kıyasla çok daha uzun zaman almaktadır.

Üçüncü ve son aşama ise damlama şarjı olarak da adlandırılan Yüzer Şarj aşamasıdır. Bu aşamada, şarj durumu hali hazırda %100'e ulaştırılmış olan bataryaya; %100 şarj durumunu koruyacak ve kendi kendine deşarj (self discharge) olmasını engelleyecek şekilde sabit bir gerilim uygulanmaktadır. Şarj işlemi tamamlandığında batarya uçlarındaki gerilim, sabit gerilim şarjı aşamasında ulaşılan gerilim değerinden bir miktar daha az olmaktadır (Husnayain, 2017: 59). Bu nedenle bu aşamadaki sabit gerilim değeri tipik bir 12V bataryanın sağlayabileceği azami gerilim değeri olan 13,2 – 13,4V aralığında tanımlanabilmektedir. Bu aşamada, batarya şarj akımı ise damlama şarjı olarak da adlandırılmasına neden olacak şekilde, kısa sürelerde ve düşük değerlerde olmaktadır. Yüzer şarj aşaması, Li-Po vb. jel bataryalarda aşırı şarjın büyük hasarlara neden olabilmesinden dolayı çok hassas kontrol edilmesi gereken bir aşamadır. Gerek bu nedenden dolayı gerekse kontrol algoritmasını karmaşıktırmamak için çoğu batarya şarj denetim sistemi bu aşamayı kapsamamaktadır. Ancak, özellikle bir bataryanın uzun süreler için kullanılmayacağı durumların olası olduğu uygulamalarda, yüzer şarj aşaması batarya ömrünün sağlıklı kullanılabilmesi bakımından oldukça önemlidir. Öyle ki bataryalı bir sistemin aylarca hatta yıllarca bu aşamada bırakılarak, tamamen güvenli bir şekilde her an kullanıma hazır halde tutulabilmesi mümkündür. Ayrıca bu aşama sayesinde batarya sürekli olarak izlenmekte, iç direnç, kendi kendine deşarj gibi nedenlerle bataryada herhangi bir kayıp gözlenmesi durumunda damlama akımları olarak nitelendirilen kısa şarj döngüleri ile

bataryanın tam dolu durumunun korunması sağlanmaktadır. Böylelikle batarya, kullanım ömrü bakımından yine çok zararlı olan aşırı şarj durumundan da korunmuş olmaktadır. Bataryalar üretici tarafından verilen, bir anlamda kullanım ömürlerini belirleyen bir gösterge olarak kullanılan, belirli bir şarj/deşarj döngüsüne sahip olarak üretilmektedir. Bu aşama ile aynı zamanda batarya gereksiz şarj/deşarj döngüsüne girmekten korunarak ömürlerinin de daha etkin kullanılması sağlanmaktadır.

3.3.2 Batarya Deşarj Yönetimi

Bir batarya için deşarj, daha önce batarya hücresi içerisinde kimyasal enerji olarak depolanmış olan enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi için yapılan bir dönüştürme işlemidir. Böylelikle elektrik enerjisi ile çalışan bir sistemin gereksinim duyduğu enerji batarya içerisinde kimyasal olarak depolanan enerji ile karşılanabilmektedir.

Bir bataryanın deşarj işlemi esnasında, tıpkı şarj işleminde olduğu gibi SoC, gerilim ve akım değerleri kontrol edilmelidir. Burada önemli olan, bu değerlerin batarya için belirlenen limit referans değerleri içerisinde kalmasının sağlanmasıdır. Bu durumun sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi ise ilerleyen bölümlerde bahsedilecek olan denetleme algoritmalarının kararlı ve düzgün çalışmasına bağlıdır.

3.3.3 Batarya Durum Gösterge Verileri

Bir bataryanın denetimini gerçekleştirebilmek ve durumunu gözlemleyebilmek için SoC, batarya sağlık durumu (State of Health - SoH) ve batarya deşarj derinliği (DoD) gibi önemli bazı verilerden yararlanılmaktadır.

DoD, bir bataryanın nominal kapasitesinden boşaltılan enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır (Blumensaat, 2016: 25). Bu gösterge verisi, kapasite ve kullanım ömrü bakımından bataryanın sağlıklı kullanım limitleri dahilinde ne kadar miktarda deşarj olabileceğinin bir ölçüsü olarak da değerlendirilmektedir. Bataryalar belirli bir şarj/deşarj döngüsü sayısına sahip olarak üretilmektedir. Batarya tipine göre farklılık göstermekte olan şarj derinliği değeri (üretici tarafından % ile ifade edilen bir değer) aşıldığı takdirde, bataryanın şarj/deşarj döngüsü sayısı, bir anlamda da kullanım ömrü kısalmaktadır.

SoH, bir bataryanın şarj edilerek ulaşabileceği maksimum kapasitenin, bataryanın nominal kapasitesine oranıdır (Yang vd., 2018 397). Bataryanın kullanılma süresi (yaşlanma) ile de ilişkili olan bu veri, bataryanın sağlıklı kullanılabilme oranı olarak da tanımlanabilmektedir. Henüz kullanılmaya başlanmış bir bataryanın sağlık durumu %100 iken,

yıllar geçtikçe bu değer aşağı düşmektedir. Bu da daha kısa sürede deşarj olmasına ve daha kısa sürede fakat tam dolmayacak şekilde şarj olmasına neden olmaktadır.

Bir bataryanın durum gösterge verileri arasında belki de en kritik olanı SoC bilgisidir. SoC, son tam şarj edilmiş bataryanın şarj durumundan (tam SoC) bu yana bir bataryadan boşaltılan net şarj miktarı ile nominal kapasite arasındaki farkın nominal kapasiteye oranı olarak tanımlanabilmektedir (Sauer vd., 1999: 3). Bu tanım içerisinde geçen tam SoC değerine ancak sabit bir şarj geriliminde ve sabit sıcaklıkta 2 saat boyunca batarya akımı değişmediğinde ulaşılabilmektedir (*DIN EN 60896-2:1997; TS 1352-3 EN 60896-2:2006*). Bu nedenle bu denli önemli olan bu veri, doğrudan ölçülemeyen ancak bazı yöntemler ile tahmin edilebilen bir değerdir. Burada, batarya kullanım ömrü değişkeni göz ardı etmektedir. Fakat, bir bataryanın sağlayabileceği kapasite, her iki elektrotundaki aktif malzemenin şarj kabulünün kaybolması, elektrolitinin fiziksel özelliklerindeki değişiklikler veya akım iletkenlerindeki korozyon gibi batarya ömrüne bağlı problemler nedeniyle değişiklik göstermektedir.

Tüm bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda, bir bataryanın SoC değerinin belirlenmesi, bataryanın tipine, kullanıldığı uygulamaya ve ne kadar hassas bir SoC değerine ihtiyaç duyulduğuna bağlı olarak karmaşık bir sorun haline gelebilmektedir. Bir bataryanın SoC değerinin belirlemek için kullanılacak yöntemlerden bazıları şöyledir.

Deşarj Testi

Bu yöntemde bir bataryanın SoC değeri, kontrollü koşullar altında yapılan deşarj testi ile elde edilmektedir. Ancak, genellikle birden fazla ardışık şarj içeren bu testler esnasında sistem kesintiye uğramakta ve birçok uygulama için kullanılması mümkün olmayacak kadar zaman almaktadır (Piller vd., 2001: 114). Bu gibi nedenlerden dolayı bu yöntem tercih edilmemektedir.

Elektrolitlerin Fiziksel Özelliklerinin Ölçülmesi

Bu yöntemde, kurşun asit tipindeki bir batarya için, asit yoğunluğunun değişimi ile SoC arasındaki doğrusal ilişki kullanılarak SoC değeri belirlenmektedir. Asit yoğunluğu, iyon konsantrasyonu, iletkenlik, kırılma indisi, viskozite, ultrasonik gibi yöntemler ile doğrudan veya dolaylı olarak ölçülebilmektedir (Stimoniaris vd., 2016: 816). Fakat bu yöntem, her batarya tipi için kullanılamamaktadır.

Açık Devre Gerilimi

Bu yöntemde, kurşun asit tipindeki batarya için, açık devre gerilimi ile SoC arasındaki doğrusal ilişki kullanılarak SoC değeri belirlenmektedir. Özellikle Valf Ayarlı Kurşun-Asit (Valve Regulated Lead–Acid – VRLA) tip bataryalarda, kararlı durumdaki açık devre gerilimine ulaşmak için uzunca bir süre (yaklaşık birkaç saat) gerekmektedir. Bataryanın sistemden uzun sürelerde ayrılması uygun olmadığından bu yöntem, daha sağlıklı sonuçlar alınabilmesi için diğer yöntemleri destekleyici olarak tercih edilmektedir.

Sezgisel Yöntemler

Coup de fouet

Bu yöntemde, tam şarj sonrası deşarj sürecine giren kurşun asit tipindeki bir bataryanın çıkış gerilimindeki azalma miktarı kullanılarak, SoC değeri belirlenmektedir. Coup de fouet yöntemi, yalnızca tam şarjdan sonra kullanılabilirdiğinden, tam şarj durumunun sıklıkla gerçekleştiği uygulamalarda tercih edilmektedir (Pascoe ve Anbuky, 2000: 589).

Empedans spektroskopisi

Bu yöntemde, elektrokimyasal süreçleri araştırmak için yaygın olarak kullanılan bir ölçüm tekniği ile SoC değeri belirlenmektedir. SoC değerinin yanı sıra SoH değerinin belirlenmesinde de birçok batarya tipi için kullanılmaktadır (Huet, 1998: 61).

İç Direnç

Bu yöntemde, batarya uçlarındaki gerilim düşüş miktarının aynı zaman aralığındaki akım değişim miktarına oranı ile hesaplanan iç direnç değeri kullanılarak SoC değeri belirlenmektedir. Belirlenen zaman aralığı uzun olduğunda asit difüzyonu gibi diğer etkenler de direnç hesaplamasına dahil olmakta ve hesaplama karmaşıklaşmaktadır. Elde edilen sonuçlar kısıtlı olmasına rağmen bu yöntemde kısa zaman aralıkları tercih edilmektedir.

Kalman Filtresi

Kalman filtresi, herhangi bir dinamik sistemin iç durumlarını tahmin eden bir algoritmadır. Bu yöntemde, dinamik sistem olarak batarya, iç durum olarak da SoC kabul edilmektedir. Tahmin sonucu, dinamik sistemin bir modeline dayanmaktadır. Gerek dinamik sistemlerin modellenmesinin zor olması gerekse matematiksel hesaplamaların yoğunluğu, bu yöntemi karmaşık hale getirmektedir.

Amper Saat Sayıcı (Coulomb Sayıcı)

İlgili literatür incelendiğinde bu yöntemin, SoC hesaplamak için oldukça yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (Ge vd., 2018: 2277; Lee vd., 2018: 1788; Mishra ve Fathy, 2018: 1561; Yang vd., 2018: 397). Mevcut kapasite miktarı, şarj işlemi ile verilen, deşarj işlemi ile de çekilen akımla doğrudan ilişkilidir. Bu ilişki temelinde SoC verisini elde etmeye dayalı bir yöntem olan amper saat sayıcı yönteminde, SoC verisi, bir başlangıç değeri (SoC_0) verildiği takdirde, Eşitlik 3.6 ile elde edilebilmektedir.

$$SoC = SoC_0 + \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^1 (I_{bat} - I_{loss}) d\tau \quad (3.6)$$

Burada C_N nominal kapasiteyi, I_{bat} batarya akımını ve I_{loss} elektronik elemanlar (özellikle anahtarlama elemanları) üzerindeki kayıp akımları ifade etmektedir.

Bu yöntemin iki ana problemi bulunmaktadır. Bunlardan ilki, hatalı ölçülen akım değerleri hesaplamada kullanılan integral işleminden dolayı elde edilecek SoC değerinde büyük sapmalara neden olmaktadır (González vd., 2012: 11093). Bu problemi ortadan kaldırmak adına hassas ölçüm yapmak için uygun sensör ve yöntemlerin kullanılması gerekmektedir ki bu da karmaşık elektronik devreler, hesaplamalar veya pahalı elektronik sensörler anlamına gelmektedir. İkincisi ise, bataryaya verilen veya bataryadan çekilen akımın tamamının batarya veya yük tarafından tüketilmeyip bir kısmının bazı elemanlar (özellikle anahtarlama elemanları) üzerinde harcanmasıdır. Aynı zamanda kayıp olarak adlandırılan bu akım değerlerini belirlemek nispeten karmaşık hesaplamalara dayanmaktadır. Tam şarj durumu gibi yeniden kalibrasyon yapılmasını mümkün kılacak noktalara ulaşıldığı takdirde hatalar asgari düzeyde tutulabilmektedir (Barca vd., 2008: 435).

En basit kayıp tahmin yöntemi, her yeniden şarj işlemi için bataryaya sabit bir şarj faktörü uygulamaktır. Diğer bir deyişle, sabit bir kayıp varsayılmakta ve bu kayıp bataryaya ek olarak iade edilmektedir. Fakat bu yöntem, aşırı şarja duyarlı olan kurşun asit veya lityum katkılı bataryalar için uygun bir yöntem değildir (Piller vd., 2001: 118).

4. ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ VE DENETİM YÖNTEMLERİ

4.1. Dönüştürücüler

YEK tabanlı bir enerji sisteminde enerji üretimi, YEK'lerden bir veya birkaçının birlikte kullanımı ile sağlanmaktadır. PV sistemlerin kullanıldığı bir enerji sisteminde, ışıınım ve sıcaklık gibi çevresel etkenlerde meydana gelen değişikliklere bağlı olarak elde edilen enerji miktarı da değişkenlik göstermektedir. PV panellerin veriminin düşmesine sebep olan bu sorun, MGNT uygulamaları ile çözülebilmektedir. PV sistemlerinden elde edilen çıkış gücündeki değişkenlik ise kararlı olmayan bir güç sistemine sebep olmaktadır. YEK tabanlı bir enerji sistemindeki bu kararsızlık sorunu ise bir enerji depolama ve destek birimi kullanılarak çözülebilmektedir.

Gerek MGNT uygulamaları gerekse enerji depolama birimine enerji aktarma veya enerji depolama biriminden sisteme enerji sağlama süreçlerinin kararlı ve uygun şekilde gerçekleştirilebilmesi, DC-DC dönüştürücülerin kullanılması ile mümkün olmaktadır. DC-DC dönüştürücüler; çıkışında, girişteki gerilim değerinden farklı bir gerilim elde etmeyi amaçlayan elektronik devrelerdir. Bu dönüştürme işlemi ise anahtarlama elemanlarının belirlenen sürelerde iletme veya kesime götürülmesi ile gerçekleştirilmektedir. Dönüştürücülerin yapısında kullanılan anahtarlama elemanları, sistemin güç gereksinimlerine bağlı olarak değişmektedir. 10kW altında güç ile çalışılan sistemlerde Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör (MOSFET) tercih edilmekte iken daha yüksek güç gerektiren sistemlerde ise Yalıtımlı Kapılı İki Kutuplu Transistör (IGBT) daha çok kullanılmaktadır (Bodur, 2017: 54).

DC-DC dönüştürücülerin anahtarlama frekansı arttırılarak güç yoğunluğu arttırılabilmektedir. Böylelikle, dönüştürücüde kullanılan bobin, kondansatör veya transformatör gibi elektronik devre elemanlarının boyutları ve bununla birlikte maliyetleri de azaltılabilmektedir. Fakat yüksek anahtarlama frekansı, anahtarlama kayıplarının artması ve buna bağlı olarak verimin düşmesi gibi olumsuzlukları da beraberinde getirmektedir (Oncu ve Nacar, 2016: 12477). Bu olumsuzlukların engellenerek dönüştürücü verimliliğinin arttırılabilmesi için bir bastırma (snubber) devresi kullanılabilmektedir. Anahtarlama elemanlarının iletme ve kesime götürülmesi sırasında meydana gelen enerji kayıplarını yüke aktaracak şekilde çalışan bastırma devresi, bobin ve kondansatör gibi pasif elektronik elemanlar ile oluşturulan bir elektronik devredir.

Tipik bir dönüştürücü; kontrolü sağlayan aktif anahtarlama elemanı, pasif elektronik elemanı (genellikle bir diyot) ve bobinin farklı topolojiler kullanılarak bağlanması ile oluşturulmaktadır. Giriş gerilimini daha düşük bir çıkış gerilimine dönüştüren düşürücü tip (buck) ve giriş gerilimini daha yüksek bir çıkış gerilimine dönüştüren yükseltici tip (boost) olmak üzere iki temel dönüştürücü tipi bulunmaktadır. Ayrıca, bu elektronik devre topolojilerinden türetilen farklı dönüştürücü tipleri de bulunmaktadır (Bodur, 2017: 184).

4.1.1 Düşürücü Tip (Buck) Dönüştürücü

Düşürücü tip bir dönüştürücü için; genel devre şeması, anahtarlama elemanı iletim – kesim durumlarındaki devre şemaları ve sürekli akım modunda kararlı çalışma durumu için çalışma eğrileri Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Buna göre, çalışma periyodunun (T_p) doluluk oranı (λ) ile belirlenen doluluk süresi (T_d) boyunca, anahtarlama elemanı iletimde kalmakta ve yük giriş gerilimi (V_G) ile beslenmektedir. Bu sırada bobin üzerinden geçen akım (I_L) doğrusal olarak artmakta ve bobin enerjilenmektedir. Doluluk süresinin sona ermesi ile başlayan boşluk süresi (T_b) boyunca anahtarlama elemanı kesime götürülmektedir. Daha önce enerjilendirilmiş olan bobin ters elektromotor kuvvet (EMK) üretmekte ve diyotu ilettime geçirerek yükü beslemektedir. Bir sonraki doluluk süresi gelene kadar yük, enerji seviyesi giderek düşmekte olan bobin tarafından beslenmeye devam etmektedir. T_d aralığında giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki fark ($V_G - V_C$) kadar bir gerilim ile beslenen bobin T_b aralığında V_C kadar bir ters EMK üretmektedir. Buna göre Eşitlik 4.1 ve 4.2 yazılabilmektedir.

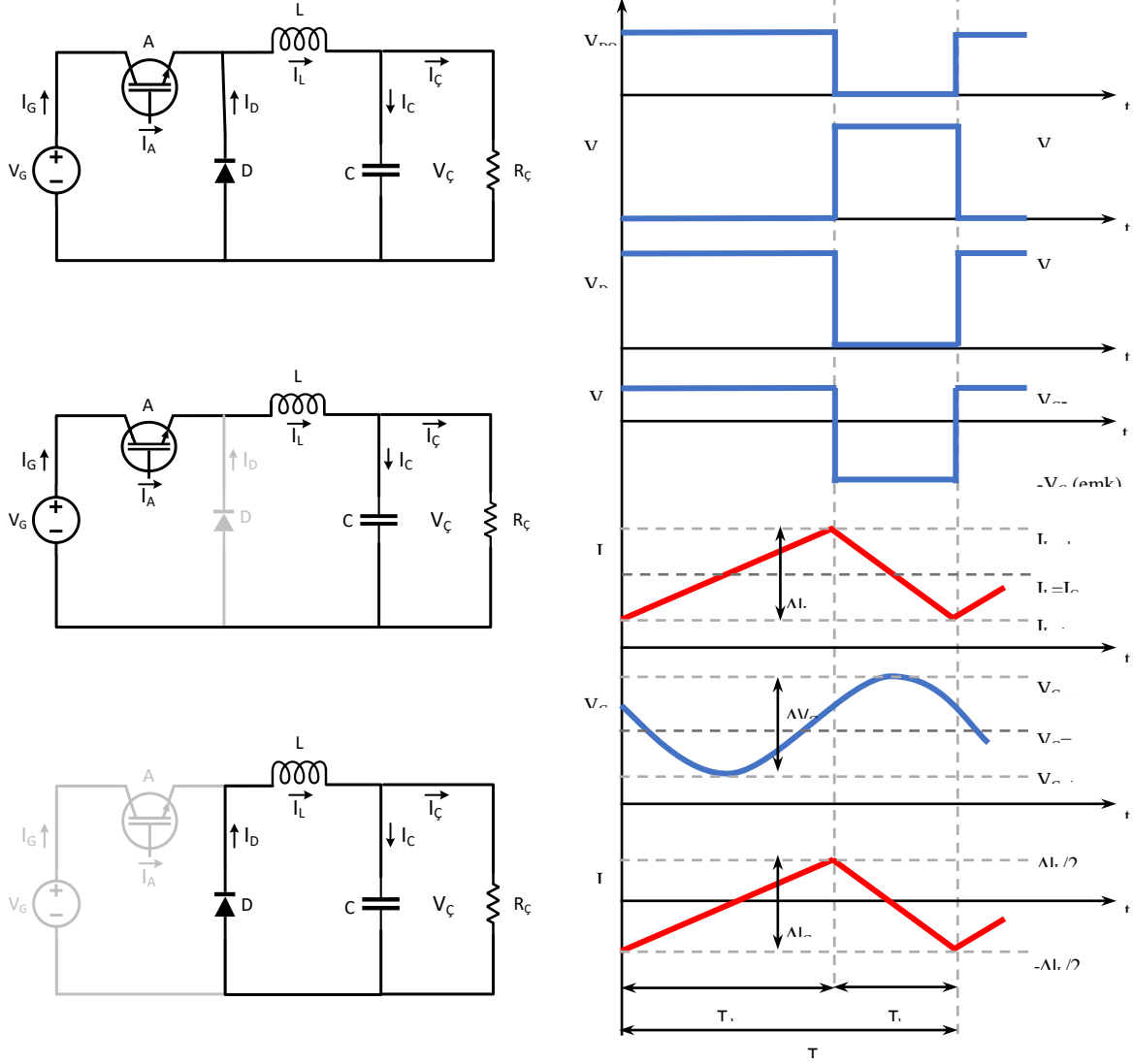
$$V_G - V_C = L \frac{di_L}{dt} \quad \leftrightarrow \quad nT_p \leq t \leq T_d + nT_p, n \geq 0 \quad (4.1)$$

$$-V_C = L \frac{di_L}{dt} \quad \leftrightarrow \quad T_b + nT_p \leq t \leq (n + 1)T_p, n \geq 0 \quad (4.2)$$

Bobin akımında (I_L) meydana gelen değişimler ise Eşitlik 4.3 ve 4.4 ile hesaplanabilmektedir.

$$\Delta I_{Lp} = \frac{V_G - V_C}{L} T_d \quad \leftrightarrow \quad nT_p \leq t \leq T_d + nT_p, n \geq 0 \quad (4.3)$$

$$\Delta I_{Ln} = \frac{V_C}{L} T_b \quad \leftrightarrow \quad T_b + nT_p \leq t \leq (n + 1)T_p, n \geq 0 \quad (4.4)$$



Şekil 4.1. Düşürücü Tip Bir Dönüştürücü İçin; Genel Devre Şeması, Anahtarlama Elemanı İletim – Kesim Durumlarındaki Devre Şemaları ve Sürekli Akım Modunda Kararlı Çalışma Durumu İçin Çalışma Eğrileri

Kararlı durumda bobin akımındaki artma ve azalma miktarlarının birbirine eşit olduğu göz önünde bulundurularak Eşitlik 4.5 elde edilmektedir.

$$(V_G - V_C)T_a = V_C T_b \quad (4.5)$$

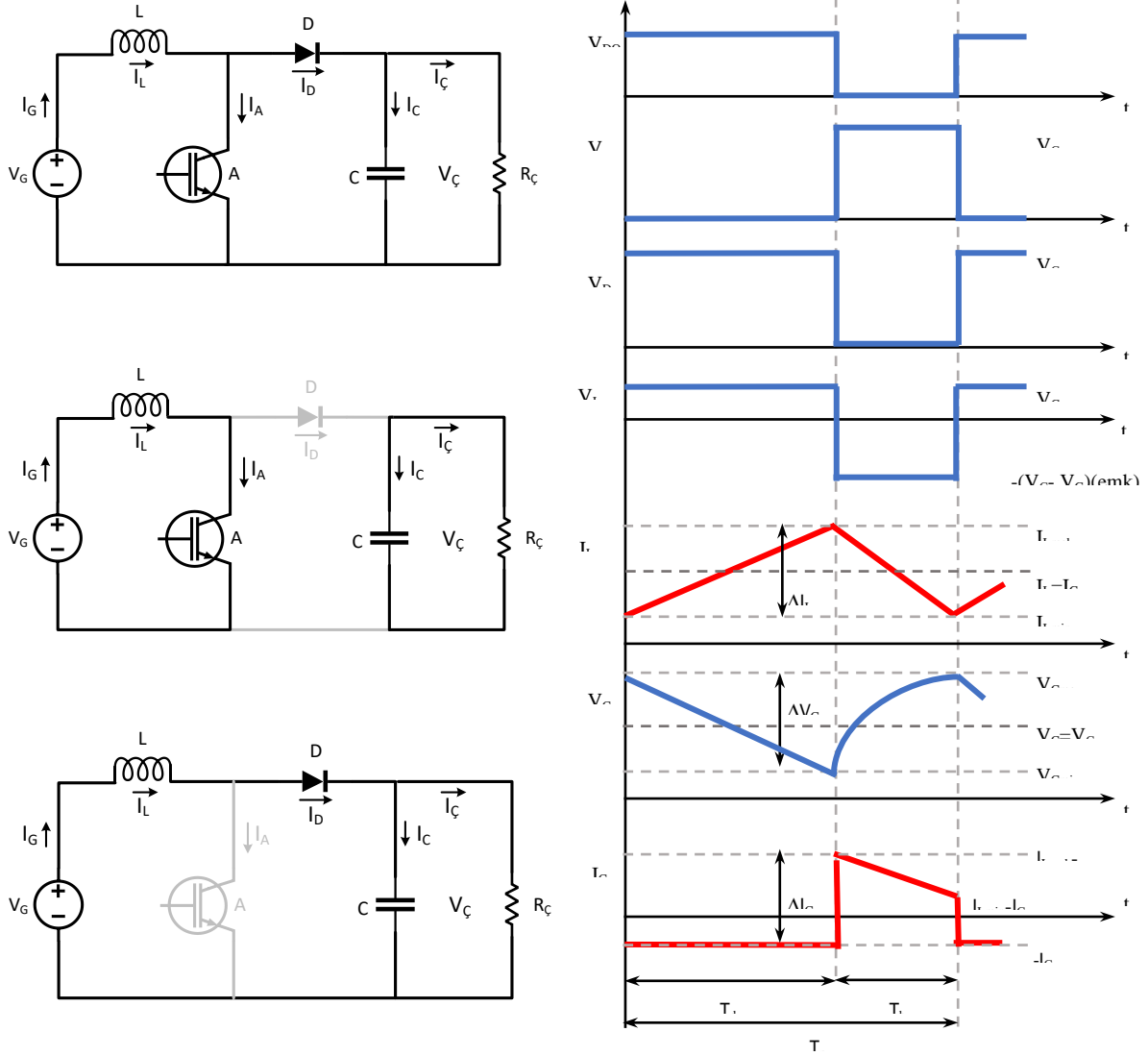
Buna göre dönüştürücü çıkış gerilimi (V_C) Eşitlik 4.6 ile elde edilebilmektedir.

$$V_C = \lambda V_G \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.6'dan da görüldüğü üzere, çıkış gerilimi en fazla giriş gerilimi olabilecek şekilde değiştirilebilmektedir. Bu nedenle bu dönüştürücü düşürücü tip dönüştürücü olarak adlandırılmaktadır.

4.1.2 Yükseltici Tip (Boost) Dönüştürücü

Yükseltici tip bir dönüştürücü için; genel devre şeması, anahtarlama elemanı iletim – kesim durumlarındaki devre şemaları ve sürekli akım modunda kararlı çalışma durumu için çalışma eğrileri Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Yükseltici Tip Bir Dönüştürücü İçin; Genel Devre Şeması, Anahtarlama Elemanı İletim – Kesim Durumlarındaki Devre Şemaları ve Sürekli Akım Modunda Kararlı Çalışma Durumu İçin Çalışma Eğrileri

Buna göre, çalışma periyodunun (T_p) doluluk oranı (λ) ile belirlenen doluluk süresi (T_d) boyunca anahtarlama elemanı iletimde kalmakta, bobin üzerinden geçen akım (I_L) doğrusal olarak artmakta ve bobin enerjilenmektedir. Yük ise bir önceki periyotta kondansatörde depolanan enerji ile beslenmektedir. Doluluk süresinin sona ermesi ile başlayan boşluk süresi (T_b) boyunca anahtarlama elemanı kesime götürülmektedir. Daha önce enerjilendirilmiş olan bobin ters EMK üretmekte ve diyotu iletime geçirerek giriş gerilimi ile birlikte yükü beslemektedir. Bir sonraki doluluk süresi gelene kadar yük, giriş gerilimine ek olarak enerji seviyesi giderek düşmekte olan bobin tarafından beslenmeye devam etmektedir. T_d aralığında V_G kadar bir gerilim ile beslenen bobin T_b aralığında V_C-V_G kadar bir ters EMK üretmektedir. Buna göre bobin akımında (I_L) meydana gelen değişimler Eşitlik 4.7 ve 4.8 ile hesaplanabilmektedir.

$$\Delta I_{Lp} = \frac{V_G}{L} T_d \quad \leftrightarrow \quad nT_p \leq t \leq T_d + nT_p, n \geq 0 \quad (4.7)$$

$$\Delta I_{Ln} = \frac{V_C - V_G}{L} T_b \quad \leftrightarrow \quad T_b + nT_p \leq t \leq (n + 1)T_p, n \geq 0 \quad (4.8)$$

Kararlı durumda bobin akımındaki artma ve azalma miktarlarının birbirine eşit olduğu göz önünde bulundurularak dönüştürücü çıkış gerilimi (V_C) ve çıkış akımı (I_C) Eşitlik 4.9 ve 4.10 ile elde edilebilmektedir.

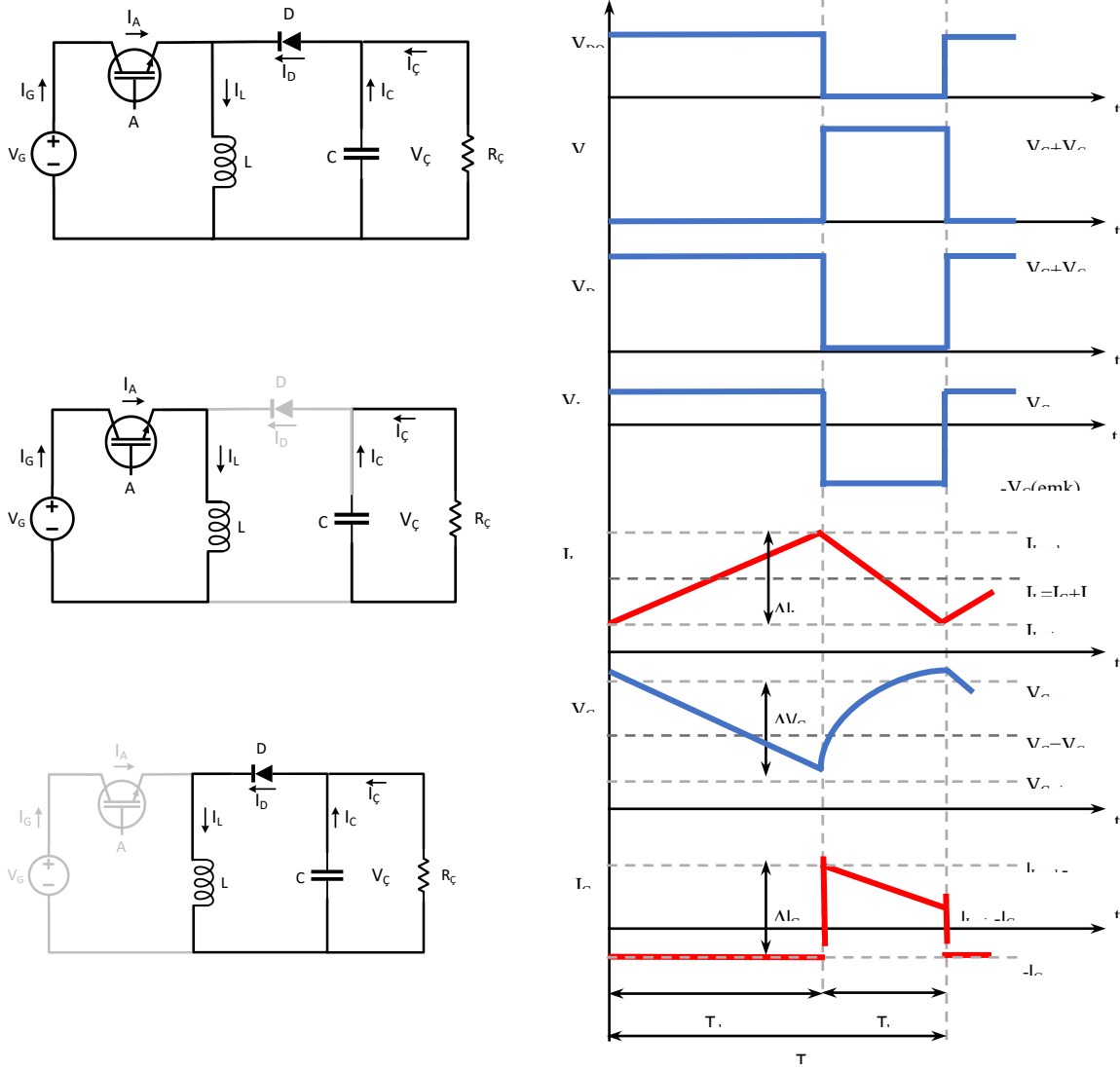
$$V_C = \frac{1}{(1-\lambda)} V_G \quad (4.9)$$

$$I_G = \frac{1}{(1-\lambda)} I_C \quad (4.10)$$

Eşitlik 4.9'dan da görüldüğü üzere çıkış gerilimi, giriş geriliminden büyük olabilecek şekilde değiştirilebilmektedir. Bu nedenle bu dönüştürücü yükseltici tip dönüştürücü olarak adlandırılmaktadır.

4.1.3 Düşürücü – Yükseltici Tip (Buck – Boost) Dönüştürücü

Düşürücü – yükseltici tip bir dönüştürücü için; genel devre şeması, anahtarlama elemanı iletim – kesim durumlarındaki devre şemaları ve sürekli akım modunda kararlı çalışma durumu için çalışma eğrileri Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Düşürücü – Yükseltici Tip Bir Dönüştürücü İçin; Genel Devre Şeması, Anahtarlama Elemanı İletim – Kesim Durumlarındaki Devre Şemaları ve Sürekli Akım Modunda Kararlı Çalışma Durumu İçin Çalışma Eğrileri

Buna göre, çalışma periyodunun (T_p) doluluk oranı (λ) ile belirlenen doluluk süresi (T_d) boyunca anahtarlama elemanı iletimde kalmakta ve yük giriş gerilimi (V_G) ile beslenmektedir. Bu sırada bobin üzerinden geçen akım (I_L) doğrusal olarak artmakta ve bobin enerjilenmektedir. Yük ise bir önceki periyotta kondansatörde depolanan enerji ile beslenmektedir. Doluluk süresinin sona ermesi ile başlayan boşluk süresi (T_b) boyunca anahtarlama elemanı kesime götürülmektedir. Daha önce enerjilendirilmiş olan bobin ters EMK üretmekte ve yükü beslemektedir. Bir sonraki doluluk süresi gelene kadar yük, enerji seviyesi giderek düşmekte olan bobin tarafından beslenmeye devam etmektedir. T_d aralığında V_G kadar bir gerilim ile

beslenen bobin, T_b aralığında V_C kadar bir ters EMK üretmektedir. Buna göre bobin akımında (I_L) meydana gelen değişimler Eşitlik 4.11 ve 4.12 ile hesaplanabilmektedir.

$$\Delta I_{Lp} = \frac{V_G}{L} T_d \quad \leftrightarrow \quad nT_p \leq t \leq T_d + nT_p, n \geq 0 \quad (4.11)$$

$$\Delta I_{Ln} = \frac{V_C}{L} T_b \quad \leftrightarrow \quad T_b + nT_p \leq t \leq (n + 1)T_p, n \geq 0 \quad (4.12)$$

Kararlı durumda bobin akımındaki artma ve azalma miktarlarının birbirine eşit olduğu göz önünde bulundurularak dönüştürücü çıkış gerilimi (V_C) çıkış gerilimi (I_C) Eşitlik 4.13 ve 4.14 ile elde edilebilmektedir.

$$V_C = \frac{\lambda}{(1-\lambda)} V_G \quad (4.13)$$

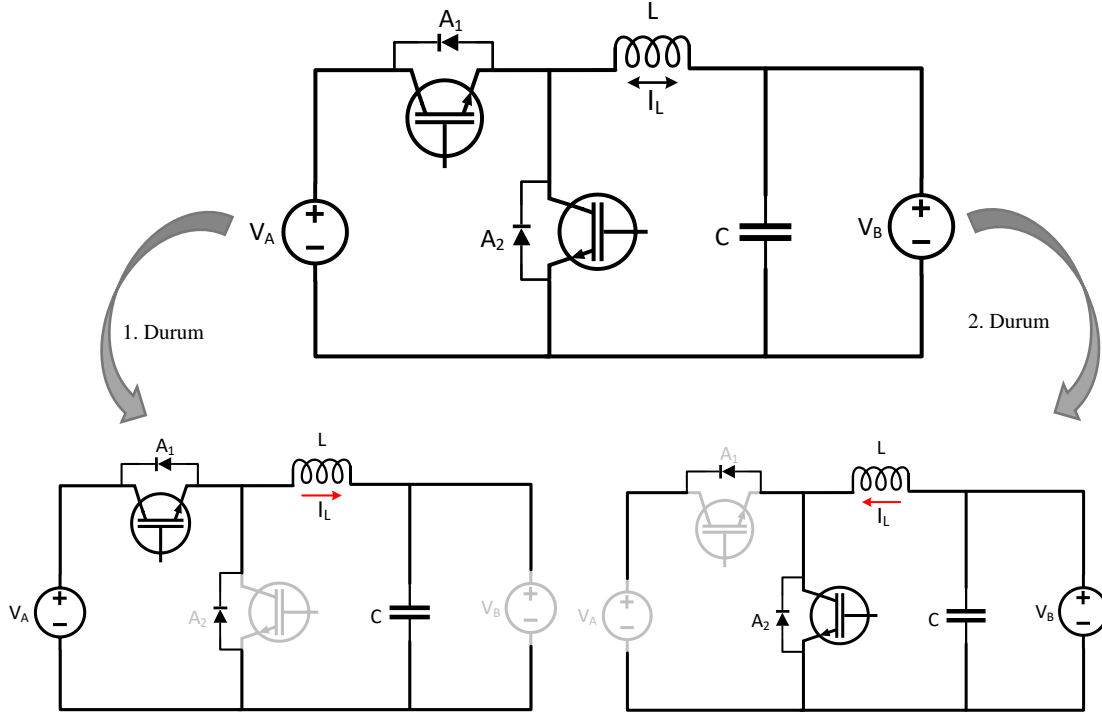
$$I_G = \frac{\lambda}{(1-\lambda)} I_C \quad (4.14)$$

Eşitlik 4.13'ten de görüldüğü üzere, çıkış gerilimi T_d aralığında giriş geriliminden küçük T_b aralığında ise giriş geriliminden büyük olabilecek şekilde değiştirilebilmektedir. Bu nedenle bu dönüştürücü, düşürücü – yükseltici tip dönüştürücü olarak adlandırılmaktadır.

4.1.4 Çift Yönlü Düşürücü – Yükseltici (Bidirectional Buck – Boost) Dönüştürücü

Çift yönlü bir dönüştürücü için; genel devre şeması ve anahtarlama elemanları iletim – kesim durumlarındaki devre şemaları Şekil 4.4'te verilmiştir.

Çift yönlü dönüştürücü topolojisinde, aynı anda iletimde olmayacak şekilde kontrol edilmesi gereken iki adet güç anahtarı (A_1 ve A_2) bulunmaktadır. Düşürücü tip dönüştürücü olarak çalışmakta olan 1. durumda, A_1 anahtarı iletimde, A_2 anahtarı ise kesimdedir. Böylelikle, gerilim seviyesi düşürülecek şekilde, V_A 'dan V_B 'ye doğru yönlü güç aktarımı yapılmaktadır. Yükseltici tip dönüştürücü olarak çalışmakta olan 2. durumda ise, A_2 anahtarı iletimde, A_1 anahtarı kesimdedir. Böylelikle, gerilim seviyesi yükseltilecek şekilde, V_B 'den V_A 'ya doğru yönlü güç aktarımı yapılmaktadır. Her iki durumda da anahtarların dahili diyotlarından yararlanılmaktadır.

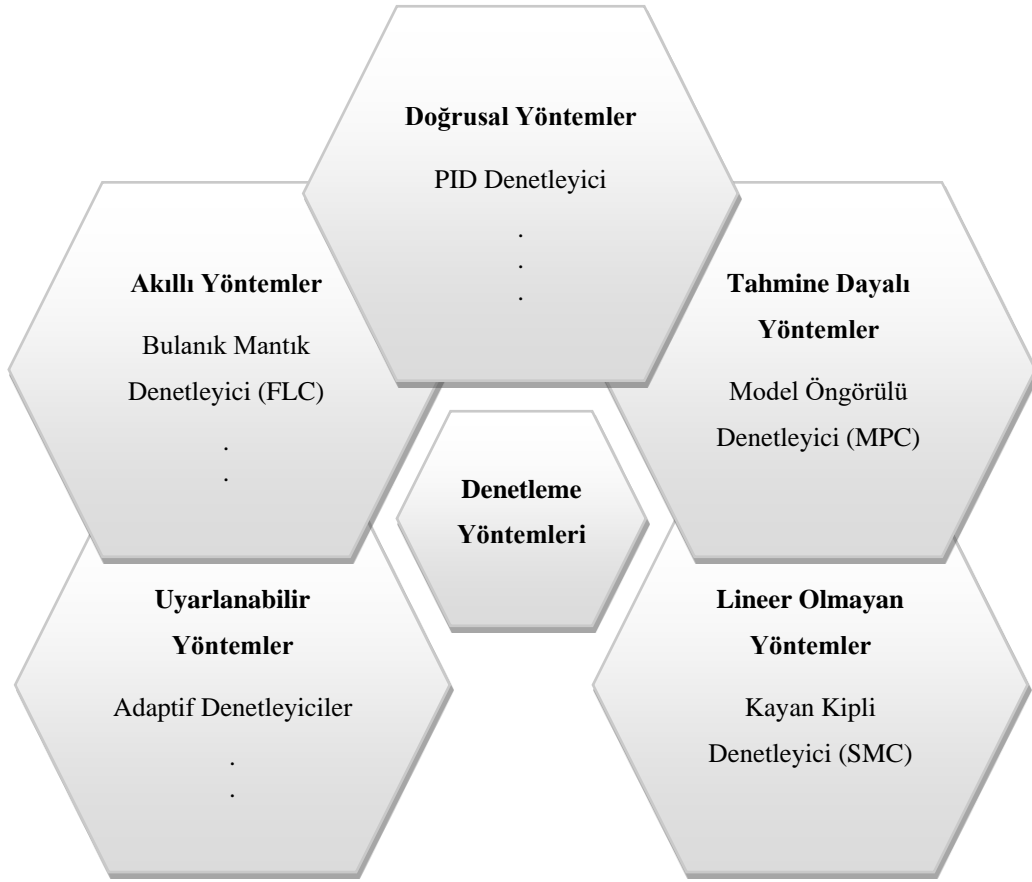


Şekil 4.4. Çift Yönlü Bir Dönüştürücü İçin; Genel Devre Şeması ve Anahtarlama Elemanları İletim – Kesim Durumlarındaki Devre Şemaları

1. durumda, düşürücü dönüştürücü olarak V_A 'dan V_B 'ye yönlü güç aktarımı yapılmakta iken 2. durumda ise, yükseltici dönüştürücü olarak, V_B 'den V_A 'ya yönlü güç aktarımı yapılmaktadır. Bu nedenle bu dönüştürücü, çift yönlü düşürücü – yükseltici tip dönüştürücü olarak adlandırılmaktadır.

4.2. Denetim Yöntemleri

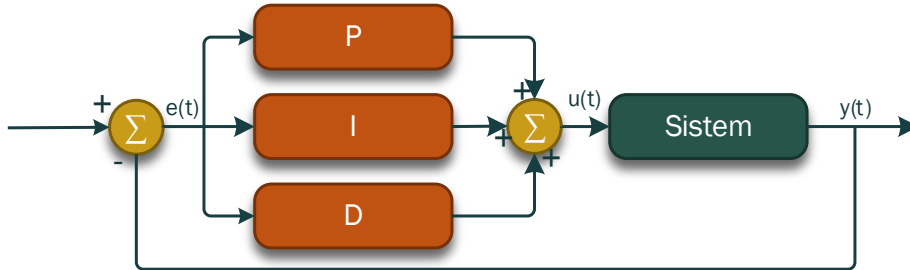
YEK tabanlı enerji sistemleri; birimler arasındaki enerji akışının uygun şekilde yapılabilmesi için gerekli olan, güç elektroniği sistemleri içermektedir. Enerji sisteminin düzgün ve kararlı çalışmasında çok önemli bir rolü bulunan güç elektroniği sistemleri ise farklı denetim yöntemleri kullanılarak geliştirilebilmektedir. Kullanılacak denetim yönteminin seçimi; tasarlanan enerji sisteminin içeriği, çalışma şekli veya sistem parametreleri gibi birçok etkene bağlı olarak yapılabilmektedir. Şekil 4.5'te bu denetim yöntemlerinden bazıları gösterilmiştir (Khan vd., 2020: 21).



Şekil 4.5. Denetim Yöntemleri

4.3.1 PID Denetleyiciler

Oransal – İntegral (Proportional – Integral – PI) veya Oransal – İntegral – Türevsel (Proportional – Integral – Derivative – PID) denetleyiciler, gerek kolay anlaşılır ve uygulanır olması gerekse karmaşık matematiksel işlemler içermeyen yapısı gibi olumlu yanları nedeni ile birçok uygulamada tercih edilmektedir.



Şekil 4.6. PID Denetleyici Genel Şeması

Tipik bir PID denetleyicisinin genel şeması Şekil 4.6'da, transfer fonksiyonu ise Eşitlik 4.15'te verilmiştir.

$$G_c(s) = K_p + K_i/s + K_d s \quad (4.15)$$

Tipik bir PID denetleyicisinin Laplace düzlemindeki transfer fonksiyonu ise Eşitlik 4.16'da verilmiştir.

$$G_c(s) = K_p(1 + 1/(T_i s) + T_d s) \quad (4.16)$$

Burada $T_i = K_p/K_i$ ve $T_d = K_d/K_p$ olacak şekilde sırası ile integral zaman sabiti ve türevsel zaman sabitidir. Tipik bir PID denetleyicisinin ayrık zamanda ifadesi ise Eşitlik 4.17'de verilmiştir.

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T_s \sum_{i=1}^n e(k) + \frac{K_d}{T_s} \Delta e(k) \quad (4.17)$$

Burada $u(k)$ kontrol sinyali, $e(k)$ referans sinyal ile çıkış sinyali arasındaki hata, T_s denetleyicinin örnekleme periyodu ve $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ olacak şekilde hatanın değişimi olarak kabul edilmektedir.

Kolay anlaşılır, kolay uygulanabilir ve karmaşık olmayan PID denetleyiciler; sırası ile oransal kazanç terimi için K_p , integral terimi için K_i ve türev terimi için K_d olmak üzere birer katsayıya ihtiyaç duymaktadır. Bahsi geçen katsayılar, sistemin karmaşıklığından dolayı matematiksel modelin elde edilmesinin zorluğu veya bazı durumlarda mümkün olmaması nedenleri ile çoğu zaman deneme yanılma yöntemi ile belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu yöntemle iyi bir denetleme sağlamak üzere uygun katsayıların belirlenmesi ise oldukça zaman almaktadır. Denetleyici cevabı, uygun katsayı değerleri belirlenmediği takdirde, özellikle integral etkisinden dolayı giderek büyüyen bir hata ile salınımlı, kararsız ve yavaş olmaktadır (Mahmud vd., 2017: 2658).

PID denetleyiciler ile ilgili literatür incelendiğinde iki ana kategoriye ayrıldığı görülmektedir. Birinci kategoride, denetleyici parametreleri belirli bir yöntem ile ayarlandıktan veya optimum şekilde seçildikten sonra denetleme esnasında sabit olarak kullanılmaktadır. Kullanılan birçok parametre ayarlama yönteminden (Anderson vd., 1988: 564; Iwasaki ve Morita, 1990: 90; Kitamori, 1979: 549) en çok tercih edileni ise kararlı sistem cevabı sinyalindeki hata salınımlarının genliği ve frekansını gözlemleyerek parametreleri ayarlayan Ziegler-Nichols yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır (Hang vd., 1991: 112; Ziegler ve Nichols, 1993: 220). Bu kategorideki PID denetleyiciler basittir, ancak değişken parametrelere sahip sistemleri her zaman etkili bir şekilde kontrol edememektedir. İkinci kategori

denetleyicilerde ise parametreler, sistemin matematiksel modelinin yapısı gibi işlem hakkında belirli bilgiler gerektiren parametre tahminine göre çevrimiçi olarak ayarlanmaktadır (Gawthrop, 1990: 36). Bu nedenle bu kategorideki denetleyiciler uyarlamalı PID denetleyiciler olarak adlandırılmaktadır.

Ayrıca bir klasik denetim yöntemi olan PID denetleyicisi, değişken sistem parametrelerine sahip uygulamalarda, bu değişime karşı oldukça hassas olduğundan, etkin bir denetleme gerçekleştirilememektedir (Akçayol, 2004: 129). Bu sorun ise değişken sistem parametreleri doğrultusunda yeni denetleyici parametrelerinin bulunması ve el ile sisteme girilmesi ile kısmen çözülebilmektedir. Fakat bu ve benzeri çözümler birçok uygulama için uygun olmadığından PID denetleyiciler uyarlanabilir diğer denetleyici yöntemler ile desteklenerek kullanılmaktadır. Böylelikle kararlı ve kabul edilebilir sistem cevabı elde edebilmek için değişken sistem parametrelerine uygun olarak uygun PID parametreleri, gerçek zamanlı olarak ayarlanabilmektedir. Bu doğrultuda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Anderson vd., 1988: 564; Gawthrop, 1990: 35; Z. Y. Zhao vd., 1992: 698).

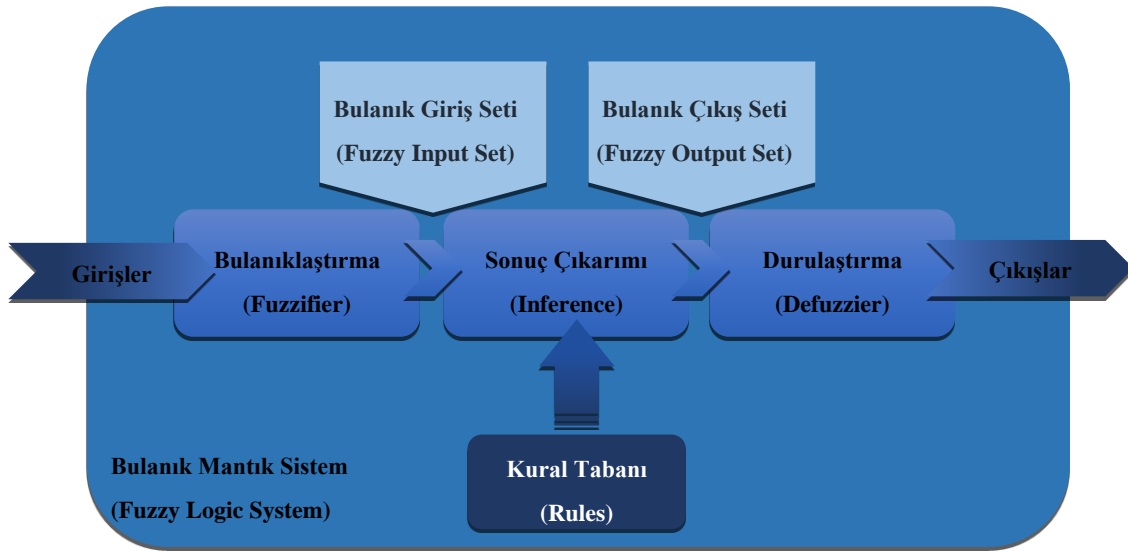
4.3.2 Bulanık Mantık Denetleyiciler

YEK tabanlı enerji sistemlerinin analiz edilmesi, sistem parametrelerinin değişken olmasından dolayı çoğu durumda zor bir problem haline gelmektedir. Bu tip doğrusal olmayan, değişken sistemlerin denetlenebilmesi için kompleks matematiksel modeller oluşturulmasının gerekliliği ise bir denetleme problemidir. Bu probleme bir çözüm olarak Zadeh, bulanık sistemlerin de içerisinde bulunduğu, esnek yöntemler (soft computing) kavramını ileri sürmektedir (Zadeh, 1994: 77). Buna göre, bu yöntemler ile modellenmesi karmaşık olan veya mümkün olmayan, belirsiz sistemlerin denetimi mümkün olmaktadır (Zadeh, 1996: 103).

Bulanık mantıkta bir durum, Aristo mantığı veya çoklu mantıkta olduğu gibi kesin cevaplar ile değerlendirilmek yerine, verilebilecek sözselsel cevaplara yakınlık derecesine göre değerlendirilmektedir. Bulanık sistemler, kesin olmayan değerlerle çalışma, matematiksel modellere ihtiyaç duymama ve doğrusal olmayan sistemleri denetleyebilme gibi avantajlarının yanı sıra, kural tanımlamanın zorluğu, matematiksel hesaplamalardaki karmaşıklığının artması, bu doğrultuda bir mikrodenetleyiciye ihtiyaç duyulması ve maliyetlerin artması gibi dezavantajlara sahiptir (Baykal ve Beyan, 2004: 102).

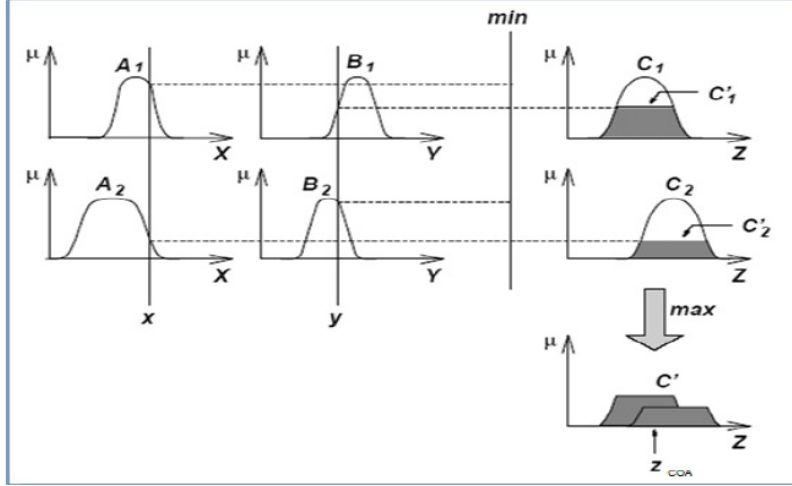
Bir bulanık mantık sistemin genel şeması Şekil 4.7'de verilmiştir. Buna göre, ilk adım bulanıklaştırma adımıdır. Bu adımda, gerçek hayatta kesin olarak tanımlanan sayısal değerlerin üyelik fonksiyonları aracılığıyla bulanık değerlere dönüştürülmesi ve böylelikle bulanık

değerlere sahip kümeler oluşturulması sağlanmaktadır. İkinci adım ise sonuç çıkarımı adımdır. Bu adımda, bulanıklaştırma aşaması sonrasında elde edilen bulanık değerler daha önceden belirlenen kural tabanı doğrultusunda işleme tabi tutulmaktadır. Kural tabanındaki kurallar eğer – o zaman (if – then) yapısı esas alınarak hazırlanmaktadır. Daha sonra kural tabanı aracılığıyla ve, veya, değil gibi bulanık mantık işleçleri ile işlenerek bulanık haldeki sonuçlar elde edilmektedir. Son adım ise durulaştırma adımdır. Bu adımda da sonuç çıkarımı adımından elde edilen bulanık sonuçlar tekrar keskin değerlere dönüştürülerek çıkış olarak verilmektedir. Bu adım, tercih edilen durulaştırma yöntemine göre (Mamdani, Sugeno, vb.) değişkenlik göstermektedir.



Şekil 4.7. Bulanık Sistem Genel Şeması

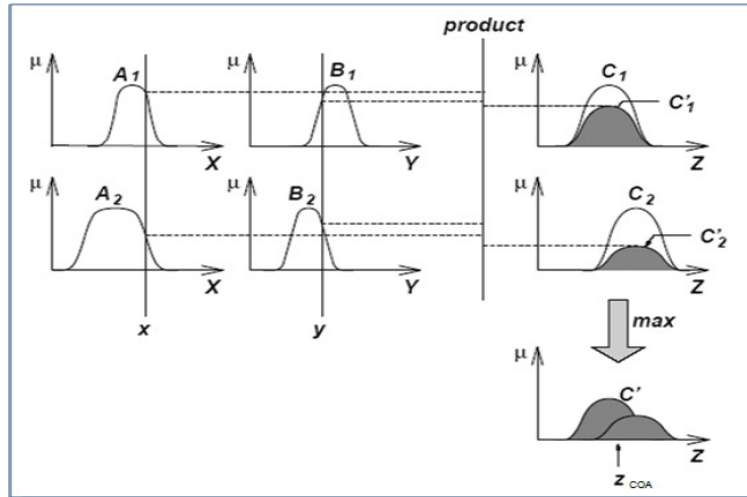
E. H. Mamdani ve S. Assilian tarafından yapılan, 1975 tarihli çalışmada, deneyimli insan operatörlerinden elde edilen bir dizi dilsel kontrol kuralı ile bir buhar motoru ve kazan kombinasyonunu kontrol etmeye yönelik ilk girişim olarak Mamdani tip bulanık çıkarım sistemi önerilmiştir (Mamdani ve Assilian, 1975: 2). Şekil 4.8'de, x ve y olarak tanımlanan iki keskin girişe tabi tutulduğunda, genel z çıkışını elde etmek üzere kullanılabilecek iki giriş bir çıkışlı bir Mamdani tip bulanık çıkarım sisteminin şeması görülmektedir.



Şekil 4.8. Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi (T-norm İçin min T-conorm İçin max Operatörleri Kullanılan)

Kaynak: (Jang vd., 1997: 75)

T-norm ve T-conorm operatörlerinin sırasıyla maksimum ve cebirsel çarpımlar olarak tanımlandığını ve maksimum-minimum bileşimi yerine maksimum-çarpım bileşiminin kullanıldığı varsayılır ise bulanık çıkarım sistemi Şekil 4.9'da verilen şekilde olmaktadır. Burada T-norm ve T-conorm operatörleri değiştirilerek farklı bulanık çıkarım sistemleri oluşturabilmektedir.



Şekil 4.9. Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi (T-norm İçin Çarpım T-conorm İçin max Operatörleri Kullanılan)

Kaynak: (Jang vd., 1997: 76)

E. H. Mamdani ve S. Assilian tarafından yapılan bu çalışmada, buhar kazanı ısısını ve motor hızını denetlemek üzere iki bulanık çıkarım sistemi kullanılmaktadır. Fakat bu çıkarım sistemlerinden çıkış fonksiyonu olarak bulanık bir veri elde edilmektedir. Tesisin girdi olarak yalnızca keskin değerleri kabul edebilir nitelikte olması nedeniyle, bulanık bir küme olarak elde edilen sonuçları keskin değerlere dönüştürmek üzere bir durulaştırıcı kullanılmaktadır.

Durulaştırma, bulanık bir kümeden kesin bir değer temsil eden bir değer olarak çıkarılmasını ifade etmektedir. Durulaştırma için; alan açıortayı (bisector of area), en büyüklerin ortalaması (mean of maximum), en büyüklerin en küçüğü (smallest of maximum), en büyüklerin en büyüğü (largest of maximum) gibi birçok yöntem bulunmakla birlikte burada ağırlık merkezi durulama, (center of gravity) yöntemi tercih edilmiştir. Buna göre Eşitlik 4.18'de verilen ağırlık merkezi durulama eşitliği uygulanarak durulama işlemi gerçekleştirilmiştir (Jang vd., 1997: 75; Zimmermann, 2001: 234).

$$(Z_{COG}) = \frac{\int_Z \mu_A(z) \cdot z \, dz}{\int_Z \mu_A(z) \, dz} \quad (4.18)$$

Burada Z_{COG} , Z çıkış fonksiyonunun ağırlıklı ortalama yöntemi ile durulaştırılmış keskin değeri, $\mu_A(z)$ çıkış üyelik fonksiyonlarının birleştirilmiş halidir.

Durulaştırma işleminin hesaplanması karmaşık ve zaman alıcı olabilmektedir. Bu nedenle de özel donanım desteği gerektirebilmektedir. Gerçek hayat çalışmalarında, bu adımdaki hesaplamaların karmaşıklığı nedeni ile algoritmanın çevrim süresi uzamaktadır. Bu durum da özellikle kaynakların kısıtlı olduğu gömülü sistemler kullanılarak gerçekleştirilen uygulamalarda birtakım sorunlara neden olmaktadır.

Takagi, Sugeno ve Kang tarafından yapılan, 1985 ve 1993 tarihli çalışmalarda, belirli bir giriş-çıkış veri setinden bulanık kurallar üretmeye yönelik sistematik bir yaklaşım geliştirmek amacıyla Sugeno veya Takagi – Sugeno – Kang (TSK) olarak bilinen bir bulanık model önerilmiştir (Sugeno, 1993: 251; Sugeno ve Kang, 1988: 15). Sugeno bulanık modelinde tipik bir bulanık kural şu şekildedir:

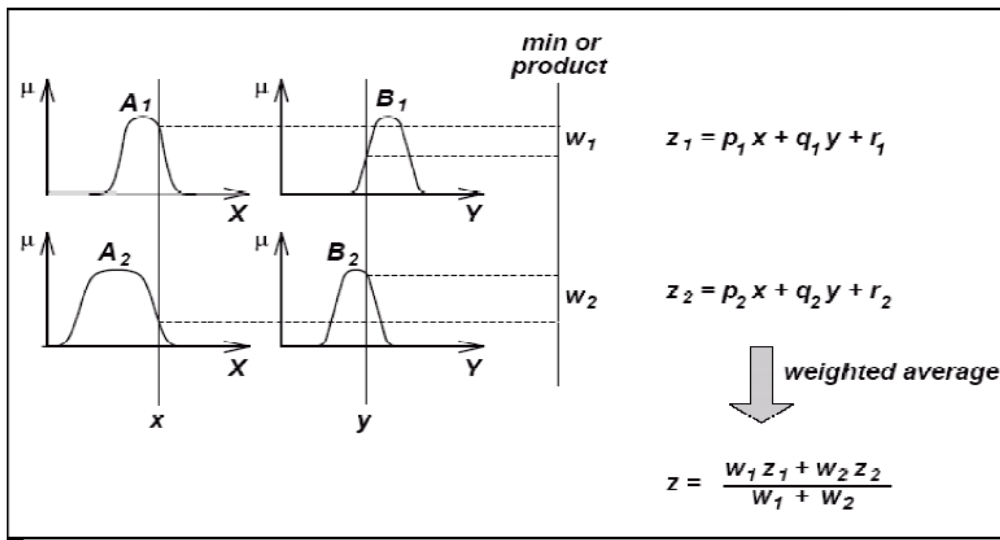
$$\text{Eğer } x, A \text{ ve } y, B \text{ ise } z = f(x, y)$$

Burada A ve B girişlerdeki bulanık kümeleri ifade etmekte iken, $z = f(x, y)$ ise çıkışın keskin bir fonksiyonunu ifade etmektedir. $f(x, y)$, girişler tarafından belirtilen bulanık bölge içinde modelin çıkışını uygun bir şekilde tanımlayabildiği sürece herhangi bir fonksiyon olabilmekte iken, çoğu durumda bir polinom olarak seçilmektedir. $f(x, y)$ birinci dereceden bir polinom olarak belirlendiğinde, elde edilen bulanık çıkarım sistemi, birinci dereceden Sugeno

bulanık modeli olarak adlandırılmaktadır. $f(x,y)$ bir sabit olduğunda ise sıfırıncı dereceden bir Sugeno bulanık modeli elde edilmektedir.

Girişler için belirlenen komşu üyelik fonksiyonları yeterince örtüştüğü sürece, sıfırıncı dereceden Sugeno modelin çıkışı, giriş değişkenlerinin düzgün bir fonksiyonu olmaktadır. Bu durum ise, işlem karmaşıklığının azalmasına ve çevrim süresinin uzun olması durumuna bir çözüm olarak görülebilmektedir.

Şekil 4.10'da birinci dereceden bir Sugeno bulanık modeli için bulanık çıkarım sisteminin genel şeması gösterilmektedir. Her bir kuralın bir keskin çıkışı bulunduğundan sistemin genel çıkışı ağırlıklı ortalama yoluyla elde edilebilmektedir. Bu, bir Mamdani modelinde gereken zaman alıcı durulaştırma sürecinden kaçınmaya yardımcı olmakta ve hatta ağırlıklı ortalama operatörü ağırlıklı toplam operatörü ($z = w_1z_1 + w_2z_2$) ile değiştirilerek, gerekli hesaplamalar daha da azaltılabilmektedir.



Şekil 4.10. Sugeno Bulanık Modeli

Kaynak: (Jang vd., 1997: 81)

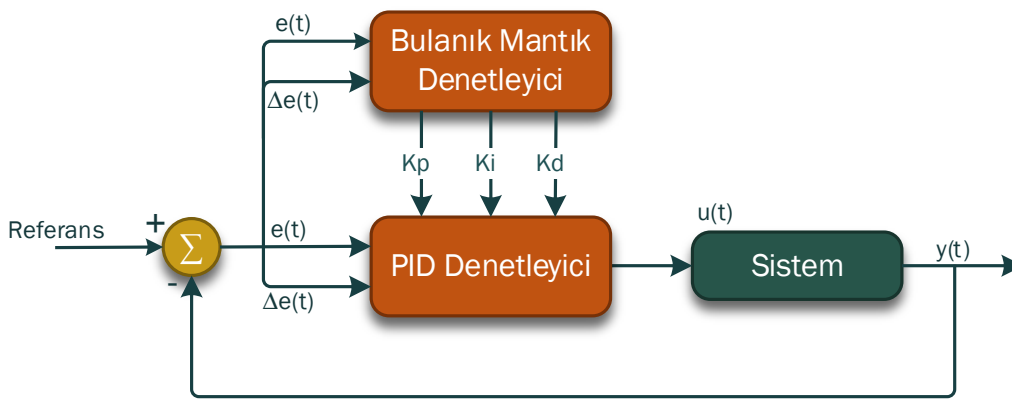
Matematiksel olarak karmaşık ve zaman alıcı durulaştırma işlemi gerektirmeyen, Sugeno bulanık modeli, özellikle örnek – veri tabanlı bulanık modelleme içeren uygulamalarda bahsi geçen avantajlarından dolayı tercih edilmektedir.

4.3.3 Bulanık Mantık PID Denetleyiciler

Bir PID denetleyicisinin katsayılarının her biri, sistemin bir veya daha fazla bölümüne etki edebilmektedir. Bu katsayıların bulunması oldukça zaman alıcı ve zor olmaktadır. Bu

nedenle bir bulanık mantık model ile bu katsayıların belirlenmesi yöntemi birçok uygulamada kullanılmaktadır.

Burada bulanık mantık modeli, sistemin çalışma parametrelerini belirleyip sistemi denetlemek yerine bu işi yapacak olan PID denetleyicisi için gerekli katsayıları belirleyip bulacak şekilde işe koşulmaktadır. Böylelikle sistem, katsayıları bir bulanık mantık denetleyicisi tarafından belirlenen bir PID denetleyici ile kontrol edilmektedir. Bu yöntem ise bulanık mantık PID (Fuzzy PID) denetleyici olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.11’de bulanık mantık bir PID denetleyici genel şeması verilmiştir.



Şekil 4.11. Bulanık Mantık PID Denetleyici Genel Şeması

Burada gerek PID denetleyicisi gerekse onun katsayılarını ayarlama görevini yerine getirmekte olan bulanık mantık denetleyicisi için ortak iki adet giriş belirlenmektedir. Bu iki giriş, bir referans değeri ile ölçülen değer arasındaki fark olarak hata ve bu hatanın bir önceki değeri ile arasındaki fark olarak hatanın değişimi olacak şekilde değerlendirilmektedir.

Bulanık mantık denetleyicisinin kural tabanı, PID denetleyicisinin oransal kazanç terimi K_p , integral terimi K_i ve türev terimi K_d katsayılarının denetleyici cevabına etkisi değerlendirilerek belirlenmektedir. Buna göre;

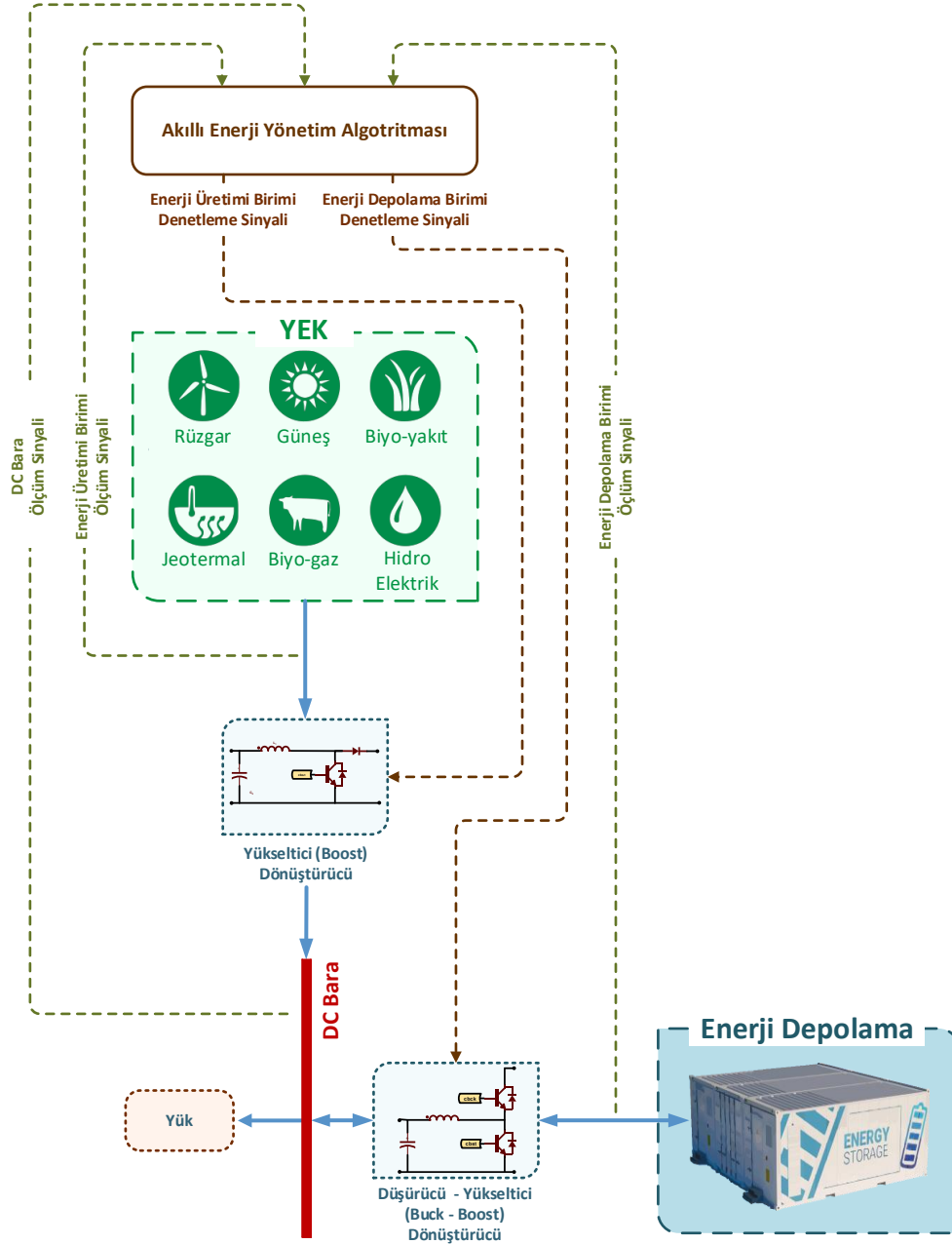
- PID denetleyicisinin oransal kazanç K_p katsayısı, denetleyici cevap sinyalinin referans değere ilk ulaşma süresini belirleme yönünde bir etki sağlamaktadır. Bir diğer değişle denetleyicinin hızını belirleyen bu katsayının, adım cevabındaki kalıcı durum hatasının azaltmasında da sınırlı bir etkisi bulunmaktadır. Bu nedenle bu

katsayının kural tablosu belirlenirken Őu genel ifadeden yararlanılabilmektedir. Hata sinyali bűyűk ise, K_p katsayısı azaltılmalıdır (Baykal ve Beyan, 2004: 390).

- PID denetleyicisinin integral K_i katsayısı, denetleyici adım cevabındaki kalıcı durum hatasının azaltılmasında asıl belirleyici rolű oynamaktadır. Fakat geçici cevapta salınımların (aŐım) oluŐmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bu katsayının kural tablosu belirlenirken Őu genel ifadeden yararlanılabilmektedir. Kalıcı durum hatası bűyűk ise, K_i katsayısı azaltılmalıdır (Baykal ve Beyan, 2004: 390).
- PID denetleyicisinin tűrevsel zaman sabiti K_d katsayısı, denetleyici geçici cevabındaki salınımları (aŐım) ortadan kaldırma yűnűnde bir etki saėlamaktadır. Bu nedenle bu katsayının kural tablosu belirlenirken Őu genel ifadeden yararlanılabilmektedir. AŐım miktarı bűyűk ise, K_d katsayısı azaltılmalıdır (Baykal ve Beyan, 2004: 390).

5. YEK TABANLI ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ

Tez kapsamında gerçekleştirilen şebekeden bağımsız YEK tabanlı enerji sistemi ve bu sistemin denetimini sağlayacak olan akıllı enerji yönetim algoritması genel şeması Şekil 5.1’de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Şebekeden Bağımsız YEK Tabanlı Enerji Sisteminin Genel Şeması

YEK tabanlı enerji yönetim sistemi, ana enerji kaynağı olarak görev yapan enerji üretimi birimi, enerji depolama veya ikincil enerji kaynağı olarak görev yapan enerji depolama ve destek birimi ve bu birimler ile sisteme bağlanan yük(ler) arasındaki enerji akışını yönetme görevini yapan akıllı enerji yönetim algoritmasından meydana gelmektedir.

Önerilen akıllı enerji yönetim algoritması, her bir birimin çift yönlü (bidirectional) dönüştürücüsü (düşürücü – yükseltici) için gerekli anahtarlama sinyallerini üreterek sistem birimleri arasındaki enerji akışının yönetimini gerçekleştirmektedir. Texas Instruments firmasının TMS320F28335 dijital sinyal işlemcisi (Digital Signal Processor – DSP) için gömülü kod üretim tekniği ile geliştirilen bu algoritma ayrıca, bataryalar için oldukça önemli olan SoC verisinin hesaplanması ve PV panellerden mümkün olan en fazla gücü elde edebilmek için kullanılan maksimum güç noktası takibi MGNT işlemlerini de gerçekleştirmektedir.

Burada önemli olan nokta, geliştirilen enerji sistemine bağlı olan herhangi bir yükün herhangi bir anda talep edeceği enerjinin mümkün olan en uzun süre boyunca ve kararlı bir şekilde, şebekeden bağımsız olarak karşılanabilmesinin sağlanmasıdır.

5.1. Enerji Üretimi Birimi (PV Panel)

Enerji üretimi birimi, yaklaşık olarak 1.2kW güç üretebilecek yapıda seçilen Perlight marka PLM-100P/12 model PV panelden meydana gelmektedir. Talep edilen güç miktarına göre, daha fazla sayıda panel seri, paralel veya seri-paralel olacak şekilde bağlanılarak enerji sisteminin çalışma gücü arttırılabilmektedir. Çalışmada kullanılan PV panelin katalog verileri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Perlight Marka PLM-100P/12 Model PV Panel Katalog Verileri

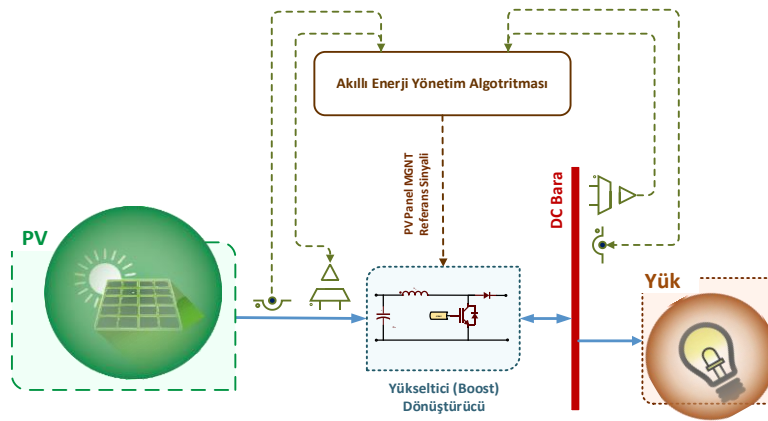
PV Panel Elektriksel Özellikleri	
Maksimum Panel Gücü (P_m)	100 W±%3
Maksimum Gerilimi (V_{mp})	17,7 V
Maksimum Akımı (I_{mp})	5,65 A
Açık Devre Gerilimi (V_{oc})	22 V
Kısa Devre Akımı (I_{sc})	6,21 A
Panel Verimliliği (%)	15,3
PV Panel Mekanik Özellikleri	
Panel Ebatları	1127x676x35
Hücre Sayısı	36 (4x9) Adet
Çalışma Sıcaklığı	-40 °C...+85 °C

Işınımın yetersiz olduğu veya hiç olmadığı durumlarda deneysel çalışmaların devam ettirilebilmesi amacıyla, tez çalışmaları boyunca Chroma marka 62050H-600S model 5kW gücünde bir PV simülatörünün kullanılması tercih edilmiştir. Doğru yapılmış verimli bir

MGNT işleminin, ışınım miktarını ölçmede kullanılan piranometre ile ışınımın anlık değerinin tespit edilmesi veya sıcaklık ve yaşlanmanın maksimum güç noktası üzerindeki etkisinin hesaplanması gibi oldukça karmaşık ve maliyetli gereksinimleri bulunmaktadır. Bu nedenle, PV panel kullanılan bir çalışmada, yapılan MGNT işleminin ne ölçüde gerçekleştirilebildiğinin tespiti çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu simülasyon, aynı zamanda dinamik MGNT test arayüzü sayesinde, geliştirilen MGNT algoritmasının ne kadar verimle çalıştığının tespitini de mümkün kılmaktadır.

PV panellerden elde edilen değişken enerjiyi daha kararlı bir şekilde hem DC baraya hem de yüke aktarabilmek için bir DC-DC dönüştürücü kullanılmaktadır. Burada, PV panelden DC baraya yönlü olacak şekilde, tek yönlü bir enerji akışı gerçekleştirilmektedir. PV panelin zarar görmesine neden olacağından DC baradan PV panele yönlü enerji akışının da engellenmesi gerekmektedir. Ayrıca azami verim sağlanabilmesi için, PV panelden elde edilen enerjinin yükseltilerek DC baraya aktarılması gerekmektedir. Bu nedenle enerji üretimi biriminin denetimi için tek yönlü, yükseltici tip DC-DC dönüştürücü kullanılmıştır.

Buna göre, oluşturulan enerji üretimi birimi genel şeması Şekil 5.2’de gösterilmektedir. PV panelden elde edilen enerji, tek yönlü yükseltici tip DC-DC dönüştürücü ile yükseltilerek DC baraya aktarılmaktadır. Bu yükseltme işlemi, dönüştürücü anahtarlama elemanlarının, akıllı enerji yönetim algoritması tarafından üretilmekte olan anahtarlama sinyalleri doğrultusunda sürülmesi ile gerçekleştirilmektedir. Geliştirilen bu algoritma ile saptır ve gözle yöntemi kullanılarak MGNT işlemi de gerçekleştirilmekte ve böylelikle PV panelden maksimum güç elde edilmektedir. Yük ise DC baradan aldığı enerji ile beslenmektedir.



Şekil 5.2. Enerji Üretimi Birimi Genel Şeması

PV panelden DC baraya olacak şekilde tek yönlü olarak çalışmakta olan DC-DC dönüştürücü tasarım aşamaları aşağıdaki gibidir:

- Küçük-orta büyüklükte bir YEK tabanlı enerji sistemi geliştirilmekte olduğundan anahtarlama elemanı olarak; 200V gerilime ve 30A akıma kadar çalışabilen, N kanal, IRFP250 N MOSFET tercih edilmiştir. Şekil 5.2'den de görüldüğü üzere, tek yönlü çalışacak olan bu dönüştürücüde, alt kolda bir anahtarlama elemanı, üst kolda ise maliyeti düşürebilmek için anahtarlama elemanı yerine bir diyot kullanılmaktadır. Fakat bu tez çalışmasında geliştirilen devre kartlarının farklı durumlarda çift yönlü olarak da çalışabilmesini sağlamak amacı ile iki anahtarlama elemanı kullanılması tercih edilmiştir. Sürekli olarak kesimde tutulmakta olan üst koldaki anahtarlama elemanının dahili diyot sayesinde bir diyot gibi davranması sağlanmaktadır.
- Dönüştürücü çıkış akımındaki dalgalanmaların belirli sınırlar aralığında kalmasını sağlamak için bobin kullanılmaktadır. Kullanılması gereken bobinin minimum değeri, Eşitlik 5.1 ile belirlenmektedir (Kazimierczuk, 2015: 112).

$$L_{min} = \frac{V_{PV}(V_{DC}-V_{PV})}{\Delta I_L f_s V_{DC}} \quad (5.1)$$

Burada; V_{PV} PV panel gerilimini (dönüştürücü giriş gerilimi), V_{DC} DC bara gerilimini (dönüştürücü çıkış gerilimi), ΔI_L bobin akımındaki değişim miktarını ve f_s anahtarlama frekansını temsil etmektedir. V_{PV} 17.2V, V_{DC} 24V, ΔI_L 2.5A ve f_s 10KHz olarak belirlendiğinde kullanılması gereken bobin değeri $1,9933333333333333 \times 10^{-4}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değere yakın olacak şekilde demir nüve üzerine 1,5 mm çapta tel ile 0.2mH değerinde bir bobin elde edilmiş ve kullanılmıştır.

- Dönüştürücüde kullanılması gereken kondansatörün minimum değeri ise Eşitlik 5.2 ile belirlenmektedir (Kazimierczuk, 2015: 112).

$$C_{min} = \frac{\Delta I_L}{8 f_s \Delta V_{DC}} \quad (5.2)$$

Burada; ΔV_{DC} DC bara gerilimindeki değişim miktarını temsil etmektedir. ΔI_L 2.5A, f_s 10KHz olarak belirlendiğinde hesaplanan, kullanılması gereken kondansatör değerine yakın olacak şekilde piyasada mevcut olan 680µF bir kondansatör tercih edilmiştir.

5.2. Enerji Depolama ve Destek Birimi (Batarya)

Enerji depolama ve destek birimi, enerji üretimi biriminden elde edilen enerjiyi gerektiğinde sistemin çalışması için kullanılmak üzere depolayacak yapıda seçilen, Yuasa marka NPW45-12 model 12V VRLA tip bataryadan meydana gelmektedir. Talep edilen güç miktarına göre, daha fazla sayıda batarya seri, paralel veya seri-paralel olacak şekilde kullanılarak enerji sisteminin çalışma gücü değiştirilebilmektedir. Burada çıkış akımını arttırabilmek için iki adet batarya paralel bağlı olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan bataryanın katalog verileri Tablo5.2’de verilmiştir.

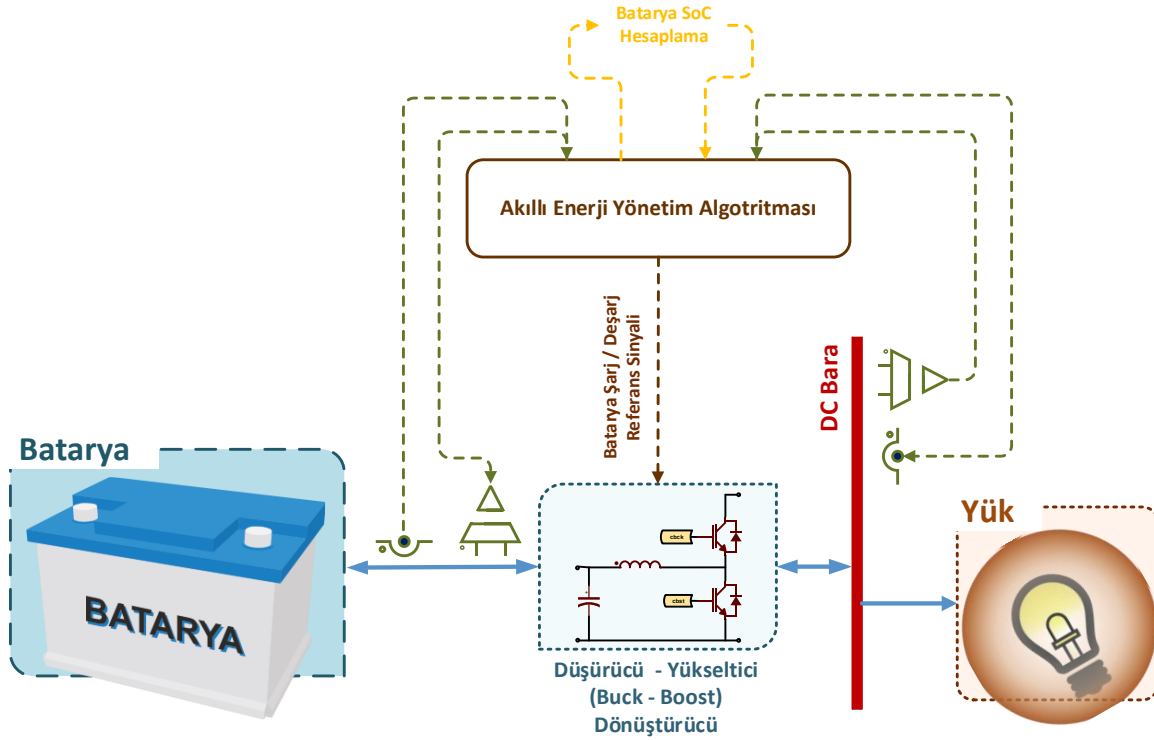
Tablo 5.2. Yuasa Marka NPW45-12 Model 12V VRLA Tip Batarya Katalog Verileri

Batarya Elektriksel Özellikleri	
Nominal Gerilimi	12V
Nominal Kapasitesi	45W / Hücre (10dk) 7.5Ah / 20 Saat (25°C)
Dahili Direnç	~15.4 mΩ
Maksimum Şarj Akımı	1.875A (~0.25C)
Yüzer Şarj Gerilimi	13.65±0.15V (25°C)
Hızlı Şarj Gerilimi	14.5V (±3%)
Hızlı Şarj Akım Sınırı	2.125A
Batarya Mekanik Özellikleri	
Panel Ebatları	151 (±1) x 65 (±1) x 97.5 (±1)
Hücre Sayısı	6 Adet
Çalışma Sıcaklığı	-15 °C...+50 °C

Enerji üretim biriminden elde edilen güç miktarı, yükün talep ettiği güç miktarından fazla olduğu durumlarda elde edilen fazla gücün bataryalarda depolanabilmesi veya yetersiz güç üretimi durumlarında yükün talep ettiği gücü karşılayabilmek için eksik kalan güç miktarının bataryalardan karşılanabilmesi için bir DC-DC dönüştürücü kullanılmaktadır. Burada, batarya şarj durumunda iken DC baradan bataryaya, deşarj durumunda iken bataryadan DC baraya yönlü olacak şekilde, çift yönlü bir enerji akışı gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, şarj durumunda PV panellerden elde edilen fazla güç, şarj denetimi doğrultusunda düşürülerek DC baradan bataryaya aktarılmakta iken deşarj durumunda ise bataryada depolanan güç, yükü beslemek üzere yükseltilerek bataryadan DC baraya aktarılmaktadır. Bu nedenle enerji depolama ve destek birimi için çift yönlü, düşürücü – yükseltici tip DC-DC dönüştürücü kullanılmıştır.

Buna göre, oluşturulan enerji depolama ve destek birimi genel şeması Şekil 5.3’te gösterilmektedir. Burada kullanılacak olan çift yönlü düşürücü – yükseltici tip DC-DC dönüştürücününün topolojisi bir önceki bölümde enerji üretim birimi için geliştirilen dönüştürücü ile aynı yapıda olduğundan aynı tip MOSFET tercih edilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan

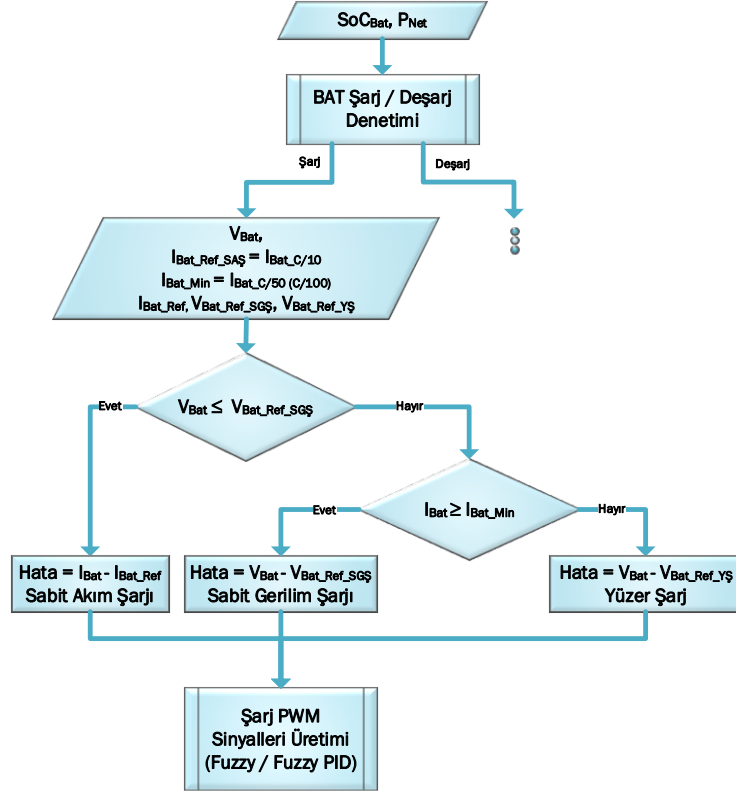
verilerin de çok yakın olması nedeni ile aynı tasarım aşamaları takip edilerek yakın bobin ve kondansatör değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.3. Enerji Depolama ve Destek Birimi Genel Şeması

Enerji depolama ve destek birimi için kullanılan bataryaların, şarj veya deşarj durumlarından hangisinde olması gerektiğine karar verilmesi ve şarj veya deşarj durumları sırasında denetiminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda geliştirilen akıllı enerji yönetimi algoritmasının batarya şarj / deşarj denetimi bölümünün şarj kısmı akış diyagramı Şekil 5.4'te gösterilmektedir.

Burada ilk olarak, SoC algoritması tarafından elde edilen doluluk durumu verisi ve net güç (P_{Net}) verisi değerlendirilerek bataryanın şarj veya deşarj durumlarından hangisinde olması gerektiğine karar verilmektedir. Burada net güç, Eşitlik 5.3'te gösterilen şekilde hesaplanmakta ve pozitif veya negatif değerlerde olması durumlarına göre karar verilmektedir.



Şekil 5.4. Geliştirilen Batarya Şarj/Deşarj Algoritması Şarj Kısmı Akış Diyagramı

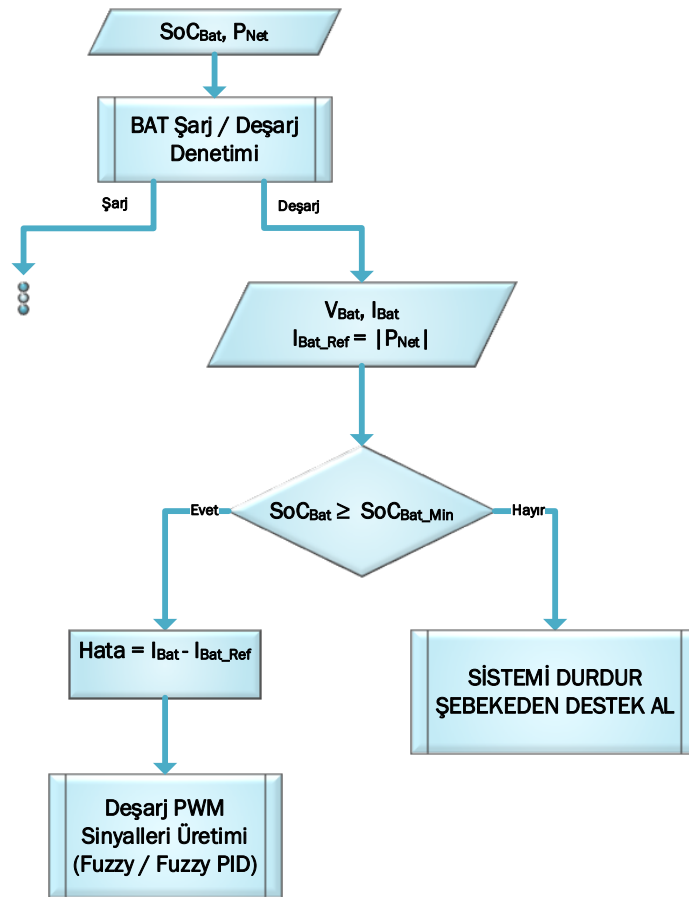
Batarya doluluk durumunda ise bataryayı derin deşarjdan korumak üzere belirlenen eşik değerinin üzerinde olup olmamasına göre karar verilmektedir. Elbette ki bu değer, bataryayı derin deşarj durumunun etkilerinden korumak üzere belirlenmiş bir değer olmakla birlikte bu etkilere karşı daha hassas batarya tipleri için daha yüksek değerler veya tam aksine bu etkilere karşı daha az hassas olan batarya tipleri için ise daha düşük değerler tercih edilebilmektedir. Bu çalışmada, batarya şarj durumu, 0,5'in üzerinde ise batarya dolu olarak değerlendirilirken bu değer altında ise boş olarak kabul edilmektedir.

$$P_{Net} = P_{PV} - P_{Yük} \quad (5.3)$$

Burada P_{PV} PV panellerden elde edilen güç, $P_{Yük}$ ise yükün talep ettiği güç miktarıdır. Eğer net güç pozitif ise PV panellerden elde edilen güç, yükün talep ettiği gücü asgari düzeyde karşılayabilir anlamına gelmektedir. Bu durumda yükün talebi karşılandıktan sonra batarya doluluk durumu belirli bir değer altında ise batarya şarj moduna geçirilerek fazla olan enerji bataryada depolanabilmektedir. Eğer net güç negatif ise PV panellerden elde edilen güç, yükün talep ettiği gücü karşılayamıyor anlamına gelmektedir. Bu durumda ise yükün talebi mümkün olduğunca PV panellerden karşılandıktan sonra eksik kalan kısmı ise batarya doluluk durumu belirli bir değer üzerinde ise batarya deşarj moduna sokularak bataryadan karşılanmaktadır.

Eğer net güç pozitif ve SoC 0,5'ten küçük ise batarya şarj moduna geçmektedir. Bu durumda sabit gerilim şarjı için belirlenen referans gerilim değerinin altında olan batarya gerilimi, bu değere ulaşınca dek sabit akım şarjı için belirlenen akım değeri ile şarj edilmektedir. Batarya uçlarındaki gerilim, sabit gerilim şarjı için belirlenen referans gerilim değerine ulaştığında, bu gerilim değeri sabit olacak şekilde bataryanın şarj edildiği sabit gerilim şarjı aşamasına geçilmektedir. Bu aşamada, batarya uçlarındaki gerilim sabit kalırken batarya şarj akımı giderek azalmaktadır. Bu akım değeri belirlenen bir değerin altına indiğinde ise yüzer şarj aşamasına geçilmektedir. Bu aşamada ise bataryanın tam dolu olma durumunu koruması için batarya geriliminin belirlenen referans gerilim değerinde sabit kalması sağlanmaktadır.

Geliştirilen akıllı enerji yönetimi algoritmasının batarya şarj/deşarj denetimi bölümünündeşarj kısmı akış diyagramı Şekil 5.5'te gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Geliştirilen Batarya Şarj/Deşarj Algoritması Deşarj Kısmı Akış Diyagramı

Eğer net güç negatif ve SoC 0,5'ten büyük ise batarya deşarj moduna geçmektedir. Bu durumda PV panellerden elde edilen güç, yükün talep ettiği gücü karşılayamamaktadır. Eksik kalan bu güç bataryanın deşarjı ile tamamlanmaya çalışılmaktadır. Geliştirilen algoritma, PV panellerden elde edilen gücü takviye edecek şekilde, gerekli olan miktarda gücü yüke aktarabilmek üzere anahtarlama sinyallerini üretmekte ve anahtarlama elemanlarına göndermektedir. Burada deşarj işlemi, bataryayı derin deşarjdan veya deşarj akımı sınırlarından çıkmaktan korumak üzere belirlenen referanslar doğrultusunda gerçekleştirilmektedir.

Geliştirilen YEK tabanlı enerji sisteminin denetimi için önemli olan öğelerden biri de enerji depolama ve destek biriminde kullanılan bataryaların SoC bilgisidir. Sistemde fazla enerji üretimi durumunda bu fazla enerjiyi depolama, yetersiz enerji üretimi durumunda ise destek enerji sağlama görevi üstlenecek olan bataryaların SoC verisi, sistemin işleyişini sağlıklı ve kararlı bir şekilde sürdürebilmesi için oldukça değerlidir. Ayrıca bu veri, batarya denetim sistemi için batarya ömrünün daha verimli kullanılmasının sağlanabilmesi ve aşırı şarj veya derin deşarj gibi durumların önlenmesi bakımından da oldukça önemli bir rol oynamaktadır.










Mevcut akım ve gerilim değerlerinin ölçümü doğru yapıldığı ve yeterli yeniden kalibrasyon noktası oluşturulduğu takdirde amper saat sayımı yöntemi uygulaması kolay ve güvenilir bir SoC belirleme yöntemidir. Bu nedenle SoC belirlemek için amper saat sayımı yöntemi tercih edilmiştir. Eşitlik 3.7 doğrultusunda geliştirilen algoritmanın kaba kodu aşağıda verilmiştir (akım kayıpları yok sayılmaktadır).










- Başlangıç SoC değeri, SoC_0 belirlenir
- Nominal kapasite, $C_N (Q_{rated})$ belirlenir
- Örnekleme periyodu belirlenir
- Batarya akımı, I_{bat} ölçülür
- Batarya akımının toplam değişimi hesaplanır
- SoC değeri hesaplanır

Bu yöntemde bir başlangıç SoC değerine (SoC_0) ihtiyaç duyulmaktadır. Burada ilk andaki SoC verisi belirlenmekte ve SoC_0 olarak kullanılmaktadır. Yeniden kalibrasyon noktası olarak belirlenen tam şarj durumuna ulaşıldığında, SoC_0 verisi 1 olarak yeniden ayarlanmaktadır. Nominal kapasite, üretici tarafından sağlanan bir veri olup, katalog verilerinden elde edilerek kullanılmaktadır. Örnekleme periyodu ise $1/Çalışma\ Frekansı$ olacak şekilde belirlenmektedir.

5.3. YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumları

YEK tabanlı enerji yönetim sistemini oluşturan gerek enerji üretim birimi olarak kullanılan PV panelin, gerekse enerji depolama ve destek birimi olarak kullanılan bataryanın durumlarındaki değişimler, sistemin de farklı durumlarda çalışmasını gerektirmektedir. Şekil 5.6'da yük bağlı iken ve bağlı değil iken YEK tabanlı enerji yönetim sistemi durum değerlendirme tablosu verilmiştir.

		Enerji Üretimi Birimi				
		 Yük Bağlı	 Üretim Yok	 Üretim Yetersiz	 Üretim Yeterli	 Üretim Fazla
Enerji Depolama ve Destek Birimi	 Boş	1	2	3	4	
	 Dolu & Yetersiz	5	6	7	8	
	 Dolu & Yeterli	9	10	11	12	
	 Tam Dolu	13	14	15	16	

		Enerji Üretimi Birimi				
		 Yük Bağlı Değil	 Üretim Yok	 Üretim Yetersiz	 Üretim Yeterli	 Üretim Fazla
Enerji Depolama ve Destek Birimi	 Boş	17	18	19	20	
	 Dolu & Yetersiz	21	22	23	24	
	 Dolu & Yeterli	25	26	27	28	
	 Tam Dolu	29	30	31	32	

Şekil 5.6. Yük Bağlı İken ve Bağlı Değil İken YEK tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Durum Değerlendirme Tablosu




















YEK tabanlı enerji yönetimi sisteminde, enerji üretimi birimi ve enerji depolama ve destek biriminin farklı durumlarına bağlı olarak 32 adet farklı sistem durumu meydana gelmektedir. Fakat bu sistem durumlarının bir kısmı aynı denetim yapısını gerektirdiğinden birlikte değerlendirilmiştir. Buna göre;

- 1. durumda enerji üretimi olmadığı ve batarya boş olduğundan, 2. durumda enerji üretimi yetersiz ve batarya boş olduğundan ve 5. durumda ise enerji üretimi olmadığı ve batarya yetersiz miktarda dolu olduğundan yük talebi karşılanamamaktadır. Bu üç durum, sistem çalışma durumu 1 olarak belirlenmiştir.
- 3, 7, 11 ve 15 nolu durumlarda, yük talebini karşılayabilecek kadar bir enerji üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu dört durum, sistem çalışma durumu 2 olarak belirlenmiştir.
- 4, 8, 12 ve 16 nolu durumlarda, enerji üretimi yükün talep ettiği enerji miktarından daha fazla gerçekleştirilmektedir. Fazla üretilen enerji, bataryayı şarj etmek için kullanılmaktadır. Bu dört durum, sistem çalışma durumu 3 olarak belirlenmiştir.
- 10 ve 14 nolu durumlarda, enerji üretimi yükün talep ettiği enerji miktarından daha az gerçekleştirilmektedir. Fakat bataryanın desteği ile birlikte yük talebi karşılanabilmektedir. Bu iki durum, sistem çalışma durumu 4 olarak belirlenmiştir.

- 9 ve 13 nolu durumlarda, enerji üretimi olmamakta, fakat batarya ile yük talebi karşılanabilmektedir. Bu iki durum, sistem çalışma durumu 5 olarak belirlenmiştir.
- 6. durumda ise enerji üretimi ve batarya tek başlarına yük talebini karşılamada yetersiz olmakla birlikte; iki birim birlikte yük talebini karşılamada yeterli olmadığı taktirde sistem çalışma durumu 1, yeterli olduğu taktirde de sistem çalışma durumu 4 olarak değerlendirilmektedir.
- 18, 19, 20, 22, 23, 24, 26, 27 ve 28 nolu durumlarda, sistemde yük olmadığından üretilen enerji doğrudan bataryayı şarj etmek için kullanılmaktadır. Bu dokuz durum, sistem çalışma durumu 6 olarak belirlenmiştir.
- 17, 21, 25, 29, 30, 31 ve 32 nolu durumlarda ise sistemde yük olmadığından ve bataryanın da dolu olmasından dolayı üretilen enerji (eğer mümkün ise) kullanılmamaktadır. Bu yedi durum, sistem çalışma durumu 7 olarak belirlenmiştir.

Bu değerlendirmeler sonucunda belirlenen, yük bağlı iken ve bağlı değil iken YEK tabanlı enerji yönetim sistemi çalışma durumları Tablo 5.3'te verilmiştir.

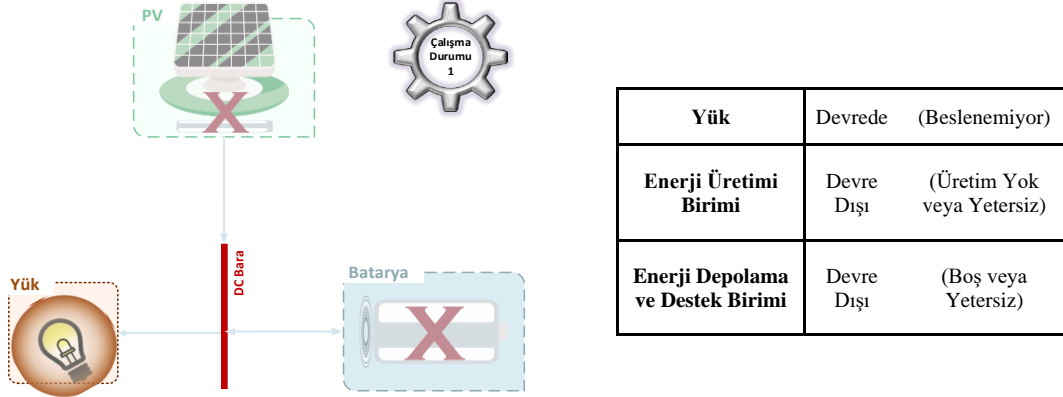
Tablo 5.3. Yük Bağlı İken ve Bağlı Değil İken YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumları

		Enerji Üretimi Birimi							Enerji Üretimi Birimi				
		 Yük Bağlı	 Üretim Yok	 Üretim Yetersiz	 Üretim Yeterli	 Üretim Fazla	 Yük Bağlı Değil	 Üretim Yok	 Üretim Yetersiz	 Üretim Yeterli	 Üretim Fazla		
Enerji Depolama ve Destek Birimi	 Boş	 Boş	Çalışma Durumu 1	Çalışma Durumu 1	Çalışma Durumu 2	Çalışma Durumu 3	 Boş	Çalışma Durumu 7	Çalışma Durumu 6	Çalışma Durumu 6	Çalışma Durumu 6		
	 Dolu & Yetersiz	Çalışma Durumu 1	Çalışma Durumu 1/4	Çalışma Durumu 2	Çalışma Durumu 3	 Dolu & Yetersiz	Çalışma Durumu 7	Çalışma Durumu 6	Çalışma Durumu 6	Çalışma Durumu 6	Çalışma Durumu 6		
	 Dolu & Yeterli	Çalışma Durumu 5	Çalışma Durumu 4	Çalışma Durumu 2	Çalışma Durumu 3	 Dolu & Yeterli	Çalışma Durumu 7	Çalışma Durumu 6	Çalışma Durumu 6	Çalışma Durumu 6	Çalışma Durumu 6		
	 Tam Dolu	Çalışma Durumu 5	Çalışma Durumu 4	Çalışma Durumu 2	Çalışma Durumu 3	 Tam Dolu	Çalışma Durumu 7	Çalışma Durumu 7	Çalışma Durumu 7	Çalışma Durumu 7	Çalışma Durumu 7		

Burada tüm çalışma durumlarında; yük enerji harcayan, PV paneller ise enerji üreten birim olarak değerlendirilmektedir. Enerji depolama ve destek birimi ise bazı çalışma durumlarında enerji üreten bazı çalışma durumlarında ise enerji harcayan olarak değerlendirilmektedir.

Çalışma Durumu 1

YEK tabanlı enerji yönetim sistemi Çalışma Durumu 1 genel şeması Şekil 5.7'de gösterilmektedir.

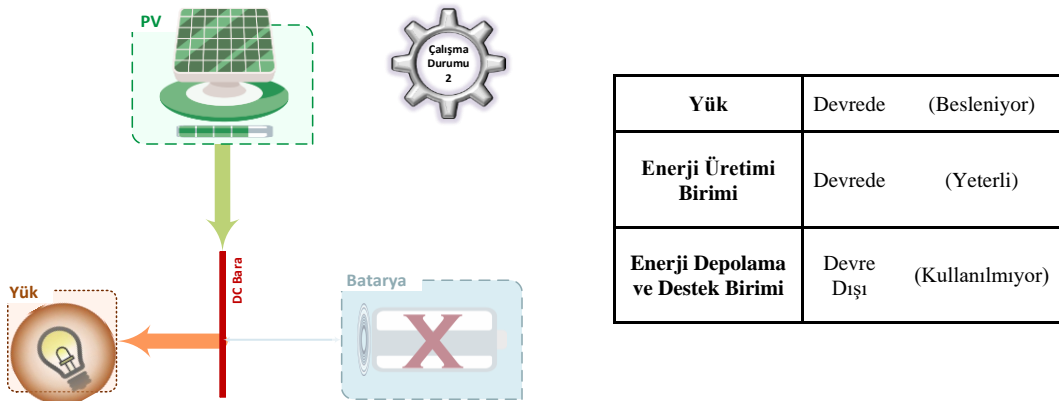


Şekil 5.7. YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumu 1 Şeması

Bu çalışma durumunda, enerji üretimi biriminden DC baraya, enerji depolama ve destek biriminden DC baraya, DC baradan enerji depolama ve destek birimine veya DC baradan yüke herhangi bir enerji akışı yoktur. Enerji üretimi yok veya yetersizdir. Depolama elemanı ise boş veya yetersizdir. Dolayısı ile yük talebinin karşılanamadığı bu istenmeyen sistem çalışma durumunda YEK tabanlı enerji yönetim sistemi kapalıdır.

Çalışma Durumu 2

YEK tabanlı enerji yönetim sistemi çalışma durumu 2 genel şeması Şekil 5.8'de gösterilmektedir.

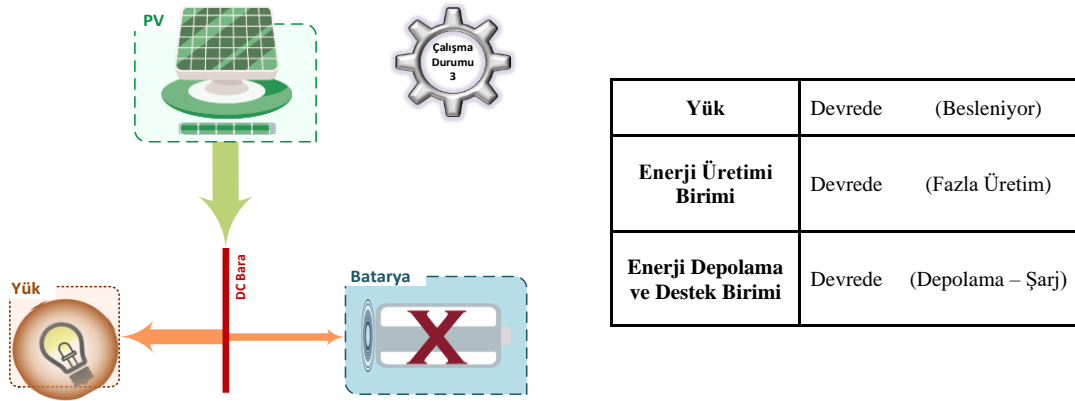


Şekil 5.8. YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumu 2 Şeması

Bu sistem çalışma durumunda, enerji üretim biriminden DC baraya ve DC baradan yüke bir enerji akışı vardır. Enerji üretimi ancak yük talebini karşılayacak miktarda olduğundan depolama elemanı devre dışıdır. Dolayısıyla enerji depolama ve destek biriminden DC baraya, DC baradan enerji depolama ve destek birimine herhangi bir enerji akışı yoktur.

Çalışma Durumu 3

YEK tabanlı enerji yönetim sistemi çalışma durumu 3 genel şeması Şekil 5.9'da gösterilmektedir.

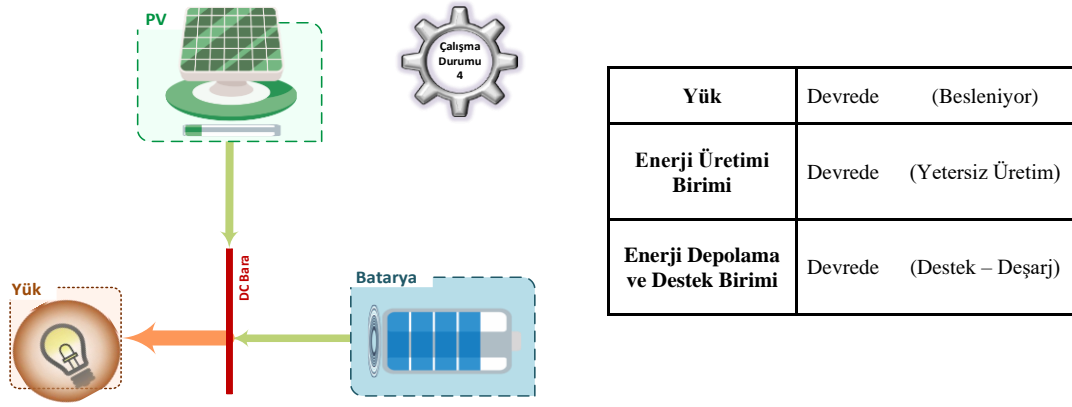


Şekil 5.9. YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumu 3 Şeması

Bu sistem çalışma durumunda, enerji üretim biriminden DC baraya, DC baradan yüke ve DC baradan enerji depolama ve destek birimine bir enerji akışı vardır. Enerji üretimi yük talebini karşılayacak miktardan daha fazla olduğundan üretilen fazla enerji depolama elemanını şarj etmek üzere kullanılmaktadır. Dolayısıyla enerji depolama ve destek biriminden DC baraya, herhangi bir enerji akışı yoktur.

Çalışma Durumu 4

YEK tabanlı enerji yönetim sistemi çalışma durumu 4 genel şeması Şekil 5.10'da gösterilmektedir.

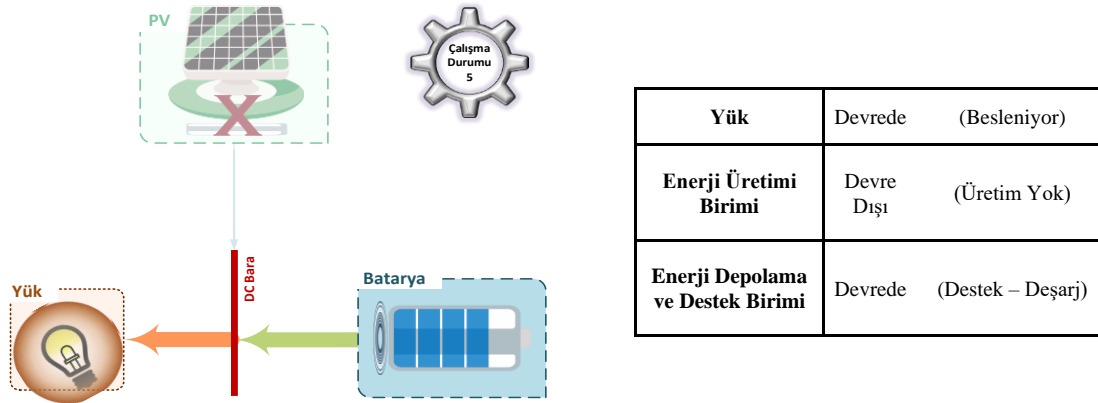


Şekil 5.10. YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumu 4 Şeması

Bu sistem çalışma durumunda, enerji üretim biriminden DC baraya, enerji depolama ve destek biriminden DC baraya ve DC baradan yüke bir enerji akışı vardır. Enerji üretimi yük talebini karşılayacak miktardan daha az olduğundan enerji depolama elemanı, yük talebini karşılamada destek olmak üzere deşarj edilerek kullanılmaktadır. Dolayısı ile, DC baradan enerji depolama ve destek birimine herhangi bir enerji akışı yoktur.

Çalışma Durumu 5

YEK tabanlı enerji yönetim sistemi çalışma durumu 5 genel şeması Şekil 5.11’de gösterilmektedir.

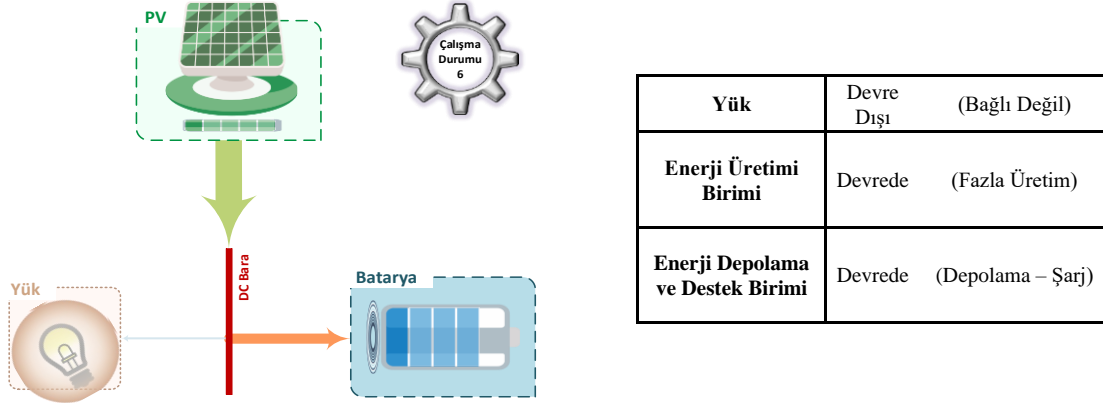


Şekil 5.11. YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumu 5 Şeması

Bu sistem çalışma durumunda, enerji depolama ve destek biriminden DC baraya ve DC baradan yüke bir enerji akışı vardır. Enerji üretim hiç olmadığından enerji depolama elemanı, yük talebini karşılamak üzere deşarj edilerek kullanılmaktadır. Dolayısı ile enerji üretimi biriminden DC baraya ve DC baradan enerji depolama ve destek birimine herhangi bir enerji akışı yoktur.

Çalışma Durumu 6

YEK tabanlı enerji yönetim sistemi çalışma durumu 6 genel şeması Şekil 5.12’de gösterilmektedir.

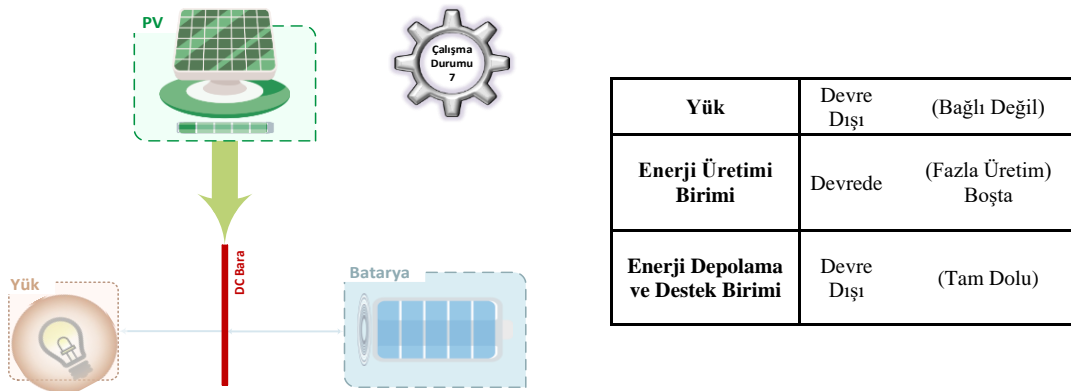


Şekil 5.12. YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumu 6 Şeması

Bu sistem çalışma durumunda, yük bağlı olmadığından DC baradan yüke bir enerji akışı yoktur. Enerji üretimi biriminden DC baraya, DC baradan enerji depolama ve destek birimine bir enerji akışı vardır. Enerji üretim biriminden elde edilen tüm enerji, depolama elemanını şarj etmek üzere kullanılmaktadır. Dolayısı ile enerji depolama ve destek biriminden DC baraya herhangi bir enerji akışı yoktur.

Çalışma Durumu 7

YEK tabanlı enerji yönetim sistemi çalışma durumu 7 genel şeması Şekil 5.13’te gösterilmektedir.



Şekil 5.13. YEK Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Çalışma Durumu 7 Şeması

Bu sistem çalışma durumunda, yük bağı olmadığından DC baradan yüke bir enerji akışı yoktur. Enerji depolama elemanı tam dolu olduğundan DC baradan enerji depolama ve destek birimine de bir enerji akışı yoktur. Enerji üretim biriminden DC baraya bir enerji akışı vardır. Enerji üretim biriminden elde edilen enerji kullanılmamaktadır. Üretilen enerjinin boşta kaldığı bu istenmeyen çalışma durumunda ise sistem beklemededir.

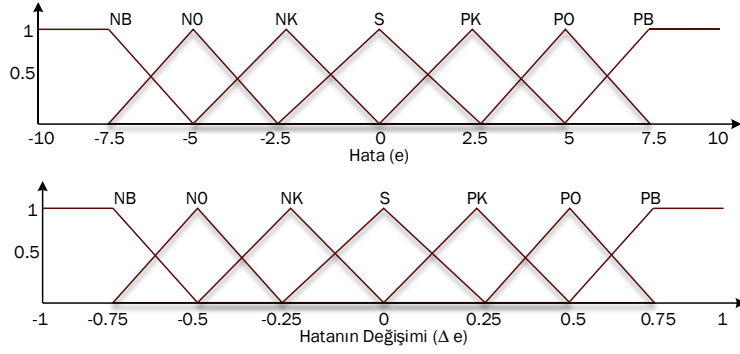
5.4. YEK Tabanlı Enerji Sistemi Denetim Algoritmaları

Geliştirilen akıllı enerji yönetim algoritması, her bir birimin çift yönlü düşürücü – yükseltici dönüştürücüsü için gerekli anahtarlama sinyallerini üreterek gerek kendi iç denetimlerini gerekse birimler arasındaki enerji akışının denetimini gerçekleştirmektedir. Tüm bu denetimleri gerçekleştirebilmek üzere geliştirilen akıllı enerji yönetimi algoritması, bulanık mantık denetleyici ve bulanık mantık PID denetleyici olmak üzere iki farklı denetleme sistemi kullanılarak geliştirilmiştir.

5.4.1 Bulanık Mantık Denetleyici

Enerji Üretimi Birimi Denetimi

Tez çalışmasında geliştirilen akıllı enerji yönetim algoritmasında kullanılan bulanık mantık denetleyicide, bulanıklaştırma işlemi için üçgen tip üyelik fonksiyonları ve Mamdani çıkarım sistemi, durulaştırma için ise ağırlık merkezi yöntemi tercih edilmiştir. Burada ilk olarak, PV panel gerilim ve akım değerleri sensörler ile belirlenmekte ve mikrodenetleyici için uygun oranlarda düşürülerek (azami 3,3V) analog dijital dönüştürücü (Analog to Digital Converter – ADC) modülü vasıtası ile sayısal verilere dönüştürülmektedir. Sayısallaştırılmış olan bu değerler, tekrar aynı oranlarda yükseltilerek, gerçek gerilim ve akım değerleri sayısal olarak elde edilmektedir. Bu değerler, bulanık mantık denetleyicinin giriş değerlerini oluşturmak üzere kullanılmaktadır. Bulanık mantık denetleyicinin girişleri ise hata ve hatanın değişimi olarak değerlendirilmektedir. Burada hata, referans gerilim ile PV panel gerilimi arasındaki fark iken; hatanın değişimi ise o andaki hata değeri ile bir önceki hata değeri arasındaki fark olarak belirlenmiştir. Referans gerilim değeri ise bir PV panel katalog değeri olan, maksimum güçteki maksimum PV panel gerilimi olarak belirlenmiştir. Her bir giriş için yedişer adet olan üçgen tip üyelik fonksiyonları Şekil 5.14'te gösterildiği üzere oluşturulmuş ve C dilinde bu fonksiyonlar birer matris içerisinde tanımlanmıştır. Hata girişi için üyelik fonksiyonları -10 ile 10 aralığında seçilmişken hatanın değişimi için -1 ile 1 aralığı seçilmiştir.



Şekil 5.14. Enerji Üretim Birimi Bulanık Mantık Denetleyici Hata ve Hatanın Değişimi İçin Belirlenen Üyelik Fonksiyonları

Daha sonra Eşitlik 5.4'te verilen, iki noktası belli olan bir eğri üzerindeki üçüncü bir noktayı belirlemek için kullanılan, doğrusal interpolasyon (*linear interpolation*) yöntemi ile her iki girişin o anki değerinin hangi üyelik fonksiyonundaki hangi değere sahip olduğu belirlenmiştir. Her iki girişin o anki değerinin hangi üyelik fonksiyonuna ait olduğu bir matris içerisinde, hangi üyelik fonksiyonundaki hangi değere sahip olduğu ise başka bir matris içerisinde tutulmuştur.

$$y = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}(x - x_1) + y_1 \quad (5.4)$$

Böylelikle o anki hata ve hatanın değişimi değerlerinin bulanıklaştırma işlemi gerçekleştirilmiş ve ayrıca elde edilen bu matrisler vasıtası ile Şekil 5.15'te verilen kural tabanındaki hangi kuralların aktif olduğu da belirlenebilmiştir. Kural tabanında, yedişer adet tanımlanan giriş üyelik fonksiyonları için toplam 49 adet kural tanımlanmıştır. Bu kurallardan hangilerinin aktif olacağı bilgisinin yanında ne kadar aktif olacağına da belirlenebilmesi için, ki bu işleme kural aktiflik seviyesi belirleme de denilmektedir, iki giriş ve (and) işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem için de iki girişin üyelik fonksiyonlarındaki değerlerinin minimum olanı alınmıştır. Böylelikle her bir kural için bir aktiflik seviyesi belirlenmiştir.

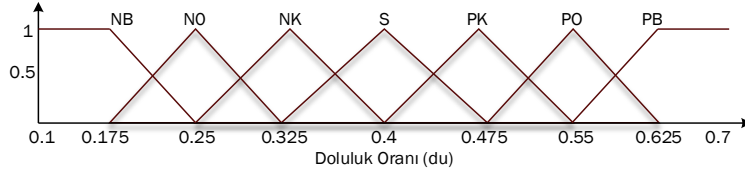
E	NB	NG	NK	S	PK	PO	PB
0	PB	1 PB	2 PM	3 PM	4 PS	5 PS	6 Z
7	PB	8 PM	9 PM	10 PS	11 PS	12 Z	13 NS
14	PM	15 PM	16 PS	17 PS	18 Z	19 NS	20 NS
21	PM	22 PS	23 PS	24 Z	25 NS	26 NS	27 NM
28	PS	29 PS	30 Z	31 NS	32 NS	33 NM	34 NM
35	PS	36 Z	37 NS	38 NS	39 NM	40 NM	41 NB
42	Z	43 NS	44 NS	45 NM	46 NM	47 NB	48 NB

Şekil 5.15. Enerji Üretimi Birimi Bulanık Mantık Denetleyici Kural Tabanı

Daha önce elde edilen aktiflik seviyeleri, her biri 204 elemanlı birer vektör olarak tanımlanmış çıkış üyelik fonksiyonları ile yine ve (and) işlemine tabi tutularak minimumları alınmış, bir anlamda bu fonksiyonlara limitleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylelikle 49 adet kural aktiflik seviyesi ile sınırlandırılmış 49 satır (kural numarası), 204 sütunlu (fonksiyon değerleri) bir matris elde edilmiştir.

Her bir kuralın veya (or) işlemi ile birleşimi ile tek bir çıkış fonksiyonu elde edilmiştir. Bu işlem için ise elde edilen 49 satır 204 sütunlu matrisin her bir satırının en büyük değeri alınmış ve bir matris içerisine aktarılmıştır. Böylelikle tek bir 204 elemanlı çıkış vektörü elde edilmiştir.

Fakat elde edilen çıkış fonksiyonu bulanıktır. Bu bulanık değeri durulaştırmak için ağırlık merkezi durulama yöntemi tercih edilmiştir. Şekil 5.16'da görüldüğü üzere çıkış için belirlenen üçgen tip üyelik fonksiyonları 0,1 ile 0,7 aralığında seçilmiştir. Bunun nedeni ise bu çıkışın, devredeki yükselten dönüştürücünün anahtarlama elemanı için anahtarlama sinyali olan, doluluk oranı (duty cycle) verisi olarak kullanılacak olmasıdır. Doluluk oranının 0,1'in altında veya 0,7'nin üzerinde bir değer alması anahtarlama elemanını ve dolayısı ile anahtarlama işlemini engelleyeceğinden bu değerlerin dışına çıkılmayacak şekilde bir aralık belirlenmiştir.



Şekil 5.16. Enerji Üretimi Birimi Bulanık Mantık Denetleyici Çıkış Üyelik Fonksiyonları

Eşitlik 5.5'te verilen ağırlık merkezi durulama eşitliği uygulanarak, durulama işlemi gerçekleştirilmiştir (Zimmermann, 2001: 234). 0,1 – 0,7 aralığında belirlenen 204 elemanlı çıkış fonksiyonu x eksen değeri ve daha önce elde edilen yine 204 elemanlı çıkış fonksiyonu y eksen vektör elemanları birbirleri ile çarpılıp toplanmış, bu toplam değeri de çıkış fonksiyonu y eksen matrisinin elemanlarının toplamına bölünmüştür. Elde edilen değer, çıkışın durulanmış değeri olarak anahtarlama elemanının anahtarlama sinyallerini üretmek üzere mikrodenetleyicinin PWM modülüne gönderilmiştir.

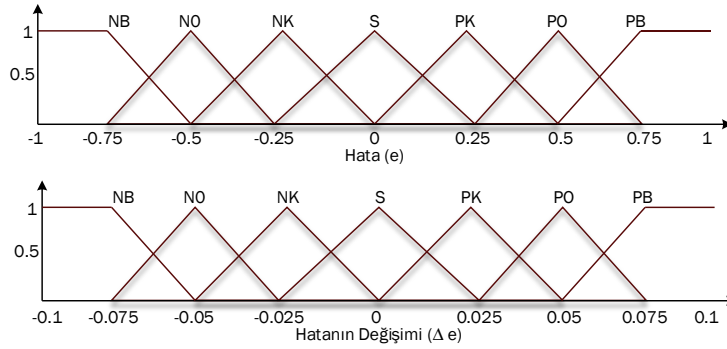
$$Durulaştırılmış\ Çıkış = \frac{\sum \mu_{\zeta}(i).i}{\sum \mu_{\zeta}(i)} \quad (5.5)$$

PV ve DC baranın akım, gerilim ve güç değerleri ile hata ve hatanın değişimi değerleri bir sonraki çevrimde / iterasyonda kullanılmak üzere önceki değerler olarak kaydedilmiştir. Ardından algoritma bir sonraki çevrim ile başa dönmüştür. Böylelikle algoritmanın her çevriminde, yeni gerilim, akım ve güç değerlerine göre doluluk oranı yeniden hesaplanmıştır.

Enerji Depolama ve Destek Birimi Denetimi

Batarya ve DC bara üzerindeki gerilim ve akım değerleri sensörler ile ölçülmüş ve mikrodenetleyici ADC modülü ile sayısal verilere dönüştürülmüştür. Bataryanın katalog değerlerinde verilen maksimum şarj gerilimi veya akımı, maksimum deşarj akımı gibi değerlerden biri veya birkaçı referans değerler olarak belirlenmiştir. Bu referans değerleri, bataryanın şarj veya deşarj durumunda olma veya şarj durumunda ise üç aşamalı şarj yöntemine uygun olan o andaki durumuna göre değişiklik göstermektedir ve buna göre tercih edilmiştir. Batarya terminalleri arasındaki ve DC baradaki güç hesaplanmıştır. Tasarlanan iki giriş ve bir çıkışa sahip bulanık mantık denetleyicinin giriş değerleri hata ve hatanın değişimi olarak belirlenmiştir. Burada hata, batarya gerilimi veya akımı ile referans gerilim veya akımı arasındaki fark olarak hesaplanırken hatanın değişimi, mevcut hata değeri ile önceki hata değeri arasındaki fark olarak belirlenmiştir. Daha sonra bu girişler, bulanıklaştırma adımıyla, belirlenen üçgen tip üyelik fonksiyonları ile Mamdani çıkarım sistemi kullanılarak, bulanıklaştırılmıştır (Haj-Ali ve Ying, 2002: 19). Her bir giriş için belirlenen yedi adet üçgen tipi üyelik fonksiyonu Şekil 5.17'de görüldüğü üzere oluşturulmuş ve bu fonksiyonlar C dilinde

bir matris içerisinde tanımlanmıştır. Hata için üyelik fonksiyonu -1 ile 1 aralığında seçilirken, hatanın değişimi için -0.1 ile 0.1 olacak şekilde daha küçük bir aralık seçilmiştir. Kural tabanı adımında, hangi kuralın bir önceki adımda elde edilen bulanık değerlere karşılık geldiği hesaplanmıştır. Kullanılan kural tabanı Şekil 5.18'de görüldüğü üzere belirlenmiştir. Böylece aktif kurallar ve bu kuralların aktiflik seviyeleri belirlenmiştir.

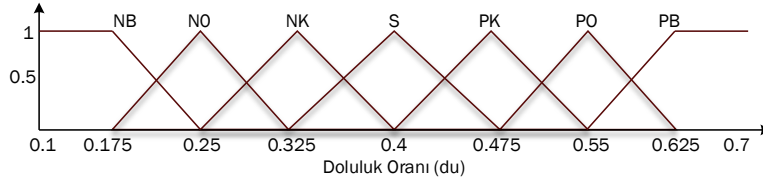


Şekil 5.17. Enerji Depolama ve Destek Birimi Bulanık Mantık Denetleyici Hata ve Hatanın Değişimi İçin Oluşturulan Üyelik Fonksiyonları

E	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
NB	0	7	14	21	28	35	42
NO	1	8	15	22	29	36	43
NK	2	9	16	23	30	37	44
S	3	10	17	24	31	38	45
PK	4	11	18	25	32	39	46
PO	5	12	19	26	33	40	47
PB	6	13	20	27	34	41	48

Şekil 5.18. Enerji Depolama ve Destek Birimi Bulanık Mantık Denetleyici Kural Tabanı

Durulaştırma adımında ise Eşitlik 5.5'te verilen, ağırlık merkezi yöntemi kullanılarak durulaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.19'dan görüldüğü üzere, bulanık mantık denetleyicinin çıkışı için yedi adet üçgen tip üyelik fonksiyonu, değer aralıkları 0,1 ile 0,7 arasında olacak şekilde belirlenmiştir. Bu adımın çıkışında elde edilecek doluluk oranı 0,1'in altında veya 0,7'nin üzerinde bir değer aldığı anda, anahtarlama işlemini olumsuz etkileyeceğinden bu değerlerin aşılması için böyle bir aralık tercih edilmiştir. Elde edilen durulaştırılmış doluluk oranı değeri, DC-DC düşürücü – yükseltici dönüştürücünün anahtarlama sinyallerini üretmek için mikrodenetleyicinin PWM modülüne gönderilmiştir.

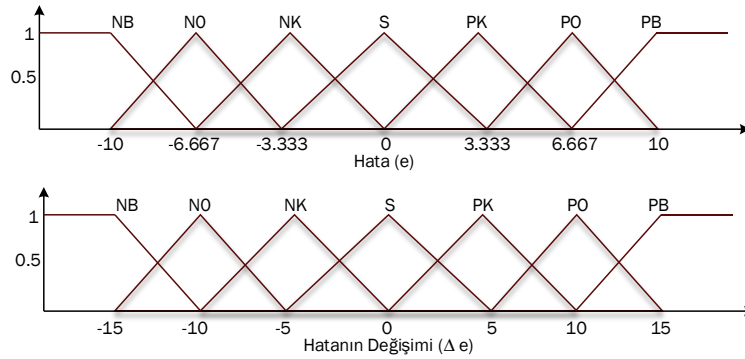


Şekil 5.19. Enerji Depolama ve Destek Birimi Bulanık Mantık Denetleyici Çıkış Üyelik Fonksiyonları

Batarya ve DC baranın akım, gerilim ve güç değerleri ile hata ve hatanın değişimi değerleri bir sonraki çevrimde kullanılmak üzere önceki değerler olarak kaydedilmiştir. Ardından algoritma bir sonraki çevrim ile başa dönmüştür. Böylelikle algoritmanın her çevriminde, yeni gerilim, akım ve güç değerlerine göre doluluk oranı yeniden hesaplanmıştır.

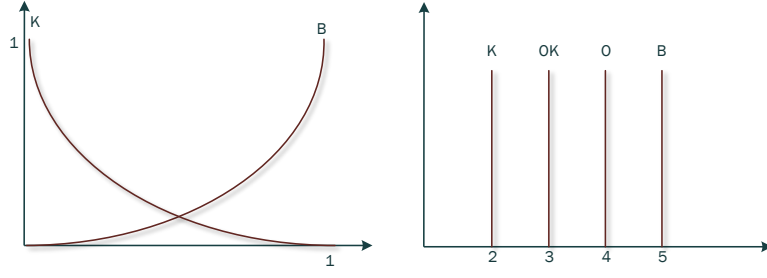
5.4.2 Bulanık Mantık PID Denetleyici

Tez çalışmasında geliştirilen akıllı enerji yönetim algoritmasında kullanılan bulanık mantık PID denetleyicide, anahtarlama sinyallerini üretmek için bir PID denetleyici kullanılmıştır. Bu PID denetleyicinin istenilen şekilde denetleme yapabilmesi için uygun K_p , K_i ve K_d katsayılarını belirleme görevi ise bir bulanık mantık denetleyici tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu bulanık mantık denetleyicide iki giriş üç çıkış bulunmaktadır. Hata ve hatanın değişimi olarak değerlendirilmekte olan bu girişler, aynı zamanda PID denetleyicinin de girişleri olarak kullanılmıştır. Şekil 5.20'de bu iki girişi bulanıklaştırmak için kullanılan yedi adet üçgen tip üyelik fonksiyonu verilmiştir.



Şekil 5.20. Hata ve Hatanın Değişimi İçin Belirlenen Üyelik Fonksiyonları

Oransal birimin katsayısı olan K_p , türevsel birimin katsayısı olan K_d ve α bulanık mantık denetleyicinin çıkışları olarak belirlenmiştir. Burada α , integral birimi katsayısı olan K_i 'yi, K_p ve K_d değerleri ile birlikte hesaplamak üzere kullanılan bir katsayıdır. Şekil 5.21'de bu üç çıkışın durulaştırılması için kullanılan çıkış üyelik fonksiyonları verilmiştir.



Şekil 5.21. a) K_p ve K_d Çıkışları İçin Kullanılan Üyelik Fonksiyonu, **b)** α Çıkışı İçin Kullanılan Üyelik Fonksiyonu

Şekil 5.21 a)'da görüldüğü üzere K_p ve K_d üyelik fonksiyonları 0 ile 1 aralığına indirgenmiştir. Bu indirgeme işlemi ise sırası ile Eşitlik 5.6 ve 5.7 kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$K'_p = (K_p - K_{pmin}) / (K_{pmax} - K_{pmin}) \quad (5.6)$$

$$K'_d = (K_d - K_{dmin}) / (K_{dmax} - K_{dmin}) \quad (5.7)$$

Burada K_{pmin} , K_{pmax} , K_{dmin} ve K_{dmax} değerleri elde edilirken sırası ile Eşitlik 5.8 – 5.11 eşitlikleri kullanılmıştır (Z. Y. Zhao vd., 1992: 699).

$$K_{pmin} = 0,32K_u \quad (5.8)$$

$$K_{pmax} = 0,6K_u \quad (5.9)$$

$$K_{dmin} = 0,08K_u T_u \quad (5.10)$$

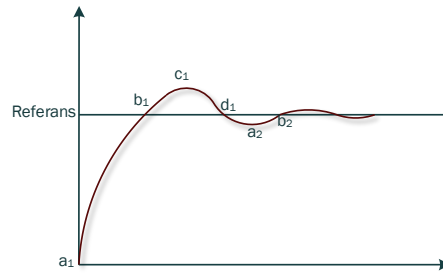
$$K_{dmax} = 0,15K_u T_u \quad (5.11)$$

Burada K_u ve T_u sırası ile P-kontrolü altında, kararlılık sınırındaki salınımın genlik ve periyodu olarak alınmıştır (Ziegler ve Nichols, 1993: 220). İntegral zaman sabiti olan T_i , türev zaman sabit olan T_d 'nin α katı olarak kabul edildiği takdirde (Z. Y. Zhao vd., 1992: 699), integral katsayısı olan K_i Eşitlik 5.12'deki gibi hesaplanabilmektedir.

$$K_i = K_p / T_i = K_p / \alpha T_d = K_p^2 / \alpha K_d \quad (5.12)$$

Şekil 5.22'de örnek bir adım cevabı gösterilmektedir. Burada a_1 durumunda çok hızlı yükselme zamanı sağlayacak olan büyük bir kontrol sinyaline ihtiyaç duyulmaktadır. Bu büyük kontrol sinyalini elde etmek için ise oransal ve integral kazanç büyük, türevsel kazanç ise küçük

olmalıdır. Bu durumda da oransal kazanç K_p “Büyük – B” bulanık kümesi ile ifade edilirken türevsel kazanç K_d ise “Küçük – K” bulanık kümesi ile ifade edilmektedir.



Şekil 5.22. Örnek Adım Cevabı

Bir PID denetleyicide integral zaman sabiti olan T_i 'nin küçük seçilmesi integral etkisinin güçlü olmasını sağlamaktadır. İntegral etkisinin güçlü yada zayıf olması literatürde kendisine oldukça yer etmiş olan Ziegler-Nichols PID kural tablosu ile karşılaştırılarak belirlenmektedir (Ziegler ve Nichols, 1993: 221). Bu tabloya göre integral zaman sabiti olan T_i , türev zaman sabit olan T_d 'nin 4 katı olacak şekilde ayarlanması gerekmektedir. İntegral zaman sabiti olan T_i , türev zaman sabit olan T_d 'nin α katı olarak kabul edildiğinden α , 4 olarak seçilmiştir. Daha güçlü bir integral etkisi için 4'ten daha küçük bir α değeri seçilirken integral etkisinin zayıflatılması için ise daha büyük bir α değeri tercih edilmelidir (Hang vd., 1991: 112). Güçlü integral etkisi ihtiyacından dolayı, a_1 durumu için Şekil 5.21 b'de görüldüğü üzere α , 2 olacak şekilde Küçük – K bulanık kümesi ile ifade edilmiştir. Bu durumda a_1 durumu için kural aşağıdaki şekilde yazılabilir;

Eğer $e(k) \rightarrow PB$ ve $\Delta e(k) \rightarrow S$ ise $K_p \rightarrow B$, $K_d \rightarrow K$ ve $\alpha \rightarrow K$

Şekil 5.22'de b_1 durumunda ise çok fazla aşım olmasını engelleyecek şekilde küçük bir kontrol sinyali ihtiyaç duyulmaktadır. Bu küçük kontrol sinyalini elde etmek için ise oransal ve integral kazanç küçük, türevsel kazanç ise büyük olmalıdır. Bu durumda da oransal kazanç K_p “Küçük – K” bulanık kümesi ile ifade edilirken, türevsel kazanç K_d ise “Büyük – B” bulanık kümesi ile ifade edilmektedir. α ise “Büyük – B” bulanık kümesi ile ifade edilmektedir. Bu durumda b_1 için kural aşağıdaki şekilde yazılabilir;

Eğer $e(k) \rightarrow S$ ve $\Delta e(k) \rightarrow NB$ ise $K_p \rightarrow S$, $K_d \rightarrow B$ ve $\alpha \rightarrow B$

Hata ve hatanın değişimi olarak belirlenen iki girişin her biri için yedişer adet üyelik fonksiyonu belirlenen bir bulanık mantık sistemi ($7 \times 7 = 49$) en fazla 49 adet kural içerebilmektedir. Benzer şekilde diğer kurallar da belirlenerek 49 adet kuralın tamamı için, tüm kurallar kendisine bir çıkış karşılığı bulacak şekilde, kural tablosu hazırlanmıştır. Bu doğrultuda

K_p , K_d ve α çıkışlarının her biri için benzer şekilde oluşturulan kural tabanları sırası ile Şekil 5.23 – 5.25'te gösterilmiştir.

dE \ E	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
NB	0 PB	1 PB	2 PB	3 PB	4 PB	5 PB	6 PB
NO	7 NB	8 PB	9 PB	10 PB	11 PB	12 PB	13 NB
NK	14 NB	15 NB	16 PB	17 PB	18 PB	19 NB	20 NB
S	21 NB	22 NB	23 NB	24 PB	25 NB	26 NB	27 NB
PK	28 NB	29 NB	30 PB	31 PB	32 PB	33 NB	34 NB
PO	35 NB	36 PB	37 PB	38 PB	39 PB	40 PB	41 NB
PB	42 PB	43 PB	44 PB	45 PB	46 PB	47 PB	48 PB

Şekil 5.23. Oransal Kazanç, K_p , İçin Oluşturulan Kural Tablosu

dE \ E	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
NB	0 NB	1 NB	2 NB	3 NB	4 NB	5 NB	6 NB
NO	7 PB	8 PB	9 NB	10 NB	11 NB	12 PB	13 PB
NK	14 PB	15 PB	16 PB	17 NB	18 PB	19 PB	20 PB
S	21 PB	22 PB	23 PB	24 PB	25 PB	26 PB	27 PB
PK	28 PB	29 PB	30 PB	31 NB	32 PB	33 PB	34 PB
PO	35 PB	36 PB	37 NB	38 NB	39 NB	40 PB	41 PB
PB	42 NB	43 NB	44 NB	45 NB	46 NB	47 NB	48 NB

Şekil 5.24. Türevsel Kazanç, K_d , İçin Oluşturulan Kural Tablosu

dE \ E	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
NB	0 K	1 K	2 K	3 K	4 K	5 K	6 K
NO	7 OK	8 OK	9 K	10 K	11 K	12 OK	13 OK
NK	14 O	15 OK	16 OK	17 K	18 OK	19 OK	20 O
S	21 B	22 O	23 OK	24 OK	25 OK	26 O	27 B
PK	28 O	29 OK	30 OK	31 K	32 OK	33 OK	34 O
PO	35 OK	36 OK	37 K	38 K	39 K	40 OK	41 OK
PB	42 K	43 K	44 K	45 K	46 K	47 K	48 K

Şekil 5.25. α İçin Oluşturulan Kural Tablosu

Elde edilen çıkış değerlerinin durulama işlemi tamamlandıktan sonra daha önce 0 ile 1 aralığına indirgenen K_p ve K_d değerleri Eşitlik 5.13 ve 5.14 kullanılarak gerçek değerlerine dönüştürülmüştür. Ardından K_p , K_d ve α değerleri, Eşitlik 5.12’de yerine konularak integral kazanç K_i için de bir değer elde edilmekte ve bu değerler PID denetleyiciye gönderilerek sistemin denetimi sağlanmak üzere anahtarlama sinyalleri üretilmektedir.

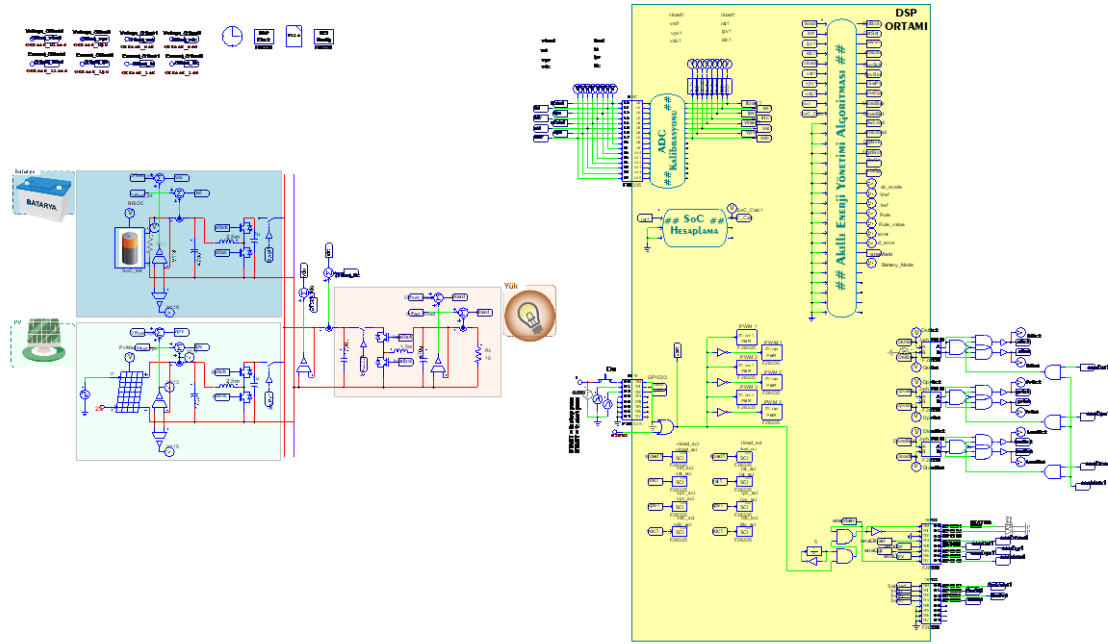
$$K_p = (K_{pmax} - K_{pmin})K'_p + K_{pmin} \quad (5.13)$$

$$K_d = (K_{dmax} - K_{dmin})K'_d + K_{dmin} \quad (5.14)$$

5.5. Geliştirilen YEK Tabanlı Enerji Sistemi Devre Kartlarının Tasarımı

Tez kapsamında gerçekleştirilen YEK tabanlı enerji yönetim sistemi için tasarlanan devre şeması Şekil 5.26’da verilmiştir. Şemada sol üst kısımda mavi blok içerisinde, enerji depolama ve destek birimi ve bu birimin elemanları olarak batarya, çift yönlü düşürücü – yükseltici dönüştürücü ve batarya akım, gerilim ölçüm ve filtreleme elemanları gösterilmektedir. Sol alt kısımda yeşil blok içerisinde ise enerji üretim birimi ve bu birimin elemanları olarak PV panel, yükseltici dönüştürücü ve PV panel akım, gerilim ölçüm ve filtreleme elemanları gösterilmektedir. Bu birimlerin sağında, kalın olarak mavi ve kırmızı hat ile temsil edilen ortak DC bara ve DC bara akım, gerilim ölçüm ve filtreleme elemanları gösterilmektedir. DC baranın sağında turuncu blok içerisinde yük birimi ve bu birimin elemanları olarak yük ve yük üzerindeki akım, gerilim ölçüm ve filtreleme elemanları gösterilmektedir.

Şemanın sağ kısmında sarı blok içerisinde bulunan kısımlar ise mikrodenetleyici birimlerini temsil etmektedir. Bu birimler, sırası ile sol üstte mikrodenetleyicinin ADC bloğu ve onun yanında ADC kalibrasyon işlemlerinin yapıldığı algoritmanın bulunduğu “Simplified C Block” bloğu, bunların altında SoC hesaplama algoritmasının bulunduğu “Simplified C Block” bloğu, sol altta sistemin başlama ve bitiş komutlarını verilebilmesi için kullanılan mikrodenetleyici giriş ve çıkış birimlerini içeren kısım ve seri iletişim protokolü ile mikrodenetleyici iç sinyallerini gözlemlemek üzere kullanılan seri iletişim arayüzü (Serial Communication Interface – SCI) bloğunu içeren kısım, sağ üstte doluluk oranı verisini üreterek sistemi denetlemek üzere geliştirilmiş akıllı enerji yönetim algoritmasının gömülü olarak yazıldığı “Simplified C Block” bloğu ve onun altında ise anahtarlama sinyallerini üreten darbe genlik modülasyonu (Pulse Width Modulation – PWM) bloğudur.

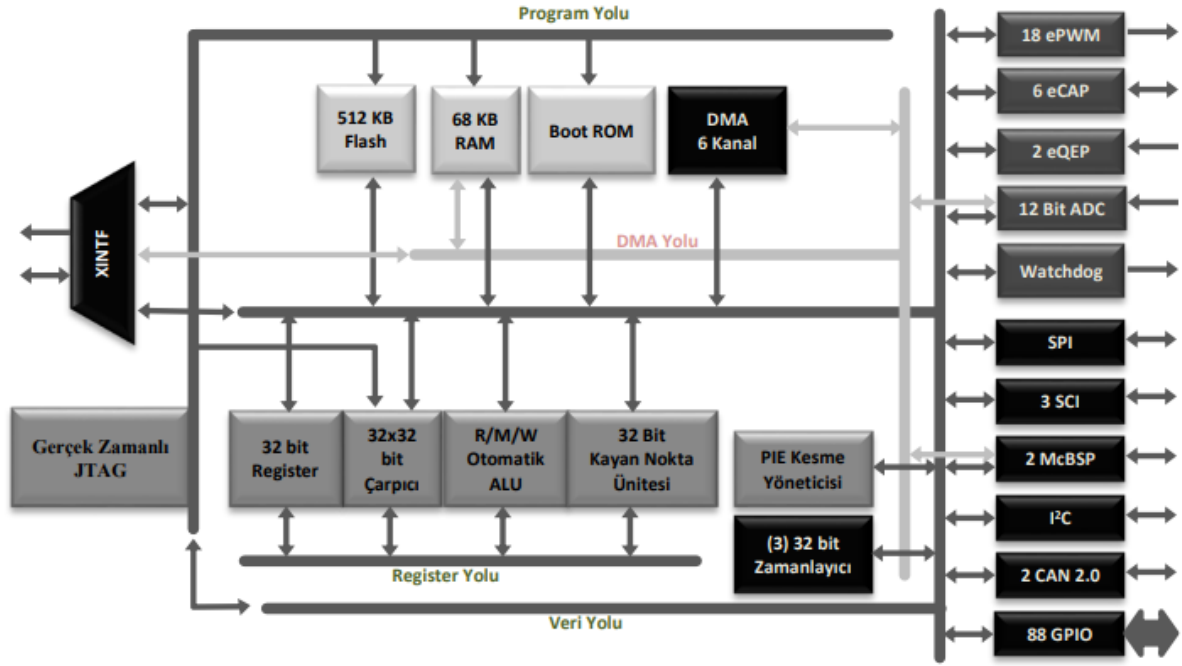


Şekil 5.26. YEK Tabanlı Enerji Yönetimi Sistemi İçin Tasarlanan Devre Şeması

Bu çalışmada kullanılan TMS320F28335 DSP, sabit noktalı işlem yapabilen, 32-bit, 150Mhz, C/C++ programlama desteğine sahip, çıkış dalgalanmalarında belirgin bir azalma için gerçek zamanlı kontrol yapabilen bir dijital sinyal işlemcidir. Ayrıca bu DSP; 18 adede kadar programlanabilir PWM, 12-bit 16 kanal ADC, 88 adede kadar ayrı ayrı programlanabilir, giriş filtrelemeli sayısal giriş-çıkış portu, 18K kelime RAM ve 128K kelime Flash EEROM hafıza, 6.67ns çözünürlüklü ölü zaman ayarlayabilme gibi özelliklere sahiptir(*TMS320F2833x , TMS320F2823x Real-Time Microcontrollers Datasheet, 2022: 4*). TMS320F28335 DSP blok diyagramı Şekil 5.27’de gösterilmektedir.

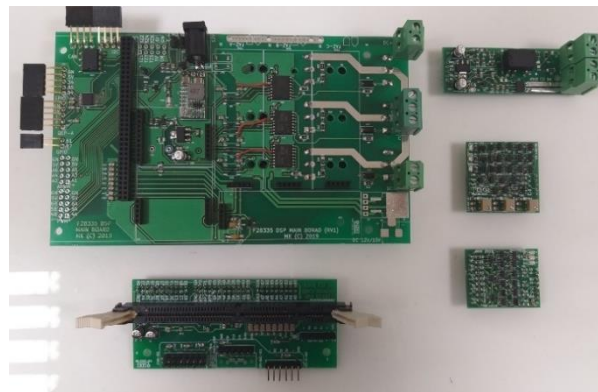
Nispeten düşük maliyetli olması, sabit (fixed point) veya kayan (floating point) noktalı olarak çalışabilmesi, PWM, ADC, CAN, SPI, I²C benzeri uygulama geliştiricilere kolaylık sağlayan birçok modülünün bulunması gibi avantajları, TMS320F28335 mikrodenetleyicisinin bu çalışmada tercih edilmesinin nedenleri arasında sayılabilir.

Ayrıca, MATLAB ve PSIM benzeri programlar aracılığıyla gömülü olarak kodlanabilme kolaylığı sağlaması, özellikle gerçek zamanlı dijital geri bildirim ve sistem kontrolü içeren uygulamalarda bu mikrodenetleyiciyi ön plana çıkarmaktadır.



Şekil 5.27. TMS320F2833x Blok Diyagramı

Tez kapsamında geliştirilen YEK tabanlı enerji yönetim sistemini gerçekleştirmek üzere elektronik devre topolojileri belirlenmiş, belirlenen bu devrelerin baskı devre kart tasarımları yapılmış ve kart basımı ve montaj işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sistemin kompakt bir yapıya sahip olabilmesi amacı ile farklı işlevleri yerine getiren devrelerin baskı devre kartları farklı modüller olarak tasarlanmıştır. Ana kart, akım ve gerilim ölçüm kartları, aşırı akım ve gerilim koruma kartı, PWM tampon kartı, DSP kontrol kartı ve bastırma ve filtre kartı olmak üzere modüler olarak tasarlanan kartlar Şekil 5.28’de gösterilmektedir.



Şekil 5.28. Sistem İçin Tasarlanan Modüler Devre Kartları (Ana Kart – Sol Üstte, Akım ve Gerilim Ölçme Kartı – Sağ Üstte, Aşırı Akım ve Gerilim Koruma Kartı – Sağ Ortada, PWM Tampon Kartı – Sağ Altta ve DSP Kontrol Kartı – Sol Altta)

Ana Kart:

Şekil 5.29’da görülen ana kart, sistemin daha az yer kaplamasını sağlayabilmek adına modüler olarak tasarlanan yapının temelini oluşturmaktadır. Bu kart, anahtarlama kısmı (sağ kısım) ve mikrodenetleyici kısmı (sol kısım) olmak üzere iki temel kısımdan meydana gelmektedir. Diğer tüm modüller, üzerindeki yuvalara yerleştirilecek şekilde geliştirilen ana kart, tüm sistemin iletişim, güç ve sinyal hatlarının yanı sıra, sistemin çalışması için gerekli olan güç katı ve anahtarlama için gerekli olan DC-DC dönüştürücü katını da bünyesinde barındırmaktadır. DC-DC dönüştürücü katı, üç farklı birimi denetleyebilmek adına, üç adet çift yönlü düşürücü – yükseltici DC-DC dönüştürücü topolojisinden ve her bir dönüştürücü için sürücü entegrelerden (IR2113S) meydana gelmektedir. Güç katı ise 12V besleme gerilimini, farklı birimlerin ihtiyaçları doğrultusunda dönüştürmektedir. Çift taraflı geliştirilen ana kartın alt yüzeyinde yer alan üç farklı denetleme birimi için toplam altı anahtarlama elemanı (IRFP250N) yüksek anahtarlama frekansı ve yoğun güç akışı gibi nedenlerden dolayı meydana gelebilecek olası ısınma problemlerinin önüne geçilebilmesi için bir soğutucu plaka üzerine monte edilmiştir. Bu kartta ayrıca, mikrodenetleyici kısmının anahtarlama kısmındaki yüksek gerilim ve akımdan zarar görmesini engellemek üzere ISO7320C sayısal izolatör entegreleri ve mikrodenetleyici çalışma gerilimini (3,3V) sağlayan AMS1117-3.3 gerilim regülatörü de kullanılmıştır.

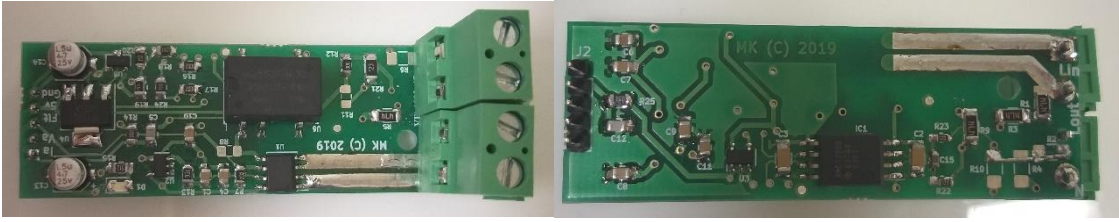


Şekil 5.29. Ana Kart (Üstten Görünüm – Solda, Altan Görünüm – Sağda)

Akım ve Gerilim Ölçüm Kartı:

Sistem birimleri ve DC baradaki akım ve gerilim değerleri birçok noktada sistem denetimi için oldukça önemli ve gerekli verilerdir. Bu verilerin okunması ve kalibrasyonunun yapılması görevini üstlenen, Şekil 5.30’da görülen, akım ve gerilim ölçme kartları geliştirilmiştir. Enerji üretim birimi olan PV paneller, enerji depolama ve destek birimi olan bataryalar, yük ve DC bara akım ve gerilimlerini anlık olarak okuyabilmek için bu modülden

dört adet kullanılmaktadır. Bu kart bir ACS711KLCTR-12AB-T 12.5A, 3,3V akım sensörü ve bir MCP1525T gerilim sensörü barındırmaktadır.



Şekil 5.30. Akım ve Gerilim Ölçüm Kartı (Üstten Görünüm – Solda, Altan Görünüm – Sağda)

Aşırı Akım ve Gerilim Koruma Kartı:

Sistemde meydana gelecek aşırı akım veya aşırı gerilim durumları, her ne kadar sistem birimleri yalıtılmış olsa dahi, büyük maliyetlerle sonuçlanabilecek sistem arızalarına neden olabilmektedir. Bu nedenle bu gibi durumları algılayıp anlamlı hata sinyalleri verme görevi üstlenen, Şekli 5.31’de görülen, aşırı akım ve gerilim koruma kartı geliştirilmiştir. Bu kart kapı (SN74LVC1G08DBVR) ve karşılaştırıcı (MCP6541T-I/OT) entegrelerden meydana gelmekte ve belirlenen referans değerlere göre aşırı akım, aşırı gerilim veya hata durumlarının herhangi biri meydana geldiğinde uyarı ledleri yanmakta ve mikrodenetleyiciye bir kesme (interrupt) sinyali gönderilmektedir.



Şekil 5.31. Aşırı Akım ve Gerilim Koruma Kartı (Üstten Görünüm – Solda, Altan Görünüm – Sağda)

PWM Tampon Kartı:

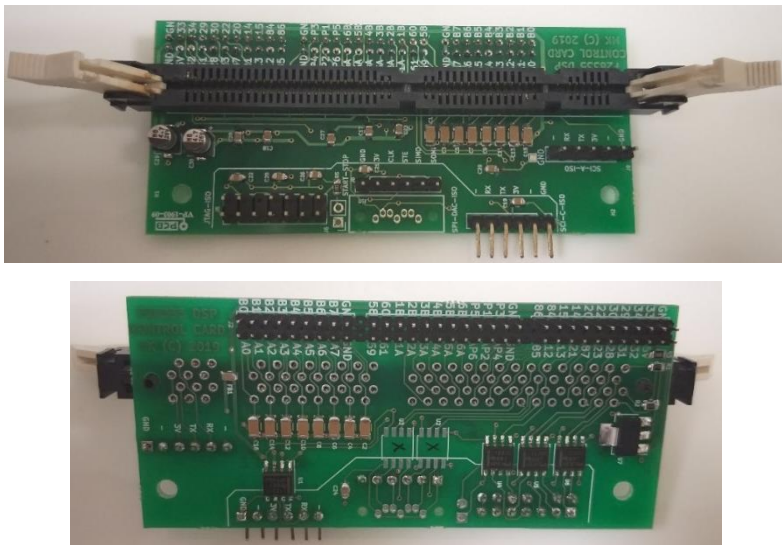
Her ne kadar kontrol algoritması ile engellenmiş dahi olsa, tasarlanan bu kart ile ölü zaman ayarlaması gerçekleştirilebilmektedir. Sistemde düşürücü ve yükseltici olarak iki şekilde çalışabilen dönüştürücülerin üst ve alt anahtarlama elemanlarının, özellikle mod değişimi esnasında, aynı anda açık olmaması gerekmektedir. Aksi takdirde, sistem kısa devre olmaktadır. Bu durumu donanımsal olarak engellemek ve birimlerin PWM bloklarının çalışma durumlarını kontrol edebilmek üzere, Şekil 5.32’de görülen, PWM tampon kartı tasarlanmıştır. Bu kart, AND kapısı (74LVC1G08) ve NAND kapısı (74LVC1G00) entegreleri barındırmaktadır.



Şekil 5.32. Darbe Genlik Modülasyonu Tampon Kartı (Üstten Görünüm – Solda, Alttan Görünüm – Sağda)

DSP Kontrol Kartı:

TMS320F28335 DSP kartını programlamak, gerekli giriş çıkış pinlerini kullanabilmek ve gerekli sinyallerin gönderilip alınması görevini üstlenmiş olan, SCI, SPI gibi farklı bağlantı portlarının kullanılmasını sağlayabilen, Şekil 5.33’te görülen, DSP kontrol kartı geliştirilmiştir.

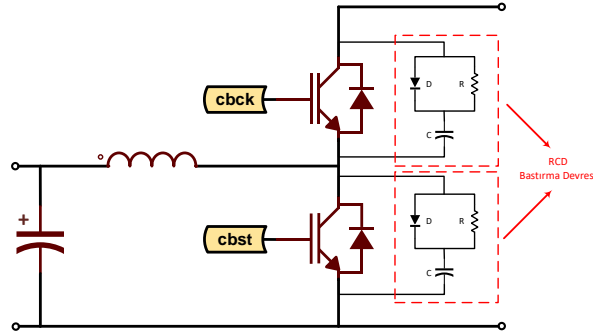


Şekil 5.33. DSP Kontrol Kartı (Üstten Görünüm – Üstte, Altan Görünüm – Alttta)

Bastırma (Snubber) Kartı:

DC-DC dönüştürücü devrelerinde kullanılan anahtarlama elemanları, iletme girme anında kısa süreli de olsa yüksek akıma, kesime girme anında ise yine kısa süreli de olsa yüksek gerilime maruz kalabilmektedir. Bu gibi durumlarda aşırı akım veya gerilim durumlarından korunmak, özellikle yüksek frekanslardaki büyük anahtarlama kayıplarını düşürmek ve geçici durum taşmalarını sönmölemek üzere bastırma devreleri kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında anahtarlama elemanı olarak kullanılan MOSFET'lerin uçlarındaki kalıcı gerilim dalgalanmaları ve hızlı gerilim yükselmelerini önlemek üzere, Şekil 5.34'te verilen Direnç – Kondansatör – Diyot (Resistor – Capacitor – Diode – RCD) bastırma devresi kullanılmıştır.



Şekil 5.34. Direnç – Kondansatör – Diyot Bastırma (RCD Snubber) Devresi

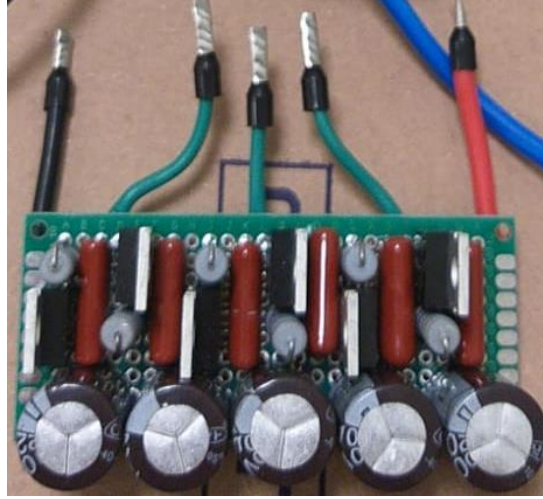
Burada, anahtarlama frekansından daha yüksek bir çalışma frekansına sahip olması ve sistem gerilim ve akım değerlerinden daha fazla çalışma akım ve gerilim değerlerine sahip olması kriterleri göz önünde bulundurularak MUR1560G 15A 600V hızlı diyotu kullanılmıştır. Ayrıca kondansatör ve direnç değerleri Eşitlik 5.15 ve 5.16 kullanılarak hesaplanmış elde edilen sonuçlara yakın piyasada bulunan kondansatör ve dirençler kullanılmıştır.

$$C = \frac{I_0 T_b}{2V'} \quad (5.15)$$

$$3\tau \leq T_{d_min} \quad (5.16)$$

Burada, I_0 kesime girmeden önce anahtarlama elamanından akan akım değeri, bir diğer değişle anahtarlama elamanından geçen maksimum akım, T_b doluluk oranı (λ) ile belirlenen boşluk süresi, V' ise anahtarlama elamanı akımı sifıra düştüğü andaki anahtarlama elemanı gerilimi, bir diğer değişle anahtarlama elamanı maksimum gerilimidir. τ , RC zaman sabiti olup

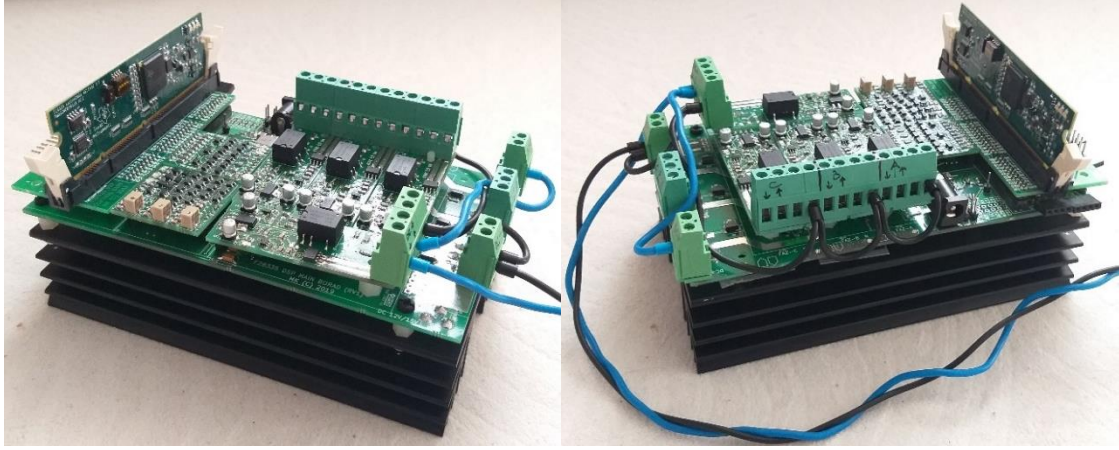
direnç ve kondansatör değerlerinin çarpımından elde edilmektedir. T_{d_min} ise doluluk oranı (λ) ile belirlenen doluluk süresinin minimum değeri olup çalışma periyodunun (T_p) minimum doluluk oranı ile çarpımından elde edilmektedir. Buna göre elde edilen kondansatör ve direnç değerleri, $220\mu\text{F}$ ve $5,6\Omega$ 'dir. Bu doğrultuda geliştirilen RCD bastırma devresi Şekil 5.35'te gösterilmektedir.



Şekil 5.35. RCD Bastırma Devresi

Şekil 5.36'da ise tüm modüllerin ana kart üzerinde birleştirilmiş son hali gösterilmektedir.

Çalışmada kullanılacak olan devrede, akım ve gerilim değerlerini ölçmek için ACS711KLCTR-12AB-T 12.5A, 3,3V akım sensörü ve MCP1525T gerilim sensörü kullanılmıştır. Bu sensörler sayısal olarak çıkış vermektedir. Fakat bu sayısal çıkışların mikrodenetleyiciye uygun ve doğru sinyallere dönüştürülebilmesi için sensörlerin kalibrasyon ve kazanç değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Benzetim çalışmaları yapılırken yazılımsal olarak gerçekleştirilmekte olan bu işlemler uygulama çalışmaları esnasında yaşanabilecek olası problemleri engellemek amacı ile donanımsal olarak gerçekleştirilmiştir. Sistemde mevcut olan üç kanalın her biri ve bir adet de DC bara için olmak üzere toplamda dört adet akım ve gerilim ölçüm kartı bulunmaktadır. Öncelikle, bu kanalların her biri için, gerilim ölçüm kısımlarına 0 V gerilim uygulanmış ve kalibrasyon değerleri belirlenmiştir. Ardından 24 V gerilim uygulanarak kazanç katsayı değerleri belirlenmiştir. Benzer işlemler her bir kanalın akım ölçüm kısımları için de gerçekleştirilmiştir. Böylelikle dört adet ölçüm katının akım ve gerilim sensörlerinin her birinin kalibrasyon ve kazanç değerleri belirlenmiştir. Belirlenen değerler Tablo 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.36. Tasarlanan sistemin donanımı (tüm modüller birleştirilmiş olarak)

Tablo 5.4. Akım ve Gerilim Sensörlerinin Kalibrasyon ve Kazanç Değerleri

		Kalibrasyon Değeri	Kazanç Değeri
Kanal 1	Akım Sensörü	- 1.6534	8.33
	Gerilim Sensörü	- 1.5520	37.3165
Kanal 2	Akım Sensörü	- 1.6436	8.33
	Gerilim Sensörü	- 1.5457	37.3221
Kanal 3	Akım Sensörü	- 1.6580	8.33
	Gerilim Sensörü	- 1.5457	37.1524
DC Bara	Akım Sensörü	- 1.6542	8.33
	Gerilim Sensörü	- 1.5545	37.8266

Bu değerler doğrultusunda her bir ölçüm kartında kullanılan sensörlerin kalibrasyon ve kazanç ayarlamaları yapılarak elde edilen ölçüm sonuçlarının doğruluğu teyit edilmiştir.

6. YEK TABANLI ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ BENZETİM ÇALIŞMALARI VE SONUÇLAR

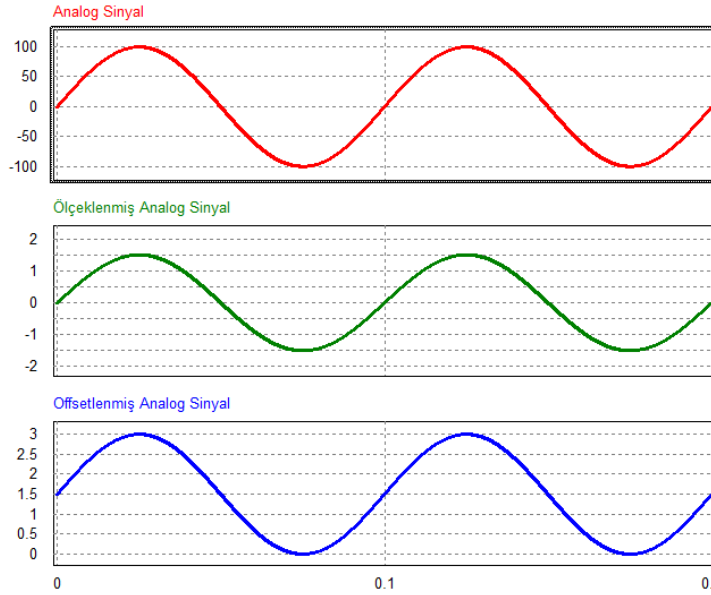
Bu tez çalışması, şebekeden bağımsız bir yenilenebilir enerji sistemi oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu sistemin üç ana birimi vardır: yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisini kullanarak enerji üreten ve PV panellerden meydana gelen enerji üretim birimi, talep edilenden daha fazla enerji üretimi söz konusu olduğunda, üretilen bu fazla enerjiyi üretimin yetersiz olduğu durumlarda kullanmak üzere depolayan ve bataryalardan meydana gelen enerji depolama ve destek birimi ve elde edilen enerjiyi kullanarak harcayacak olan yük birimi. Gerek maliyet gerekse zaman ve iş gücü kaybını önlemek amacıyla öncelikle benzetim çalışmaları yapılarak sistemin en iyi hale getirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle tüm bu birimlerin ayrı ayrı ve birbirleri ile etkileşim halindeki benzetim çalışmaları Power Simulation (PSIM) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen tüm benzetim çalışmalarında amaç, yapılacak deneysel çalışmalarda sistemin vereceği cevaba mümkün olan en yakın cevapların alınmasının sağlanmasıdır. Bu doğrultuda, daha verimli benzetim çalışmaları gerçekleştirmek üzere benzetim modelindeki tüm birimlerin uygulamada kullanılanlar ile mümkünse bire bir aynı olması gerekmektedir.

Sistem birimlerinde akım ve gerilim değerlerini okumak için kullanılan ölçüm kartları, ACS711KLCTR-12AB-T 12.5A, 3,3V akım sensörü ve MCP1525T gerilim sensörleridir. Bu sensörler, DSP'nin giriş/çıkış birimlerine uygun olarak 0 – 3,3V aralığında sayısal çıkış verebilmektedir. Fakat benzetim modelinde kullanılan akım ve gerilim sensör benzetim bloklarından elde edilen değerler, belirtilen aralıkta olamayacağından ölçeklenmesi gerekmektedir. Bu ölçekleme işlemi, ölçülen değer DSP giriş çıkış biriminin maksimum 3,3V gerilim değeri ile çarpılıp sistemde görülebilecek maksimum gerilim ve akım değerlerinden daha büyük bir değere (örneğin maksimum sistem akımı 12A iken 15A veya maksimum gerilim 25V iken 50V) bölünmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu işlem sonucunda elde edilen değerler, sensörlerden gelen değerleri temsil etmektedir. Fakat ölçekleme işlemi tek başına yeterli olmamakta zira, gerilim ve akım değerlerinin negatif olma durumları da göz önünde bulundurularak ayrı bir kalibrasyon işlemi yapılması da gerekmektedir. Bu kalibrasyon işlemi ise negatif gelebilecek değerler için (3,3V ölçeklenen ölçüm değeri en az -1,65V olabilir) 1,65V eklenerek yapılmaktadır.

Tüm bu ölçekleme ve kalibrasyon işlemleri için bir örnek Şekil 6.1'de görülmektedir. Burada, kırmızı eğri ham olarak ölçülen sinyali, yeşil eğri ölçekleme sonrası sinyali, mavi eğri

ise kalibrasyon yapılmış sinyali temsil etmektedir. Elde edilen bu sinyal, sayısallaştırılmak üzere DSP'nin ADC bloğuna gönderilmeye hazırdır. ADC bloğu çıkışında tüm bu işlemler tersine çevrilerek (önce kalibrasyon değeri olan 1,65 çıkartılır sonra ölçekleme değeri ile çarpılır) gerçek sinyal değerine ulaşılabilir.



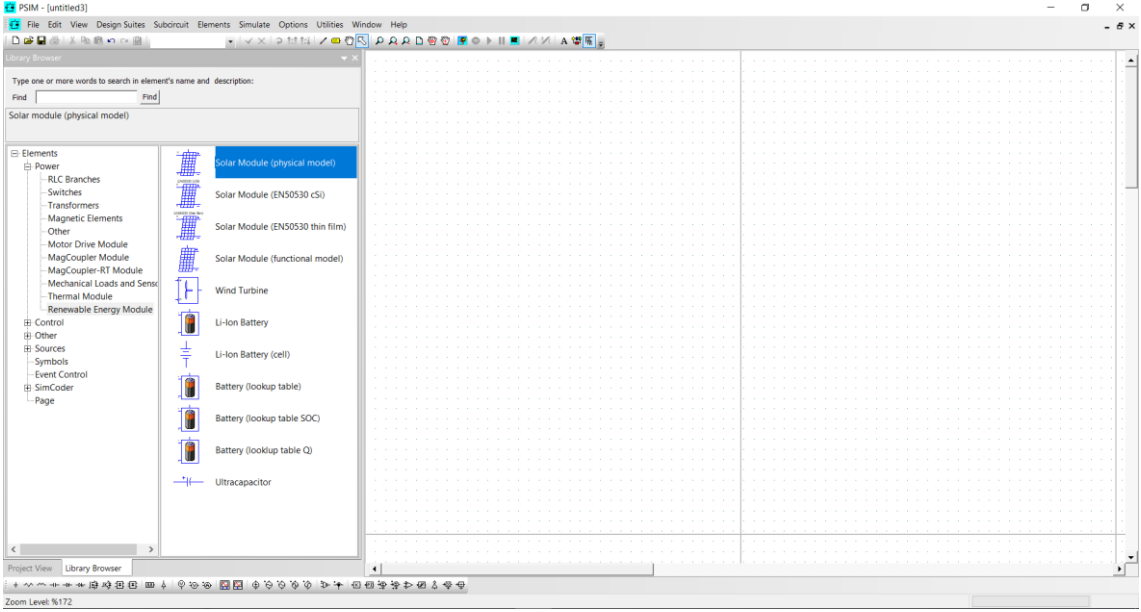
Şekil 6.1. Ölçekleme ve Kalibrasyon İşlemleri Örnek Görüntüsü

Benzetim çalışmalarında, Bölüm 5.5'te detaylı olarak anlatılan yöntemler izlenerek belirlenen kazanç ve kalibrasyon değerleri kullanılmıştır. İlerleyen bölümlerde ise bahsi geçen birimler için ayrı ayrı gerçekleştirilen benzetim çalışmaları ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

6.1. Enerji Üretim Birimi Benzetim Çalışmaları

Sistemde enerji üretim birimi olarak görev yapmakta olan PV panellerin benzetim modeli ve bu modelin parametre ayarlamaları PSIM yazılımında aşağıda verilen adımlar izlenerek gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.2'de görüldüğü üzere, ilgili yazılım açılmış ve *Kütüphaneden (Library Browser)*, *Güç (Power)* kategorisi altındaki *Yenilenebilir Enerji Modülü (Renewable Energy Module)* kategorisi açılarak *PV Modül Fiziksel Modeli (Solar Module Physical Model)* seçilmiş ve çalışma ekranına eklenmiştir.



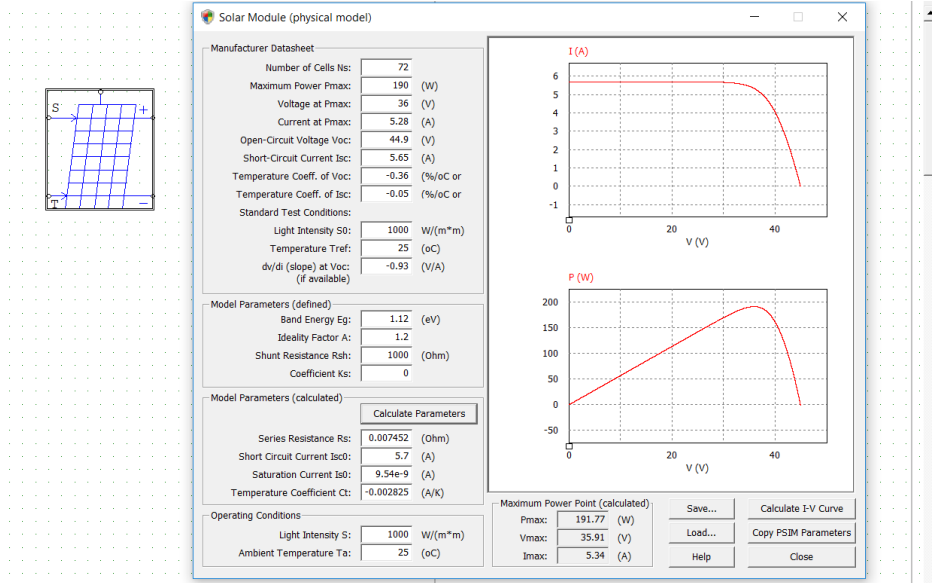
Şekil 6.2. PV Panel Modelinin PSIM Yazılımında Kütüphaneden Seçilmesi

Eklenen modüle çift tıklanarak üretici verileri ve tanımlanmış model parametreleri Şekil 6.3'te verildiği gibi girilmiştir. Girilen bu parametreler şunlardır:

- *Number of Cells Ns*: Bir PV modüldeki seri bağlı güneş hücresi sayısı
- *Standard Light Intensity S0*: Standart test koşulları altındaki ışık yoğunluğu, W/m^2 . Bu değer $1000 W/m^2$ olarak alınmaktadır.
- *Ref. Temperature Tref*: Standart test koşulları altındaki sıcaklık, $^{\circ}C$.
- *Series Resistance Rs*: Her bir güneş hücresinin seri direnç değeri, Ohm.
- *Shunt Resistance Rsh*: Her bir güneş hücresinin şönt direnç değeri, Ohm.
- *Short Circuit Current Isc0*: Modülün referans sıcaklıkta kısa devre akımı, A.
- *Saturation Current Is0*: Modeldeki diyotun doyum akımı, A.
- *Band Energy Eg*: Her bir güneş hücresinin bant enerjisi, eV.
- *Ideality Factor A*: Modeldeki diyotun ideallik faktörü Emisyon katsayısı
- *Temperature Coefficient Ct*: Sıcaklık katsayısı, A/K.
- *Coefficient Ks*: Işık yoğunluğunun güneş hücresinin sıcaklığını nasıl etkilediğini tanımlayan katsayı

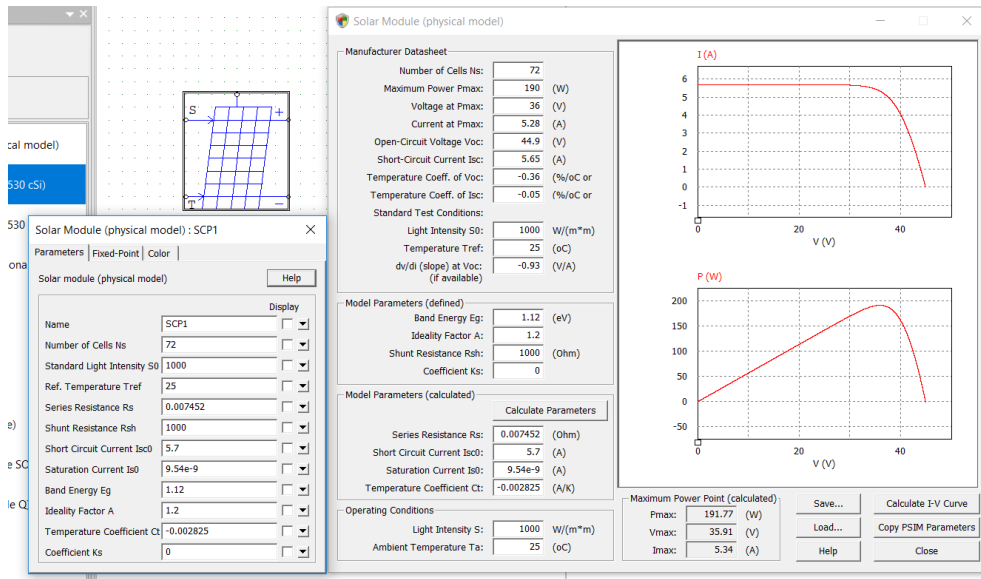
Parametreleri Hesapla (Calculate Parameters) butonuna basılarak hesaplanmış model parametreleri Şekil 6.3'te gösterildiği gibi elde edilmiştir.

Akım – Gerilim ve Güç – Gerilim değerlerini hesaplatmak ve eğrilerini elde etmek için *Calculate I – V Curve* butonu kullanılmıştır. Elde edilen I – V ve P – V eğrileri Şekil 6.3’te verilmiştir.



Şekil 6.3. PV Modül Parametre Girişi ve Hesaplamaların Gerçekleştirilmesi

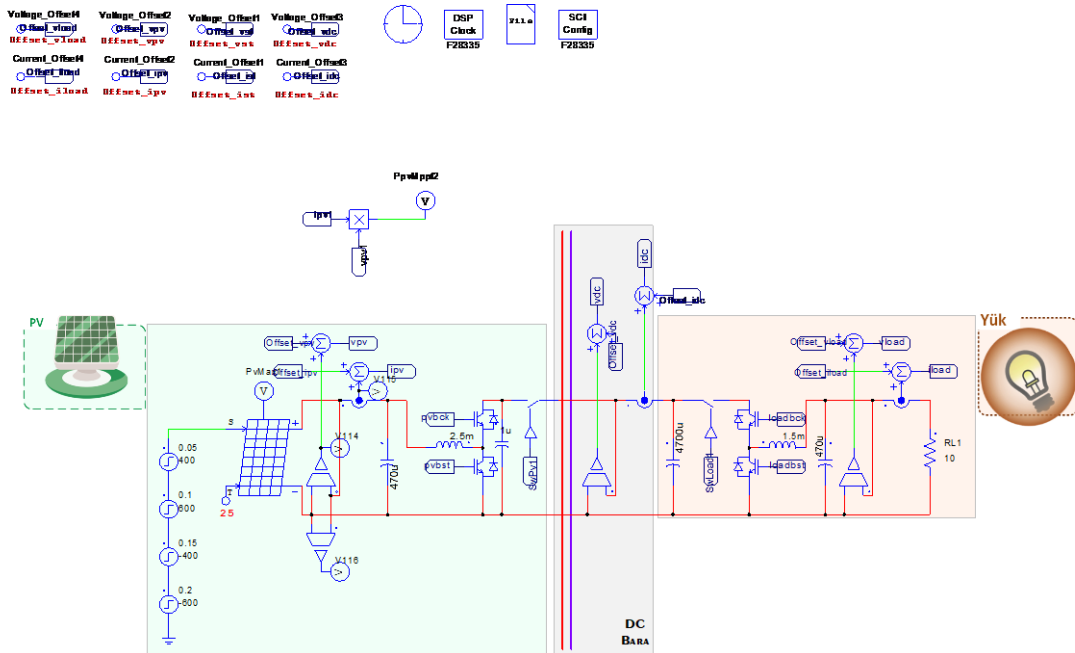
PSIM Parametrelerini Kopyala (Copy PSIM Parameters) butonu ile hesaplanan parametreler Şekil 6.4’te verildiği gibi modele aktarılmıştır. Böylelikle tez çalışmasında kullanılan PV panel sisteminin benzetim modeli, benzetim çalışmalarında kullanılmak üzere hazırlanmıştır.

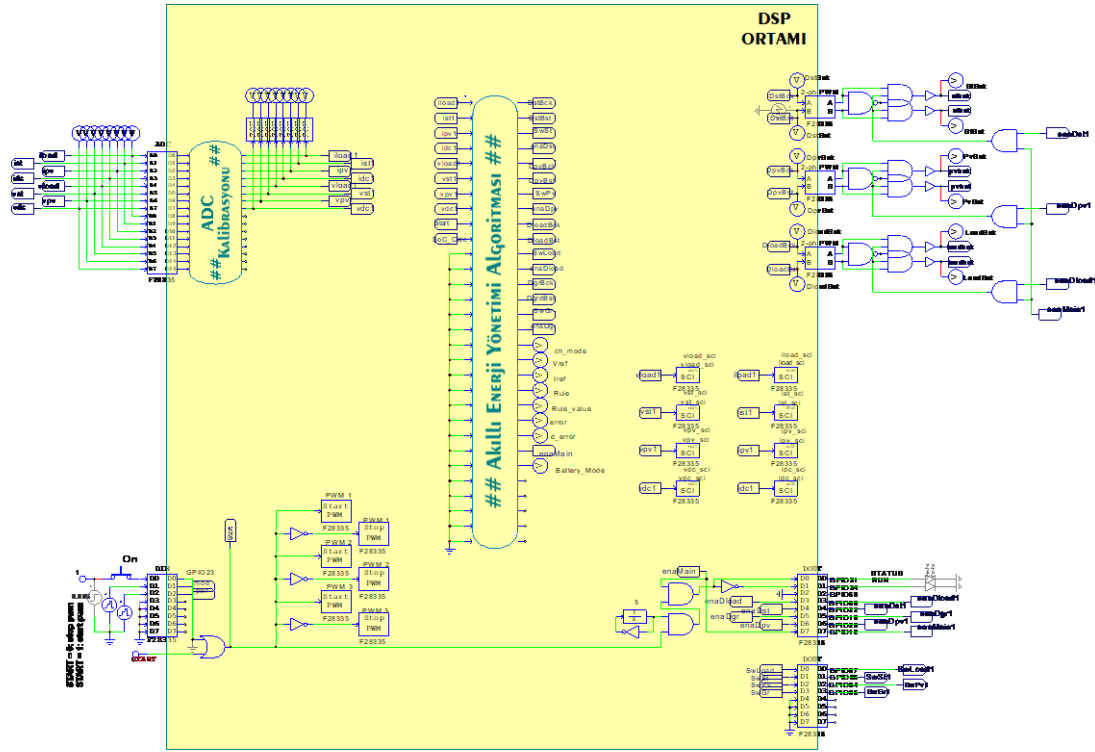


Şekil 6.4. PV Modülün Hesaplanan Parametrelerinin Benzetim Modeline Aktarılması

Böylece, benzetim ortamında gerçek PV panellerin davranışlarını benzer şekilde yansıtan bir PV panel model bloğu elde edilmiştir. Daha sonra bu blok, PV panellerden sürekli olarak maksimum güç elde etmeyi amaçlayan bir enerji sisteminin benzetim çalışmasında kullanılmıştır. Bulanık mantık ve bulanık mantık PID denetleyici algoritmaları ile ayrı ayrı gerçekleştirilecek olan bu benzetim çalışmaları için, PSIM programında Şekil 6.5'te verilen benzetim şeması oluşturulmuştur.

Bu benzetim şemasında, PV panel birimi, yük birimi, DC Bara hattı ve DSP ortamı sırasıyla yeşil, turuncu, gri ve sarı bölgelerle temsil edilmiştir. Benzetim çalışmasındaki PV paneller, *PV Modül Fiziksel Modeli (Solar Module Physical Model)* bloğu ile modellenmiş, üretici parametreleri girilerek model parametrelerinin hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. MGNT işlemi için yalnızca PV panelden DC baraya yönlü ve yine yalnızca yükseltilecek gerçekleştirilecek olan enerji akışı için tek yönlü, yükseltici tip DC-DC dönüştürücü kullanılmıştır. Burada kullanılan anahtarlama elemanları, "IGBT" bloğu ile temsil edilmiştir. Bu anahtarlama elemanlarının anahtarlama sinyalleri ise sistemde kullanılan TMS320F28335 mikro denetleyicinin PWM modülünü temsil eden "PWM" bloğu vasıtası ile oluşturulmaktadır.



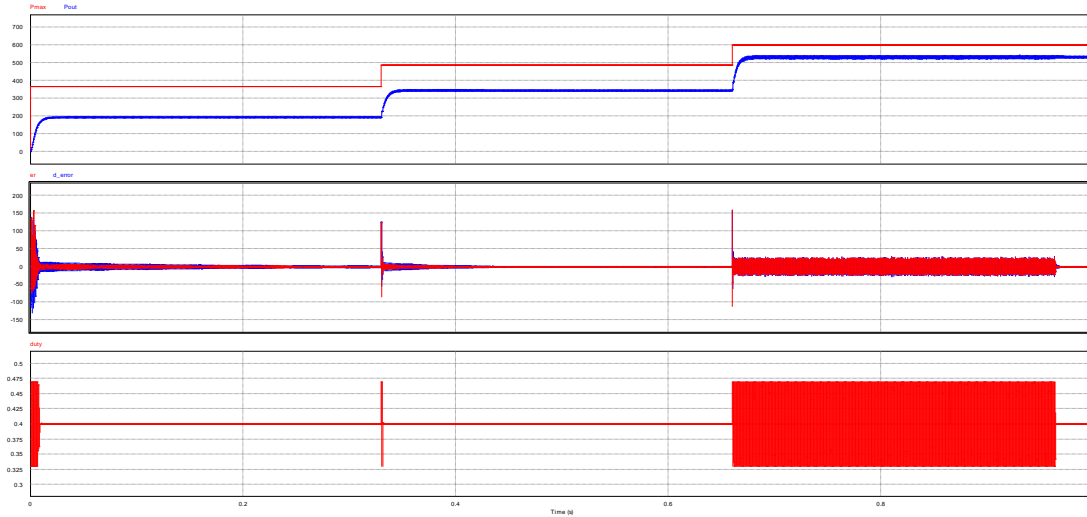


Şekil 6.5. PV Panellerin MGNT Denetimi İçin PSIM Ortamında Benzetim Şeması

Ayrıca, mikro denetleyicinin ADC modülünü temsil eden “ADC” bloğu ile PV panel ve DC bara gerilim ve akım değerleri sayısallaştırılmış ve C dilinde yazılan akıllı enerji yönetim algoritmasının bulunduğu “Simplified C Blok” bloğuna giriş olarak verilmiştir. Bu bloğun çıkışı da anahtarlama sinyallerini üretmek üzere “PWM” bloğuna bağlanmıştır. “Solar Module” bloğunun ışınım girişine, farklı zamanlarda farklı ışınım değerleri uygulanarak günlük ışınım miktarındaki artış ve azalışın benzetimi gerçekleştirilmiş böylelikle farklı ışınım değerleri için sistemin cevabı izlenebilmiştir.

6.2. Enerji Üretim Birimi Benzetim Çalışmaları Sonuçları

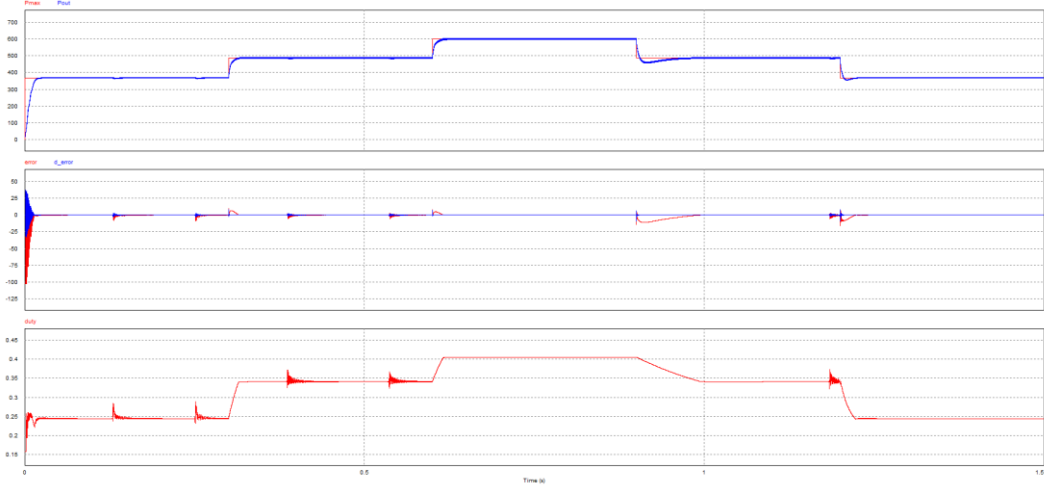
Bulanık mantık denetleyicili MGNT benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar Şekil 6.6’da verilmiştir.



Şekil 6.6. Bulanık Mantık Denetleyicili MGNT Benzetim Çalışması Sonuçları

Burada ilk grafikte kırmızı renkte, belirlenen üç farklı güneşlenme değeri için PV panellerden elde edilebilecek üç farklı maksimum güç değeri görülmektedir. Buna karşılık sistemden elde edilen maksimum güç ise mavi renkte görülmektedir. İkinci grafikte, bulanık mantık denetleyici girişleri olan kırmızı renkte hata değerleri, mavi renkte ise hatanın değişimi değerleri görülmektedir. Üçüncü grafikte ise bulanık mantık denetleyici çıkışında elde edilen doluluk oranı (duty) değerleri görülmektedir.

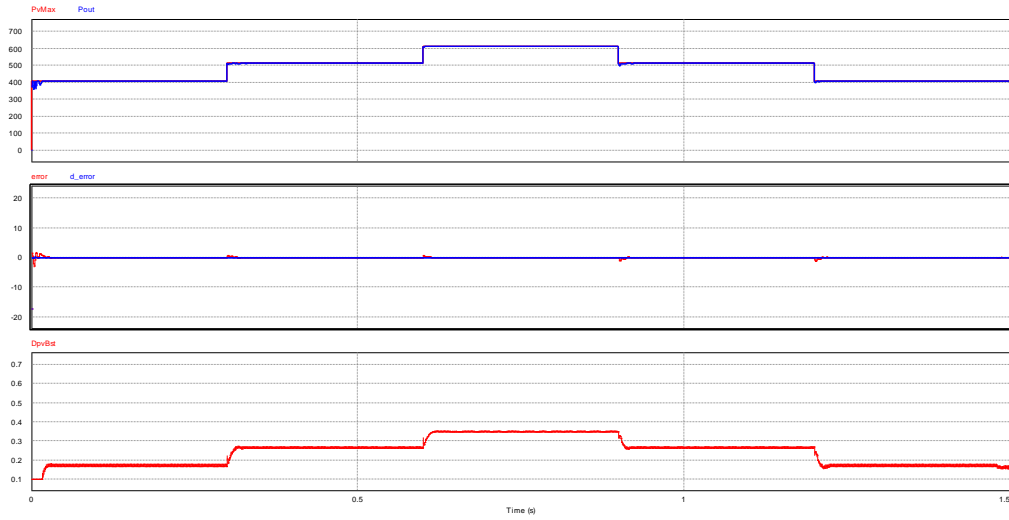
İlk grafikte maksimum gücün yakalanamadığı, ikinci grafikte denetleyicinin hata ve hatanın değişimini özellikle üçüncü periyotta sıfıra yaklaştırmada başarısız olduğu açıkça görülmektedir. Tüm bu durumlardan da anlaşılacağı üzere bulanık mantık denetleyici, kontrol işlemi yapmakta, fakat istenilen değerlerde kontrol gerçekleştirememektedir. Bu nedenle algoritmada hata ve hatanın değişimi girişleri için belirlenen aralıkların değiştirilmesi ve bu doğrultuda algoritmanın güncellenmesinin gerektiği belirlenmiştir. Farklı parametre ayarlamaları sonucunda, hatanın giriş üyelik fonksiyonu aralığı $-0,4$ ile $0,4$ aralığına, hatanın değişimi giriş üyelik fonksiyonu aralığı ise $-0,01$ ile $0,01$ aralığına güncellenerek yeni benzetim sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar ise Şekil 6.7’de, önceki sonuçlar ile aynı renklerle temsil edilecek şekilde, verilmiştir.



Şekil 6.7. Güncellenmiş Bulanık Mantık Denetleyicili MGNT Benzetim Sonuçları (Benzetim Süresi 1,5sn.)

İlk grafikte maksimum gücün yakalandığı, ikinci grafikte denetleyicinin hata ve hatanın değişimini sıfıra yaklaştırmada başarılı ($\approx 90\%$) olduğu açıkça görülmektedir. duty çıkış değerinin ise hatayı sıfıra yaklaştırmak üzere arttığı hata sıfır olduğunda ise sabit kaldığı görülmektedir. Tüm bu durumlardan da anlaşılacağı üzere bulanık mantık denetleyici kontrol görevini yerine getirmekte ve istenilen değerlerde kontrol gerçekleştirilmektedir.

Bulanık mantık PID denetleyicili MGNT benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar ise Şekil 6.8’de, önceki sonuçlar ile aynı renklerle temsil edilecek şekilde, verilmiştir.

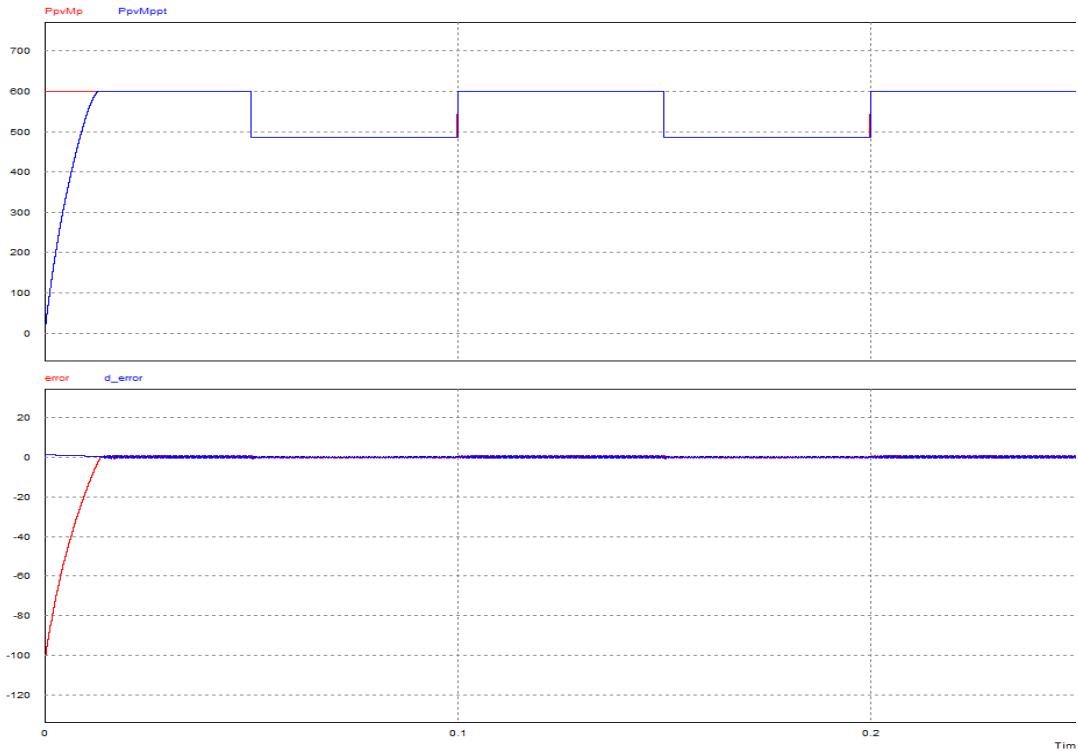


Şekil 6.8. Bulanık Mantık PID Denetleyicili MGNT Benzetim Sonuçları (Benzetim Süresi 1,5sn.)

İlk grafikte maksimum gücün yakalandığı, ikinci grafikte denetleyicinin hata ve hatanın değişimini sıfıra yaklaştırmada başarılı ($\approx 95\%$) olduğu açıkça görülmektedir. duty çıkış değerinin ise hatayı sıfıra yaklaştırmak üzere arttığı, hata sıfır olduğunda ise sabit kaldığı görülmektedir. Tüm bu durumlardan da anlaşılacağı üzere bulanık mantık PID denetleyicisi kontrol görevini yerine getirmekte ve istenilen değerlerde kontrol gerçekleştirilmektedir.

Geliştirilen bulanık mantık ve bulanık mantık PID denetleyicilerin daha kısa sürelerde daha agresif güneşlenme değişimleri karşısında verdikleri cevaplar ise Şekil 6.9 ve 6.10'da görülmektedir.

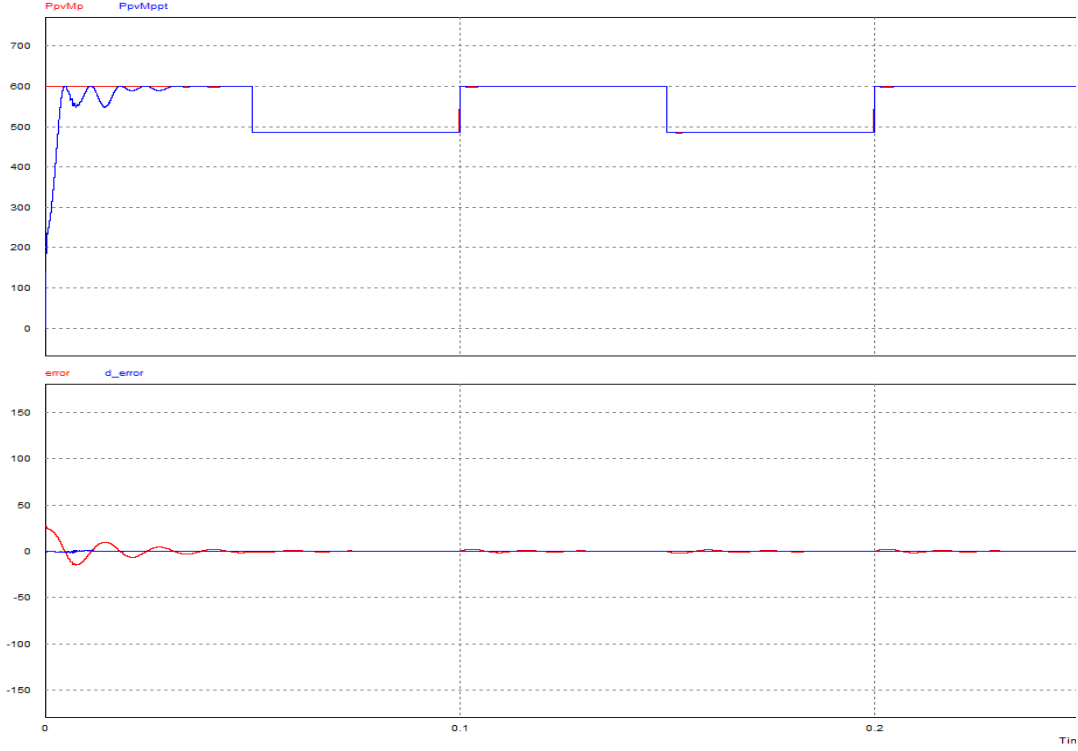
Şekil 6.9'da, üstte sürekli olarak artıp tekrar azalan bir şekilde belirlenmiş olan PV panellerin verebileceği maksimum güç grafiği kırmızı renkte görülürken, PV panellerden elde edilen güç grafiği ise mavi renkte görülmektedir. Geliştirilen bulanık mantık denetleyici sayesinde elde edilen gücün maksimum gücü takip ettiği görülmektedir. Altta ise kırmızı renkte referans gerilim ile elde edilen gerilim arasındaki fark olarak ele alınan hata grafiği, mavi renkte ise bu hata değerinin değişimi grafiği görülmektedir. Bu iki değer de sıfır civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 6.9. Bulanık Mantık Denetleyicili MGNT Benzetim Çalışması Sonuçları 0,25sn.

Şekil 6.10'da ise üstte sürekli olarak artıp tekrar azalan bir şekilde belirlenmiş olan PV panellerin verebileceği maksimum güç grafiği kırmızı renkte görülürken, PV panellerden elde

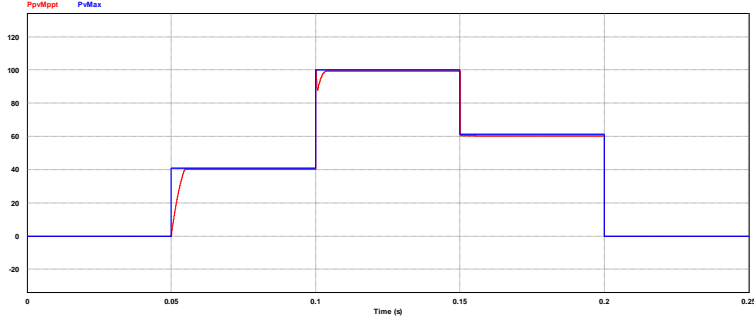
edilen güç grafiği ise mavi renkte görülmektedir. Geliştirilen bulanık mantık PID denetleyici ile elde edilen gücün maksimum gücü takip ettiği görülmektedir. Altta ise kırmızı renkte referans gerilim ile elde edilen gerilim arasındaki fark olarak ele alınan hata grafiği, mavi renkte ise bu hata değerinin değişimi grafiği görülmektedir. Bu iki değer de sıfır civarında olduğu görülmektedir.



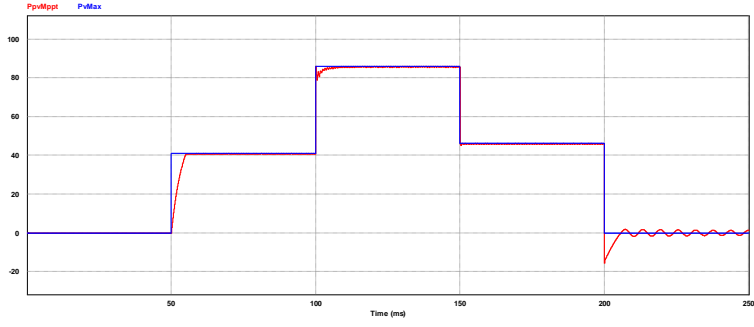
Şekil 6.10. Bulanık Mantık PID Denetleyicili MGNT Benzetim Çalışması Sonuçları 0,25sn.

Geliştirilen algoritmalar gerçek hayat uygulamalarında mikrodenetleyici üzerinde koşma süresi bakımından problemlere neden olduğundan, bulanık mantık algoritmasında başvurulan Mamdani yönteminin yerine nispeten daha az işlem karmaşıklığı ve dolayısı ile daha az döngü içeren Sugeno yöntemi kullanılacak şekilde yeniden düzenlenmiştir. Bulanık Mantık MGNT ve Bulanık Mantık PID MGNT algoritmalarının her biri için, önce Mamdani sonra Sugeno yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar Şekil 6.11 – 6.14’te görülmektedir.

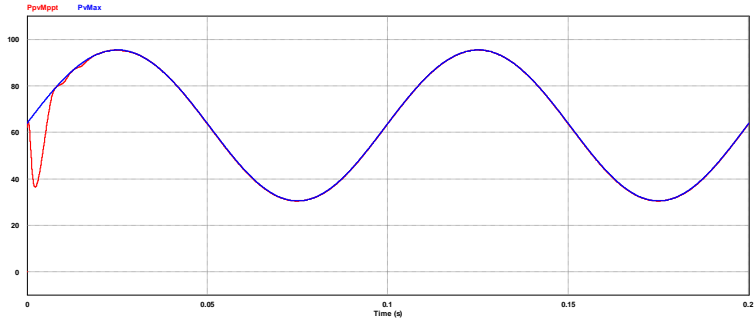
Buna göre; Mamdani ve Sugeno yöntemleri ile geliştirilen bulanık mantık denetleyici algoritmaları arasında çok küçük farklılıklar görülürken, bulanık mantık PID denetleyici algoritmaları arasında kayda değer bir farklılık görülmemiştir. Bu nedenle deneysel çalışmalarda bulanık mantık için Sugeno yöntemi tercih edilmiştir.



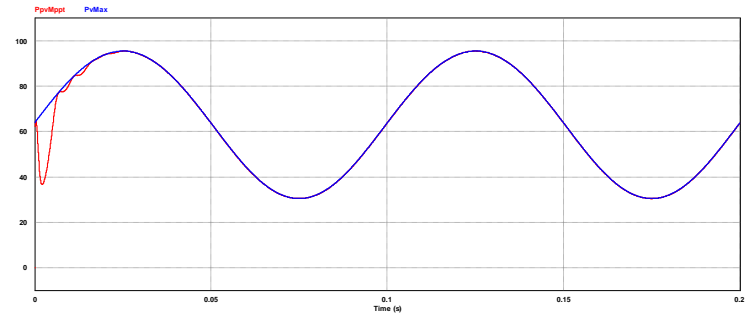
Şekil 6.11. Bulanık Mantık Denetleyicili MGNT Benzetim Sonuçları (Mamdani)



Şekil 6.12. Bulanık Mantık Denetleyicili MGNT Benzetim Sonuçları (Sugeno)



Şekil 6.13. Bulanık Mantık PID Denetleyicili MGNT Benzetim Sonuçları (Mamdani)

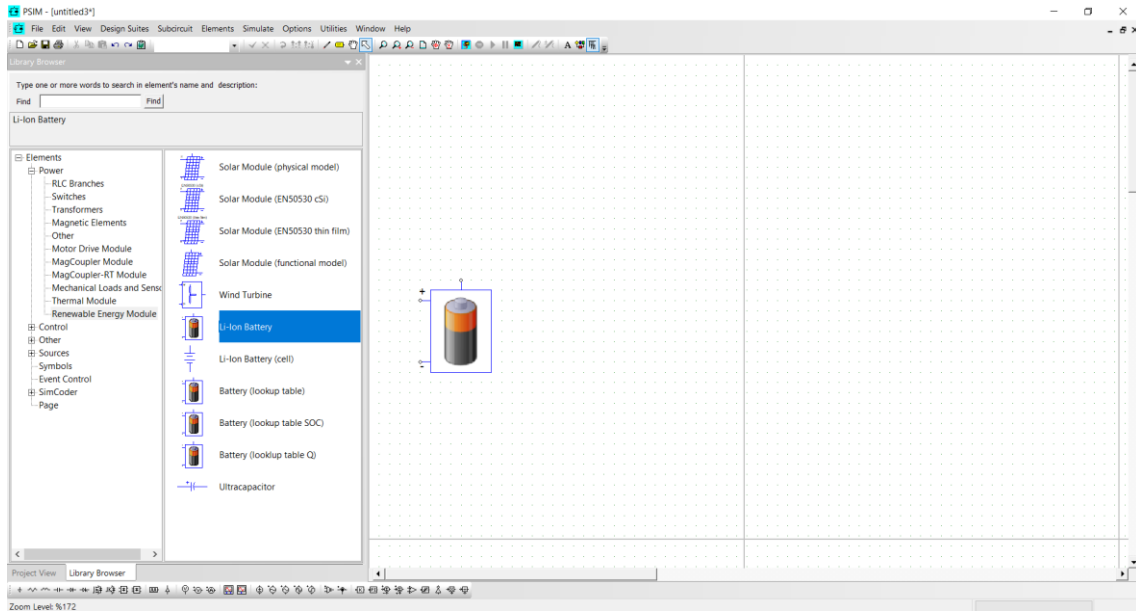


Şekil 6.14. Bulanık Mantık PID Denetleyicili MGNT Benzetim Sonuçları (Sugeno)

6.3. Enerji Depolama Ve Destek Birimi Benzetim Çalışmaları

Sistemde enerji depolama ve destek birimi olarak görev yapmakta olan bataryaların benzetim modeli ve bu modelin parametre ayarlamaları PSIM yazılımında aşağıda verilen adımlar izlenerek gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.15'te görüldüğü üzere, ilgili yazılım açılmış ve *Kütüphaneden (Library Browser) Güç (power)* kategorisi altındaki *Li-Ion Batarya (Li-Ion Battery)* seçilmiş ve çalışma ekranına eklenmiştir. Bu modelin seçilme nedeni kullanılan kuru tip batarya için kullanılabilir en yakın model olmasıdır.

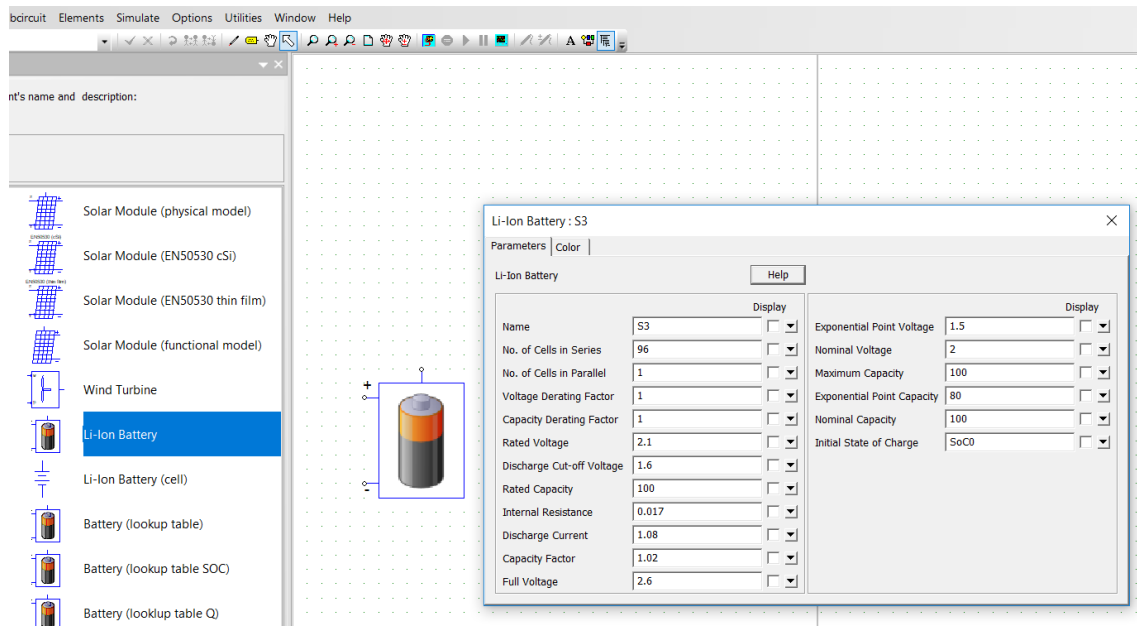


Şekil 6.15. Batarya Modelin PSIM Yazılımında Kütüphaneden Seçilmesi

Eklenen modüle çift tıklanarak üretici verileri ve tanımlanmış model parametreleri Şekil 6.16'da verildiği gibi girilmiştir. Bu parametreler ise şunlardır;

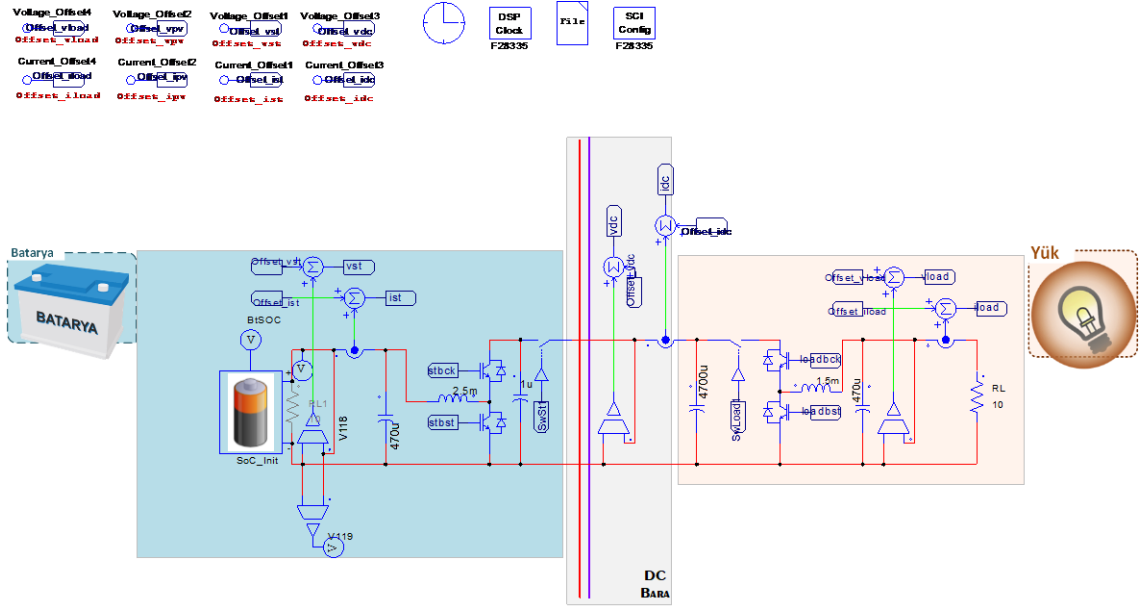
- *No. of Cells in Series*: Bir batarya paketindeki seri bağlı hücre sayısı N_s
- *No. of Cells in Parallel*: Bir batarya paketindeki paralel bağlı hücre sayısı N_p
- *Voltage Derating Factor*: Gerilim azalma faktörü K_s . 0 (%100 azalma) 1(azalma yok).
- *Capacity Derating Factor*: Kapasite azalma faktörü K_s . 0 (%100 azalma) 1(azalma yok).
- *Rated Voltage*: Bir batarya hücresinin nominal gerilimi, V.
- *Discharge Cut-off Voltage*: Maksimum kapasiteye karşılık gelen batarya gerilimi, V.
- *Rated Capacity*: Bir batarya hücresinin nominal kapasitesi, Ah.
- *Internal Resistance*: Bir batarya hücresinin dahili direnci, ohm.

- *Discharge Current*: Deşarj akımı, A.
- *Capacitor Factor*: Deşarj eğrisindeki Q0 ve Qmax değerlerinin oranı.
- *Full Voltage*: Bir batarya hücresinin maksimum gerilimi, V.
- *Exponential Point Voltage*: Deşarj eğrisinin ekponensiyel bölgesinin sonundaki batarya gerilimi, V.
- *Nominal Voltage*: Deşarj eğrisinin nominal bölgesinin sonundaki batarya gerilimi, V.
- *Maximum Capacity*: Deşarj kesim voltajına karşılık gelen kapasite değeri, Ah.
- *Exponential Point Capacity*: Deşarj eğrisinin ekponensiyel bölgesinin sonundaki batarya kapasitesi, Ah.
- *Nominal Capacity*: Deşarj eğrisinin nominal bölgesinin sonundaki batarya kapasitesi, Ah.
- *Initial State of Charge*: Başlangıç şarj durumu (SoC) değeri (0-1)



Şekil 6.16. Batarya Modeli Parametre Girişi ve Hesaplamaların Gerçekleştirilmesi

Böylelikle, benzetim ortamında benzer davranışlar sergileyerek gerçek bataryaları temsil edecek olan, batarya model bloğu elde edilmiştir. Daha sonra bu blok, şarj ve deşarj denetiminin gerçekleştirileceği bir enerji sisteminin benzetim çalışmasında kullanılmıştır. Bulanık mantık ve bulanık mantık PID denetleyici algoritmaları ile ayrı ayrı gerçekleştirilecek olan bu benzetim çalışması için, PSIM programında Şekil 6.17’de verilen benzetim şeması oluşturulmuştur.



Şekil 6.17. Batarya Şarj/Deşarj Denetimi İçin PSIM Ortamında Benzetim Şeması

Bu benzetim şemasında, batarya birimi, yük birimi, DC Bara hattı ve DSP ortamı sırasıyla mavi, turuncu, gri ve sarı bölgelerle temsil edilmiştir. Benzetim çalışmasında kullanılan bataryalar, *Li-Ion Batarya (Li-Ion Battery)* bloğu ile modellenmiş, üretici parametreleri girilerek model parametrelerinin hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bu blok, aynı zamanda bataryanın anlık SoC verisini de vermektedir. Bu veri, geliştirilen algoritmadan elde

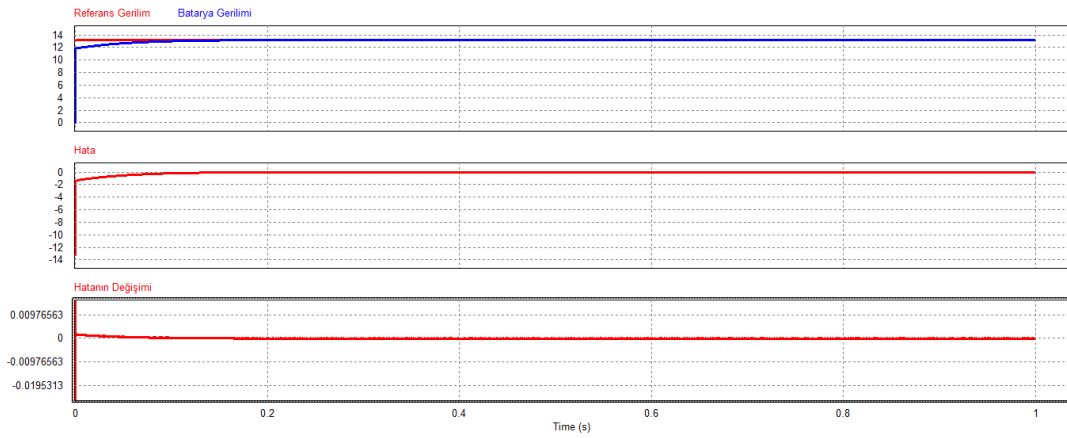
edilen SoC değerinin doğruluğunun teyit edilerek, performans değerlendirmesi yapılabilmesini mümkün kılmaktadır. Batarya denetiminde, řarj durumunda DC baradaki gerilim dūřürölerek DC baradan bataryaya yönlü, deşarj durumunda ise bataryadaki gerilim yükseltölerek bataryadan DC baraya yönlü bir enerji akışı olması gerekmektedir. Bu nedenle, enerji üretimi benzetim çalışmalarından farklı olarak, çift yönlü, dūřürölücü – yükseltici tip DC-DC dönüştürölücü kullanılmıştır. Kullanılan anahtarlama elemanları, “IGBT” bloğu ile temsil edilmiştir. Bu anahtarlama elemanlarının anahtarlama sinyalleri ise sistemde kullanılan TMS320F28335 mikro denetleyicinin PWM modölünü temsil eden “PWM” bloğu vasıtası ile oluşturulmaktadır. Yine aynı mikro denetleyicinin ADC modölünü temsil eden “ADC” bloğu ile sensörler vasıtası ile ölçülen batarya ve DC bara gerilim ve akımları sayısallaştırılmış ve C dilinde yazılan akıllı enerji yönetim algoritmasının bulunduğu “Simplified C Blok” bloğuna giriş olarak verilmiştir. Bu bloğun çıkışı da anahtarlama sinyallerini üretmek üzere “PWM” bloğuna bağlanmıştır. řarj durumunda, bataryayı řarj etmek üzere DC baraya bağlı bir güç kaynağı kullanılırken, deşarj durumunda ise, sisteme bağlanacak yükleri temsil etmek için DC baraya bağlı bir direnç kullanılmıştır. řarj veya deşarj durumuna göre direnç veya güç kaynağı aktif veya pasif edilerek benzetim çalışmaları gerekleştirilmıştir.

Gerçek hayat uygulamalarında saatler sürecek olan batarya şarj veya deşarj işlemlerinin bu denli uzun sürelerde benzetiminin yapılabilmesi imkân dahilinde değildir. Özellikle burada olduğu gibi karmaşık modeller ve hesaplama algoritmaları içeren benzetim çalışmalarında, birkaç saniyelik benzetimler dahi hem oldukça uzun sürelerde gerçekleştirilebilmekte hem de oldukça fazla sistem kaynağı (RAM, işlemci, vs.) gerektirmektedir. Bu nedenle, *Li-Ion Batarya (Li-Ion Battery)* bloğu parametreleri belirlenirken gerçek batarya parametreleri 1:1000 oranında ölçeklenmiştir. Böylelikle, bir anlamda bu oranda kapasitesi küçülen bataryaların, şarj veya deşarj süreleri de aynı oranda azalmış ve daha kısa sürelerde benzetiminin yapılabilmesi mümkün olmuştur.

6.4. Enerji Depolama Ve Destek Birimi Benzetim alışmaları Sonuçları

Daha önce PV panellerden maksimum güç elde etmek (MGNT denetimi) için uygulanan bulanık mantık denetleyici algoritması, batarya şarj denetimi gerçekleştirecek şekilde uyarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar şekil 6.18’de görölmektedir. Burada birinci grafikte kırmızı eğri ile verilen referans batarya şarj gerilimi, mavi eğri ile de ölçülen batarya gerilimi değerleri görölmektedir. Referans batarya şarj geriliminin (13V) kısa bir sürede (≈ 170 msn) yakalanabildiği ve bu değerde sabit kaldığı görölmektedir. İkinci ve üçüncü grafiklerde ise sırası ile hata ve hata miktarındaki değişim görölmektedir. Bataryanın SoC değeri 0,4 olarak

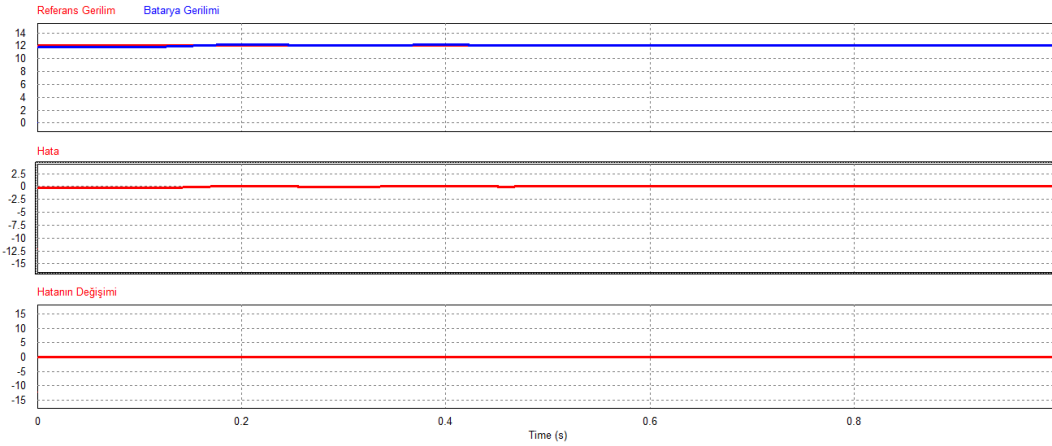
ayarlandığından batarya uçlarında başlangıçta nispeten az ($\approx 11V$) bir gerilim görülmektedir. Daha sonra, geliştirilen algoritmanın ürettiği doluluk oranına göre gönderilen anahtarlama sinyalleri ile çift yönlü düşürücü – yükseltici DC-DC dönüştürücünün düşürücü anahtarı sürülmektedir. Böylelikle batarya uçlarındaki gerilim değeri, DC baradan düşürülerek aktarılan gerilim ile birlikte referans gerilim değerine yükselmektedir. Hatanın ve hatadaki değişiminin de yine anı sürelerde sıfıra indiği görülmektedir. Buradan, geliştirilen algoritmanın referans gerilim değerini yakalayarak batarya şarj gerilimini bu seviyede sabit tuttuğu sonucu çıkarılabilir.



Şekil 6.18. Bulanık Mantık Denetleyici Algoritmasının Batarya Şarj Denetimi İçin Uygulanmasından Elde Edilen Sonuçlar

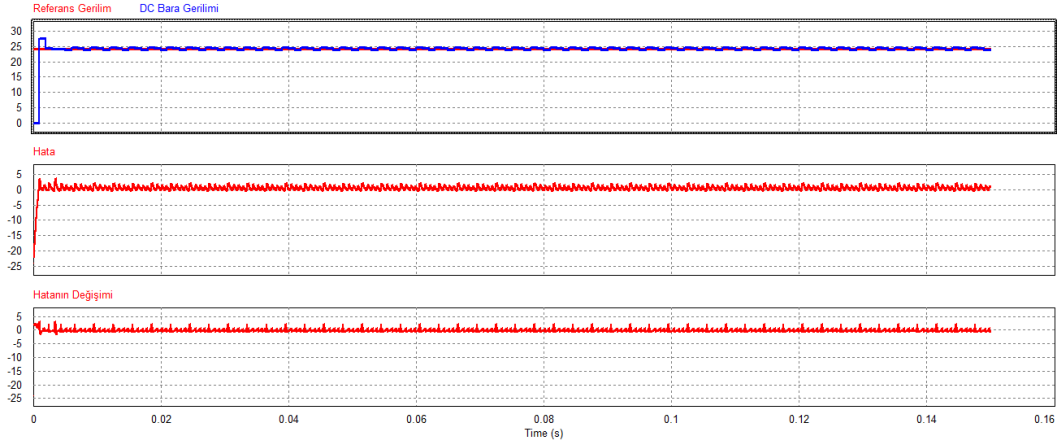
Daha önce PV panellerden maksimum güç elde etmek (MGNT denetimi) için uygulanan bulanık mantık PID denetleyici algoritması batarya şarj denetimi gerçekleştirecek şekilde uyarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.19’da görülmektedir. Burada birinci grafikte kırmızı eğri ile verilen referans batarya şarj gerilimi, mavi eğri ile de ölçülen batarya gerilimi değerleri görülmektedir. Referans batarya şarj geriliminin (12,1V) kısa bir sürede (≈ 180 msn) yakalanabildiği ve bu değerde sabit kaldığı görülmektedir. Bataryanın SoC değeri 0,4 olarak ayarlandığından batarya uçlarında başlangıçta nispeten az ($\approx 11V$) bir gerilim görülmektedir. Daha sonra, geliştirilen algoritmanın ürettiği doluluk oranına göre gönderilen anahtarlama sinyalleri ile çift yönlü düşürücü – yükseltici DC-DC dönüştürücünün düşürücü anahtarı sürülmektedir. Böylelikle batarya uçlarındaki gerilim değeri, DC baradan düşürülerek aktarılan gerilim ile birlikte referans gerilim değerine yükselmektedir. İkinci ve üçüncü grafiklerde ise sırası ile hata ve hata miktarındaki değişim görülmektedir. Hatanın ve hatadaki değişiminin de yine anı sürelerde sıfıra indiği görülmektedir. Buradan, geliştirilen algoritmanın referans

gerilim değerini yakalayarak batarya şarj gerilimini bu seviyede sabit tuttuğu açıkça görülmektedir.



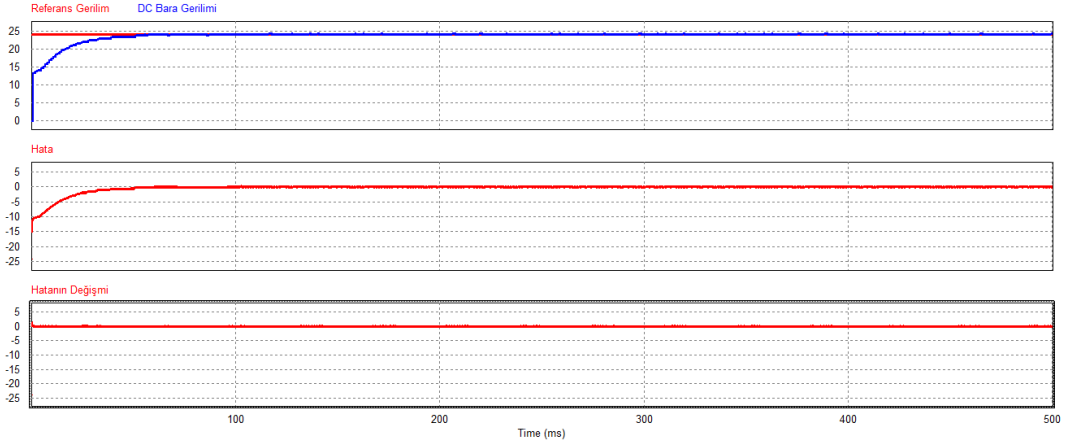
Şekil 6.19. Bulanık Mantık PID Denetleyici Algoritmasının Batarya Şarj Denetimi İçin Uygulanmasından Elde Edilen Sonuçlar

Daha önce PV panellerden maksimum güç elde etmek (MGNT denetimi) için uygulanan bulanık mantık denetleyici algoritması batarya deşarj denetimi gerçekleştirecek şekilde uyarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.20’de görülmektedir. Burada birinci grafikte kırmızı eğri ile verilen referans DC bara gerilimi, mavi eğri ile de ölçülen DC bara gerilimi değerleri görülmektedir. Referans DC bara geriliminin (24V) kısa bir sürede (≈ 5 msn) yakalanabildiği ve bu değere yakın değerlerde salınım yaptığı görülmektedir. Bataryanın SoC değeri 0,8 olarak ayarlandığından batarya gerilimi maksimum değere yakındır ($\approx 12V$). Daha sonra, geliştirilen algoritmanın ürettiği doluluk oranına göre gönderilen anahtarlama sinyalleri ile çift yönlü düşürücü – yükseltici DC-DC dönüştürücünün bu kez yükseltici anahtarı sürülmektedir. Böylelikle, DC baradaki gerilim değeri, bataryadan yükseltilerek aktarılan gerilim ile birlikte referans gerilim değerine yükselmektedir. İkinci ve üçüncü grafiklerde ise sırası ile hata ve hata miktarındaki değişim görülmektedir. Hatanın ve hatadaki değişimin de yine anı sürelerde sıfıra yaklaşarak salınım yaptığı görülmektedir. Buradan, geliştirilen algoritmanın referans gerilim değerini yakalayarak DC bara gerilimini bu seviye etrafında salınım yaparak yakın değerlerde tuttuğu sonucu çıkarılabilir.



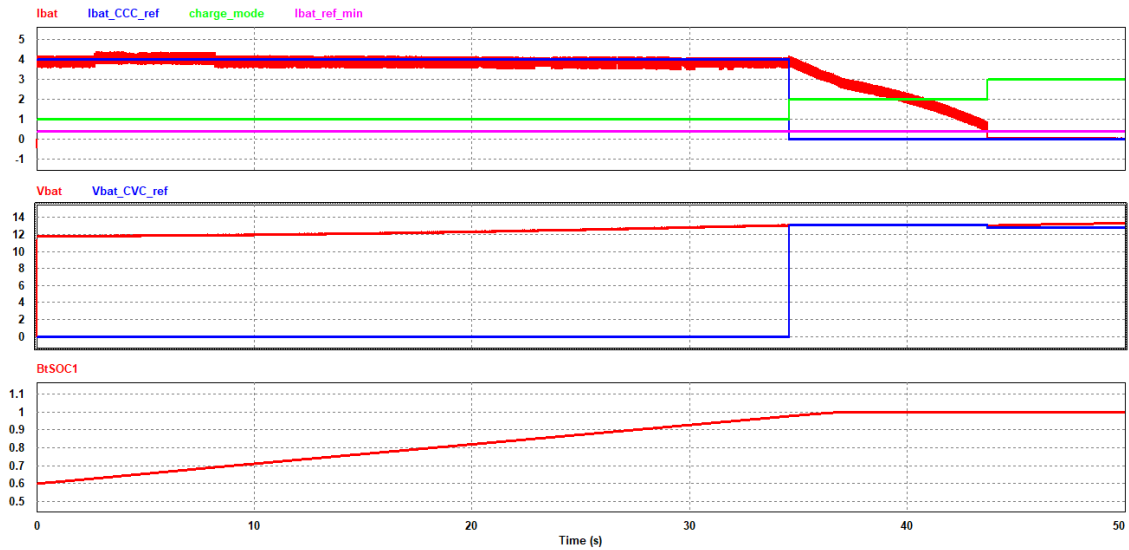
Şekil 6.20. Bulanık Mantık Denetleyici Algoritmasının Batarya Deşarj Denetimi İçin Uygulanmasından Elde Edilen Sonuçlar

Daha önce PV panellerden maksimum güç elde etmek (MGNT denetimi) için uygulanan bulanık mantık PID denetleyici algoritması batarya deşarj denetimi gerçekleştirecek şekilde ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.21’de görülmektedir. Burada birinci grafikte kırmızı eğri ile verilen referans DC bara gerilimi, mavi eğri ile de ölçülen DC bara gerilimi değerleri görülmektedir. Referans DC bara geriliminin (24V) kısa bir sürede (≈ 50 msn) yakalanabildiği ve bu değerde sabit kaldığı görülmektedir. Bataryanın SoC değeri 0,8 olarak ayarlandığından batarya gerilimi maksimum değere yakındır ($\approx 12V$). Daha sonra, geliştirilen algoritmanın ürettiği doluluk oranına göre gönderilen anahtarlama sinyalleri ile çift yönlü düşürücü – yükseltici DC-DC dönüştürücünün bu kez yükseltici anahtarı sürülmektedir. Böylelikle, DC baradaki gerilim değeri, bataryadan yükseltılarak aktarılan gerilim ile birlikte referans gerilim değerine yükselmektedir. İkinci ve üçüncü grafiklerde ise sırası ile hata ve hata miktarındaki değişim görülmektedir. Hatanın ve hatadaki değişimin de yine anı sürelerde sıfıra indiği görülmektedir. Buradan, geliştirilen algoritmanın referans gerilim değerini yakalayarak DC bara gerilimini bu seviyede sabit tuttuğu açıkça görülmektedir.



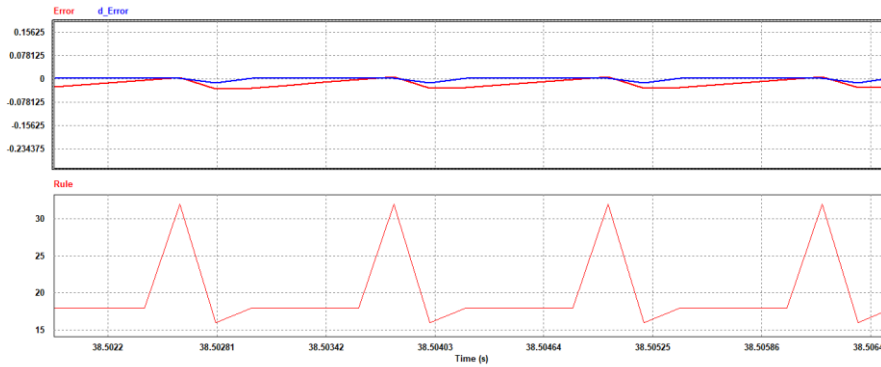
Şekil 6.21. Bulanık Mantık PID Denetleyici Algoritmasının Batarya Deşarj Denetimi İçin Uygulanmasından Elde Edilen Sonuçlar

Geliştirilen algoritmalar, daha önce bahsedildiği üzere batarya ömrünü daha etkin kullanmayı amaçlayan üç aşamalı şarj yöntemi ile bataryayı şarj etmek için benzetim modeli üzerinde çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 6.22'de gösterilmiştir. Burada, enerji depolama birimi şarj durumundayken 3 aşamalı şarj yöntemi için elde edilen batarya akım, gerilim ve şarj durumu grafikleri gösterilmektedir. Buna göre birinci grafikte kırmızı eğri batarya akımını, mavi ve pembe eğriler batarya şarj akımı referanslarını, yeşil eğri ise şarj işleminin 3 aşamalı şarj yönteminin değişen aşamalarını temsil etmektedir. İkinci grafikte, kırmızı eğri batarya gerilimini, mavi eğri ise batarya şarj gerilim referansını temsil etmektedir. Üçüncü grafikte ise bataryanın şarj durumu değeri görülmektedir.



Şekil 6.22. 3 Aşamalı Şarj Denetimi Benzetim Çalışması Sonuçları

Sonuçlar incelendiğinde; 50 saniyelik benzetim çalışmasında yaklaşık olarak ilk 35 saniyenin, 3 aşamalı şarj yöntemindeki 1. aşama olan sabit akım şarj aşaması, 35-45 saniye arasının 2. aşama olan sabit gerilim şarjı aşaması ve son 5 saniyelik kalan sürenin 3. aşama olan yüzer şarj aşaması olduğu görülmektedir. Sabit akım şarj aşamasında, bataryanın 4A olarak belirlenen referans şarj akımı ile şarj edilmesi beklenmekte ve bu doğrultuda 4A civarında hafif bir salınımla bataryanın şarj edildiği görülmektedir. Bu aşamada batarya gerilimi referansı sıfır iken batarya gerilimi hızla yükselmekte, batarya şarj durumu değeri de 0,6 başlangıç değerinden 1'e doğru yaklaşmaktadır. Batarya gerilimi yaklaşık 35. saniyede 13,1V olarak belirlenen referans değerine ulaştığında, sabit gerilim şarjı aşamasına geçilmektedir. Bir önceki aşamada 1'e çok yakın olan şarj durumu değeri bu aşamada 1'e ulaştırılmaktadır. Aynı zamanda batarya, 13,1V olarak belirlenen referans gerilimi ile şarj akımı 0,4 A olarak belirlenen minimum akım referans değerine düşene kadar şarj edilmeye devam etmektedir. Batarya şarj akımı referans değerine düştüğünde batarya tam şarj duruma ulaşmış olmaktadır. Bataryanın kendi kendine deşarj olmasına izin verilmeden bu durumunu devam ettirebilmesi için bir önceki aşamada ulaştığı gerilimin çok az altında bir değerle (12,8V olarak belirlenmiştir) yüzer şarj aşamasında tutulmaktadır. Bu aşamada batarya, ulaştığı tam şarj durumunu çok uzun süreler boyunca dahi koruyacak şekilde sabit tutulabilmektedir.

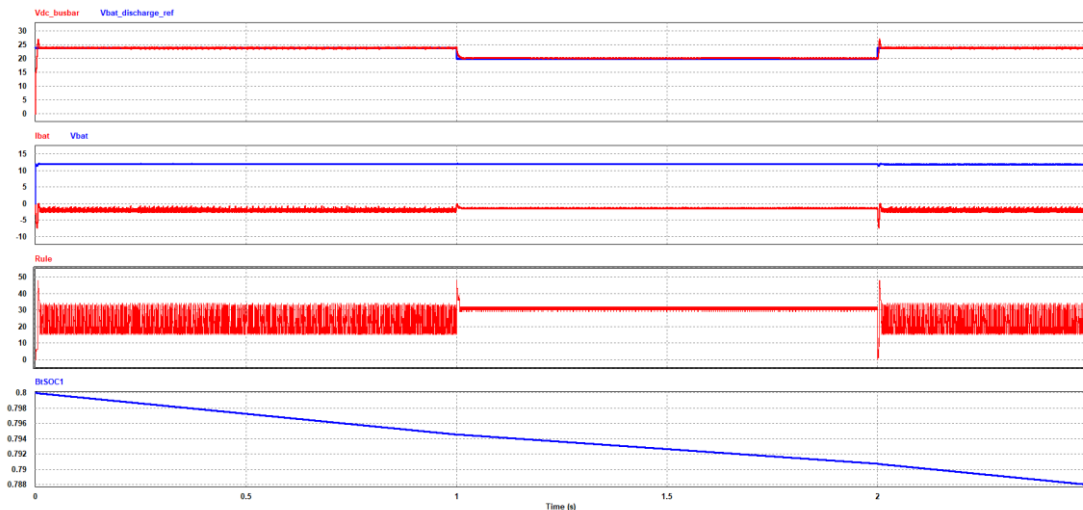


Şekil 6.23. 3 Aşamalı Şarj Denetimi Benzetim Çalışması Sonuçları – Hata, Hatanın Değişimi ve Bulanık Mantık Denetleyicinin Kuralları

Şekil 6.23'te ise bu benzetimin çok kısa bir anı için (yaklaşık 38,5. saniye civarlarında) ilk grafikte kırmızı eğri hatayı, mavi eğri hatanın değişimini, ikinci grafik ise bulanık mantık denetleyicisinin aktif kurallarındaki değişimi görülmektedir. Buna göre hata ve hatanın değişiminin beklendiği şekilde sıfır civarında seyrettiği ve bulanık mantık denetleyici aktif kurallarının da bunu sağlayacak şekilde oldukça seri bir şekilde değişim gösterdiği görülmektedir.

Şarj durumunda olduğu gibi deşarj durumunda da bir batarya için deşarj akım ve geriliminin sınırlar dahilinde izlenmesi ve denetlenmesi, batarya ömrü ve verimi bakımından oldukça büyük bir öneme sahiptir. Şekil 6.24'te, enerji depolama birimi deşarj durumundayken elde edilen gerilim, akım, bulanık mantık denetleyicinin aktif kuralları ve batarya şarj durumu grafikleri görülmektedir. Buna göre birinci grafikte kırmızı eğri DC bara gerilimini, mavi eğri ise batarya deşarj gerilimi referansını temsil etmektedir. İkinci grafikte, kırmızı eğri batarya akımını, mavi eğri ise batarya gerilimini temsil etmektedir. Üçüncü grafikte bulanık mantık denetleyicisinin aktif kurallarındaki değişim görülmektedir. Dördüncü grafikte ise batarya şarj durumu değeri görülmektedir.

Deşarj benzetim çalışması için bataryanın başlangıç şarj durumu 0,8 olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda batarya terminallerinde 12,5 V civarında bir gerilim bulunmaktadır. DC barada, ilk olarak 24 V gerilim talep edilmekte ve bulanık mantık denetleyici deşarj algoritması batarya terminalindeki gerilimi bu değere yükselterek DC baraya aktarmaktadır. Referans DC bara gerilimi daha sonra 20 V değerine düşürülmekte ve tekrar 26 V değerine yükseltilmektedir. Beklendiği üzere, DC bara geriliminin bataryadan yükseltilerek aktarılan gerilim ile verilen referans gerilim değerlerini takip ettiği görülmektedir. Tüm deşarj işlemi boyunca, DC barada istenen değerlerde bir gerilim elde edebilmek için batarya akımının sürekli olarak negatif değerlerde değiştii gözlenmektedir. Batarya akımının negatif değerler alması ve batarya şarj durumu değerinin sürekli olarak azalması bataryanın deşarj durumunda olmasından kaynaklanmaktadır.

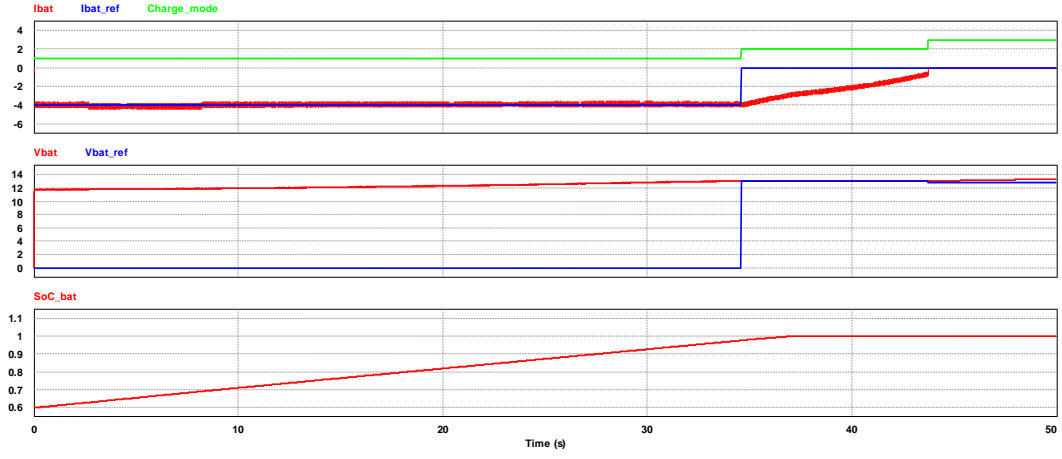


Şekil 6.24. Benzetim Sonuçları – Batarya Deşarj İşlemi

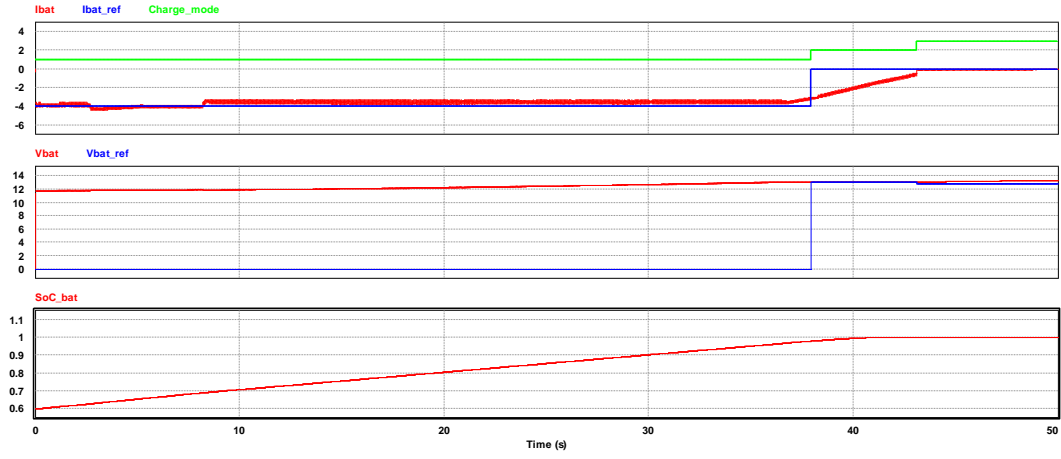
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, batarya şarj durumunda iken 3 aşamalı batarya şarj yöntemine uygun olarak şarj işleminin tamamlandığı ve deşarj durumunda iken ise uygun sınırlar dahilinde deşarj işleminin yapılabildiği görülmektedir. 3 aşamalı batarya şarj yönteminin ilk aşaması olan sabit akım şarj aşamasında 4A şarj akımı referansı belirlenmiş ve batarya bu akım değeri etrafında küçük salınımlarla şarj edilebilmiştir. İkinci aşama olan sabit gerilim şarjı aşamasında, 13,1V şarj gerilimi referansı belirlenmiş ve bu gerilim değeri ile bataryanın tam şarja ulaşabildiği gözlemlenmiştir. Son aşama olan yüzer şarj aşamasında ise 12,8V gerilim referansı belirlenmiş ve bu referans gerilimi ile bataryanın tam dolu durumunun korunduğu gözlemlenmiştir.

Deşarj modunda DC bara için sırasıyla 24, 20 ve 26V gerilim referans değerleri verilmiştir. Bataryanın deşarj akımı sınırlar dahilinde deşarj edilmesiyle elde edilen gerilim, yükseltilerek DC baraya aktarılmış ve böylelikle DC bara geriliminin referans değerde olması sağlanmıştır.

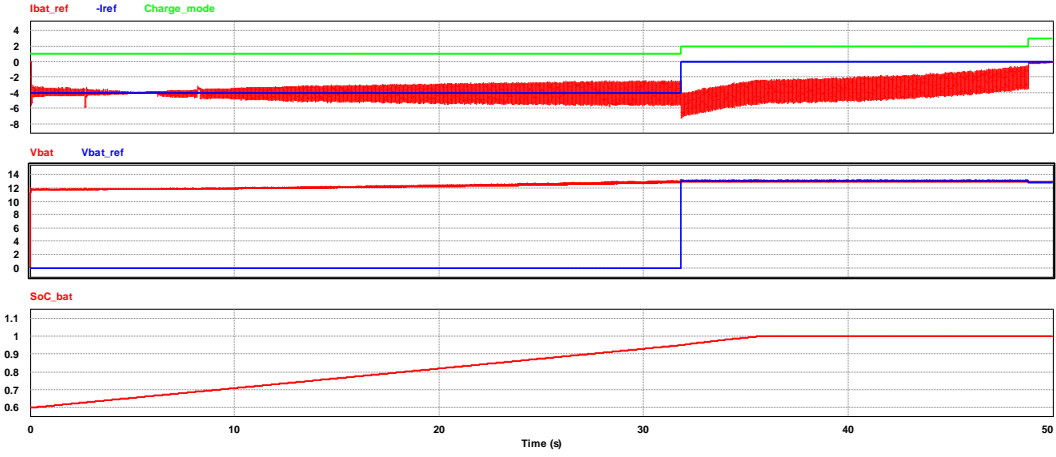
Geliştirilen algoritmalar gerçek hayat uygulamalarında mikro denetleyici üzerinde koşma süresi bakımından problemlere neden olduğundan bulanık mantık algoritmasında başvurulan Mamdani yönteminin yerine nispeten daha az işlem karmaşıklığı ve dolayısı ile daha az döngü içeren Sugeno yöntemi kullanacak şekilde yeniden düzenlenmiştir. Bulanık Mantık ve Bulanık Mantık PID batarya şarj ve deşarj algoritmalarının her biri için, önce Mamdani sonra Sugeno yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar Şekil 6.25 – 6.32’de görülmektedir.



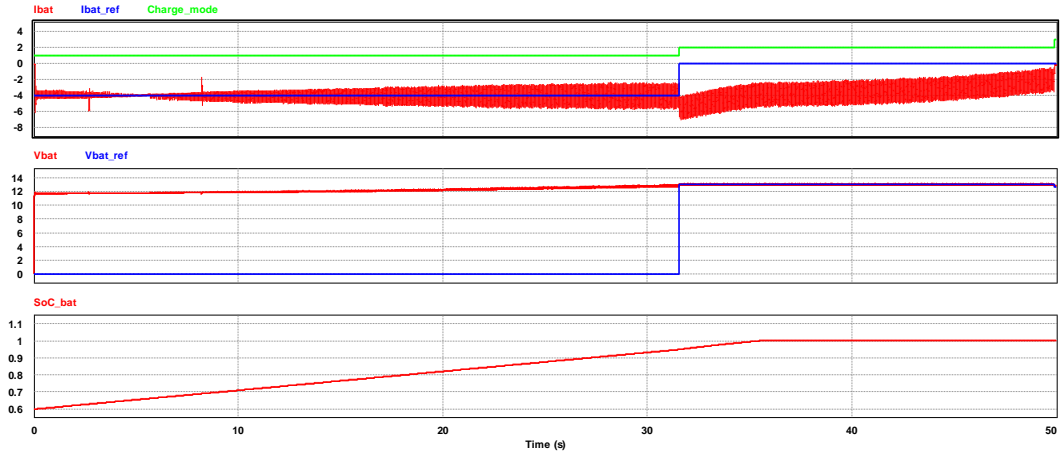
Şekil 6.25. Bulanık Mantık Denetleyicili 3 Aşamalı Batarya Şarj Benzetim Sonuçları (Mamdani)



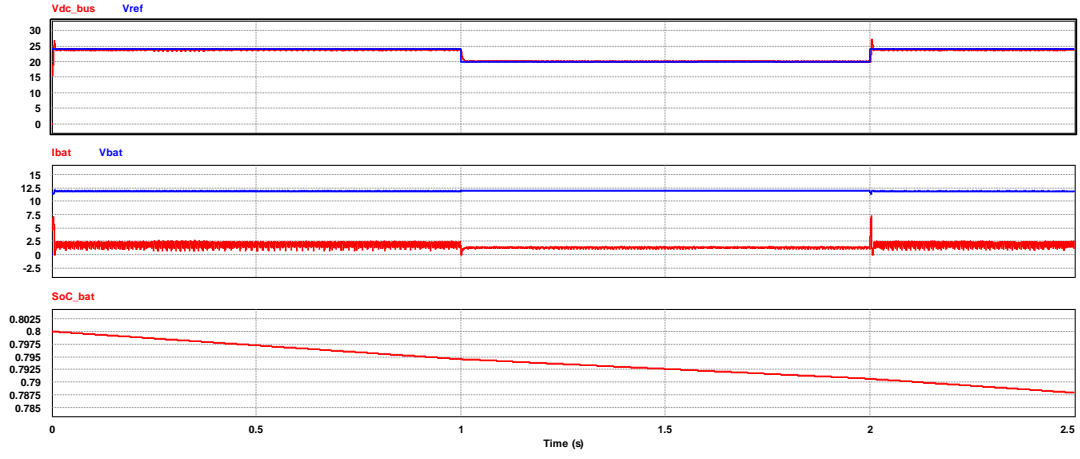
Şekil 6.26. Bulanık Mantık Denetleyicili 3 Aşamalı Batarya Şarj Benzetim Sonuçları (Sugeno)



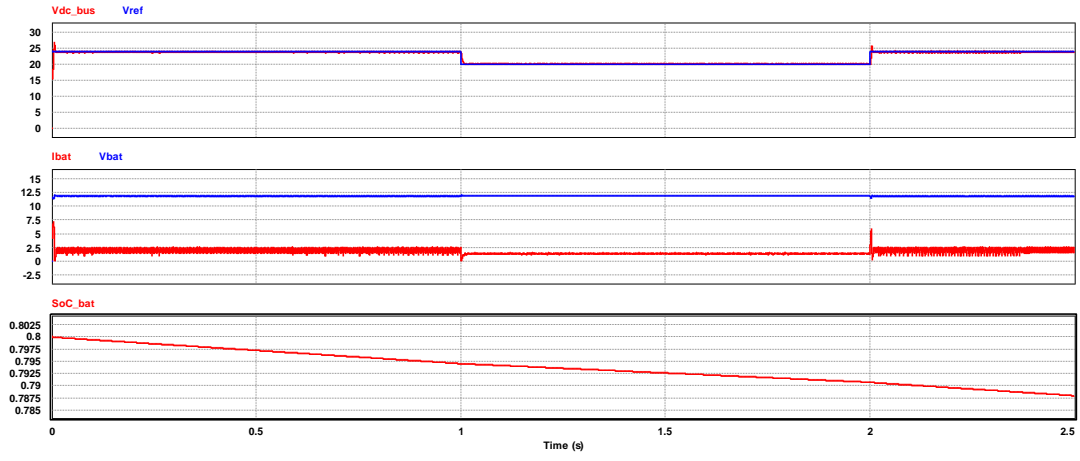
Şekil 6.27. Bulanık mantık PID Denetleyicili 3 Aşamalı Batarya Şarj Benzetim Sonuçları (Mamdani)



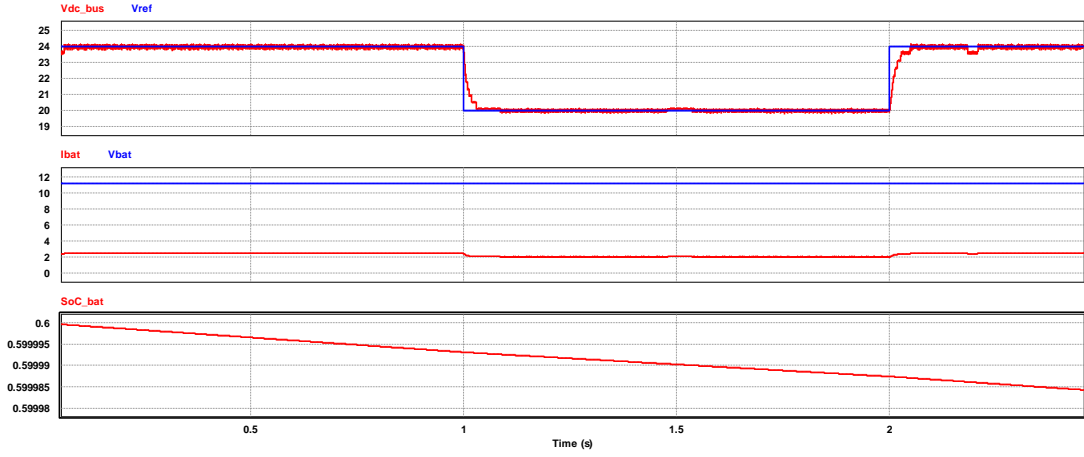
Şekil 6.28. Bulanık Mantık PID Denetleyicili 3 Aşamalı Batarya Şarj Benzetim Sonuçları (Sugeno)



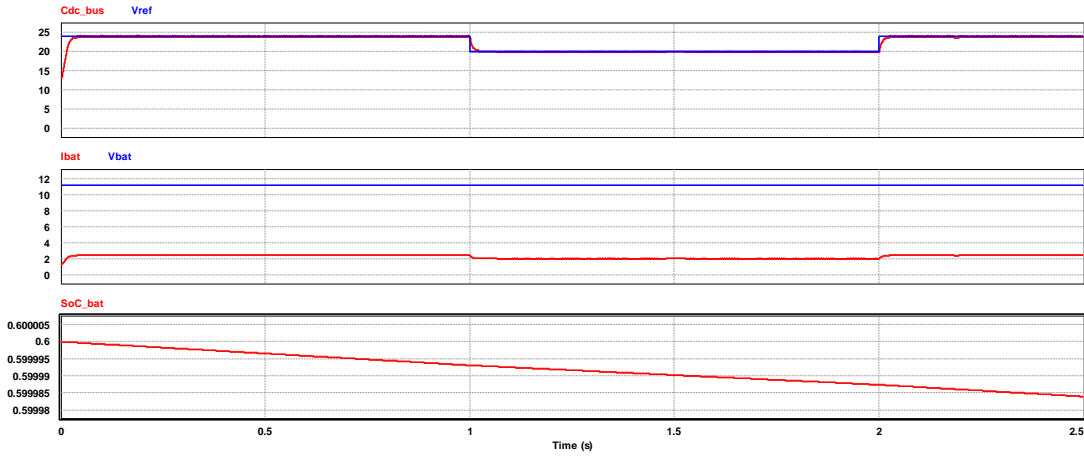
Şekil 6.29. Bulanık Mantık Denetleyicili Batarya Deşarj Benzetim Sonuçları (Mamdani)



Şekil 6.30. Bulanık Mantık Denetleyicili Batarya Deşarj Benzetim Sonuçları (Sugeno)



Şekil 6.31. Bulanık Mantık PID Denetleyicili Batarya Deşarj Benzetim Sonuçları (Mamdani)



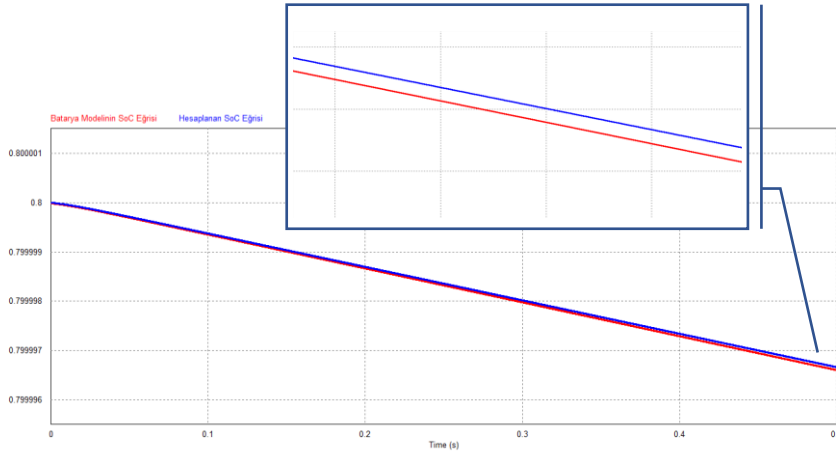
Şekil 6.32. Bulanık Mantık PID Denetleyicili Batarya Deşarj Benzetim Sonuçları (Sugeno)

Elde edilen bu sonuçlara göre Mamdani ve Sugeno yöntemleri ile geliştirilen bulanık mantık ve bulanık mantık PID denetleyici algoritmaları arasında önemli bir farklılık görülmemiştir. Bu nedenle deneysel çalışmalarda bulanık mantık için Sugeno yöntemi tercih edilmiştir.

6.5. SoC Algoritması Benzetim Çalışmaları Sonuçları

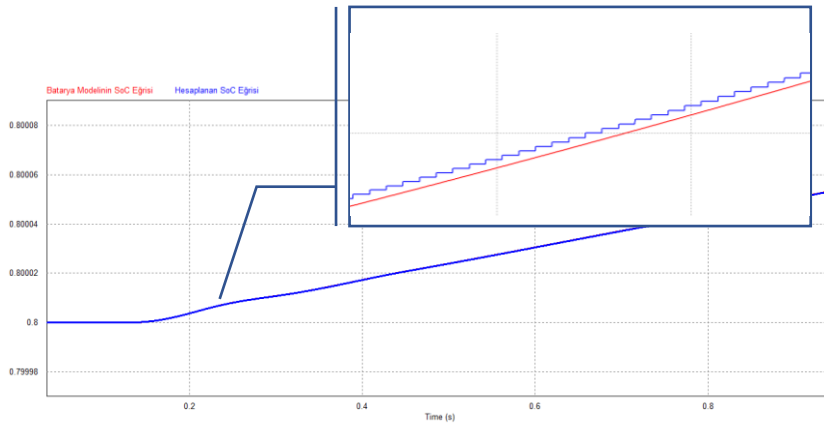
Sistemde enerji depolama ve destek birimi elmanı olarak kullanılacak olan bataryaların şarj/deşarj durumlarının hangisinde olması gerektiğinin veya bu durumlardaki gerekli denetimlerinin gerçekleştirilebilmesi için oldukça önemli olan SoC verisi PSIM programında kullanılan *Li-Ion Batarya (Li-Ion Battery)* bloğunun bir çıkışı olarak verilmektedir. Dolayısı ile bu sayede, benzetim çalışmalarında bu veriyi anlık olarak elde ederek kullanmak oldukça kolay olmaktadır. Fakat deneysel çalışmalarda, daha önce de belirtildiği üzere hesaplanması oldukça zor olan bu verinin birtakım yöntemler kullanılarak elde edilmesi gerekmektedir. Burada 3.3.3.

bölümünde ayrıntılı olarak ele alınan *Amper Saat Sayımı* yöntemi kullanılarak geliştirilen algoritma ile SoC verisi yaklaşık olarak elde edilmektedir. Şekil 6.33'te deşarj esnasında kırmızı ile batarya modelinin SoC eğrisi, mavi ile algoritma sonucunda elde edilen SoC eğrisi görülmektedir.



Şekil 6.33. Deşarj Sürecinde Batarya Modelinin ve Amper Saat Sayımı ile Belirlenen SoC Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 6.34'te ise şarj esnasında kırmızı ile batarya modelinin SoC eğrisi, mavi ile algoritma sonucunda elde edilen SoC eğrisi görülmektedir.



Şekil 6.34. Şarj Sürecinde Batarya Modelinin ve Amper Saat Sayımı ile Belirlenen SoC Değerlerinin Karşılaştırılması

Gerek şarj gerekse deşarj işlemi sırasında elde edilen SoC eğrisinin batarya modelinden elde edilen SoC eğrisi ile ($\approx 99,9\%$) örtüştüğü görülmektedir.

7. YEK TABANLI ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ UYGULAMA ÇALIŞMALARI VE SONUÇLAR

7.1. Enerji Yönetim Sistemi Deneysel Çalışma Test Düzenegi

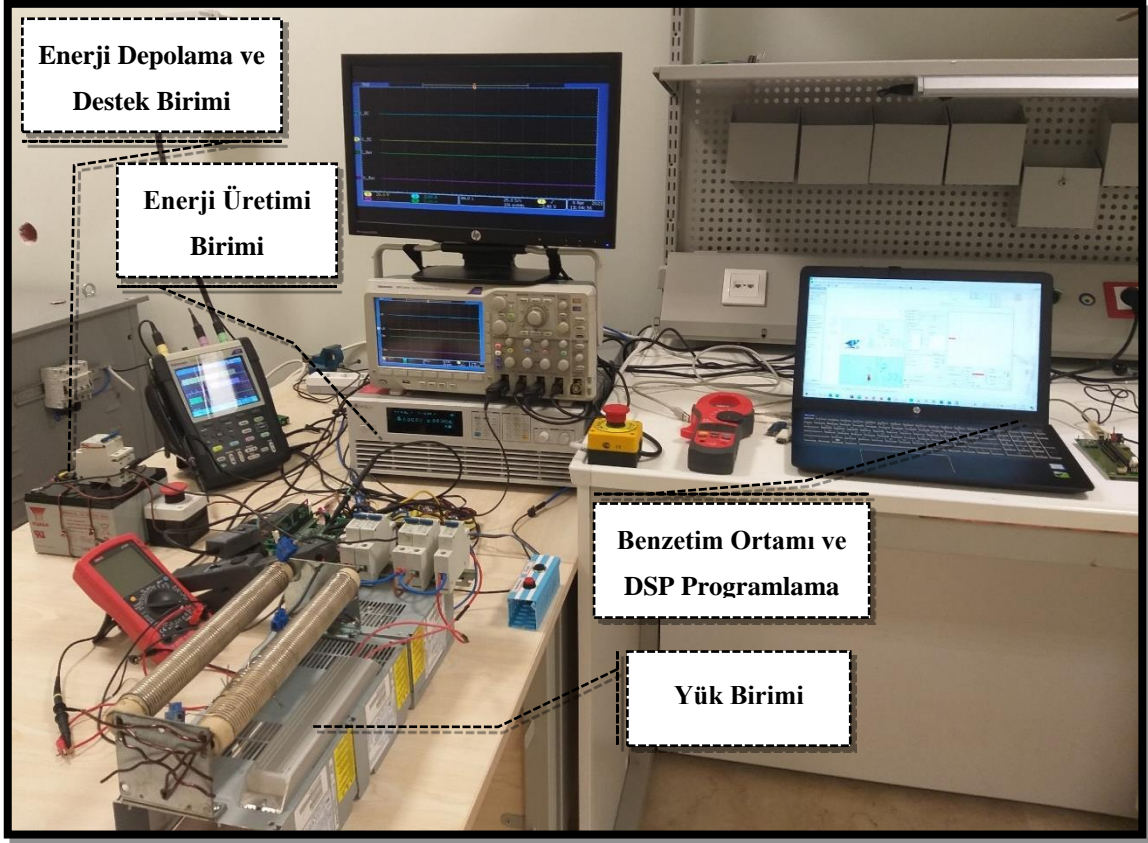
Tez kapsamında geliştirilen YEK tabanlı enerji yönetim sistemi; bataryalardan oluşan bir enerji depolama ve destek birimi, PV panellerden oluşan bir enerji üretimi birimi ve YEKlerden elde edilen enerjiyi kullanacak olan yük biriminden meydana gelmektedir. Ayrıca bu birimlere ek olarak, gerek bu birimler arasında gerçekleşecek olan enerji akışlarını denetlemek gerekse birimlerin verilen referans güç değerleri doğrultusunda dahili denetimlerini gerçekleştirmek üzere PWM, ADC, SCI gibi çevresel birimleri ile birlikte bir DSP kartı, anahtarlama ve filtreleme devreleri de bulunmaktadır.

DSP ile birlikte, başta akıllı enerji yönetimi algoritması olmak üzere batarya doluluk durumunu belirleme ve ADC kalibrasyonu gerçekleştirme gibi görevleri yerine getirmek üzere C programlama dili kullanılarak geliştirilen farklı algoritmalar, bu algoritmalarından elde edilen doluluk oranı verisi doğrultusunda anahtarlama sinyallerinin üretilmesini sağlamak üzere PWM modülleri ve yine bu algoritmalarından elde edilen hata, hatanın değişimi, SoC vb. değerlerin gözlemlenmesini sağlamak üzere SCI modülleri de kullanılmaktadır.

Geliştirilen deneysel çalışma test düzeneginde enerji depolama ve destek birimi, Yuasa marka NPW45-12 model 12V VRLA tip batarya kullanılarak oluşturulmuştur. Burada, akımın yetersiz kalabileceği olası durumlar da göz önünde bulundurularak, duruma göre tek bir batarya veya paralel bağlı iki batarya olacak şekilde iki farklı alternatife sahip olan bir batarya grubu tercih edilmiştir.

Enerji üretimi birimi, Perlight marka PLM-100P/12 model PV panel kullanılarak oluşturulmuştur. Hava durumuna bağlı güneşlenme koşulları ve vakitten bağımsız bir deneysel çalışma ortamının oluşturulabilmesi için, sistemde kullanılan PV panel gibi davranacak şekilde programlanabilen, Chroma marka 62000H-S model bir PV simülatörü tercih edilmiştir.

Yük birimi ise omik direnç kullanılarak oluşturulmuştur. Enerji yönetim sisteminin farklı yükler karşısında verdiği cevabın gözlemlenmesini sağlamak üzere geliştirilen, 100, 50, 25, 13 ohm gibi farklı değerler alabilen bir yük bankası tercih edilmiştir. Tüm bu birimler ve benzetim ortamı Şekil 7.1'de gösterilmiştir.

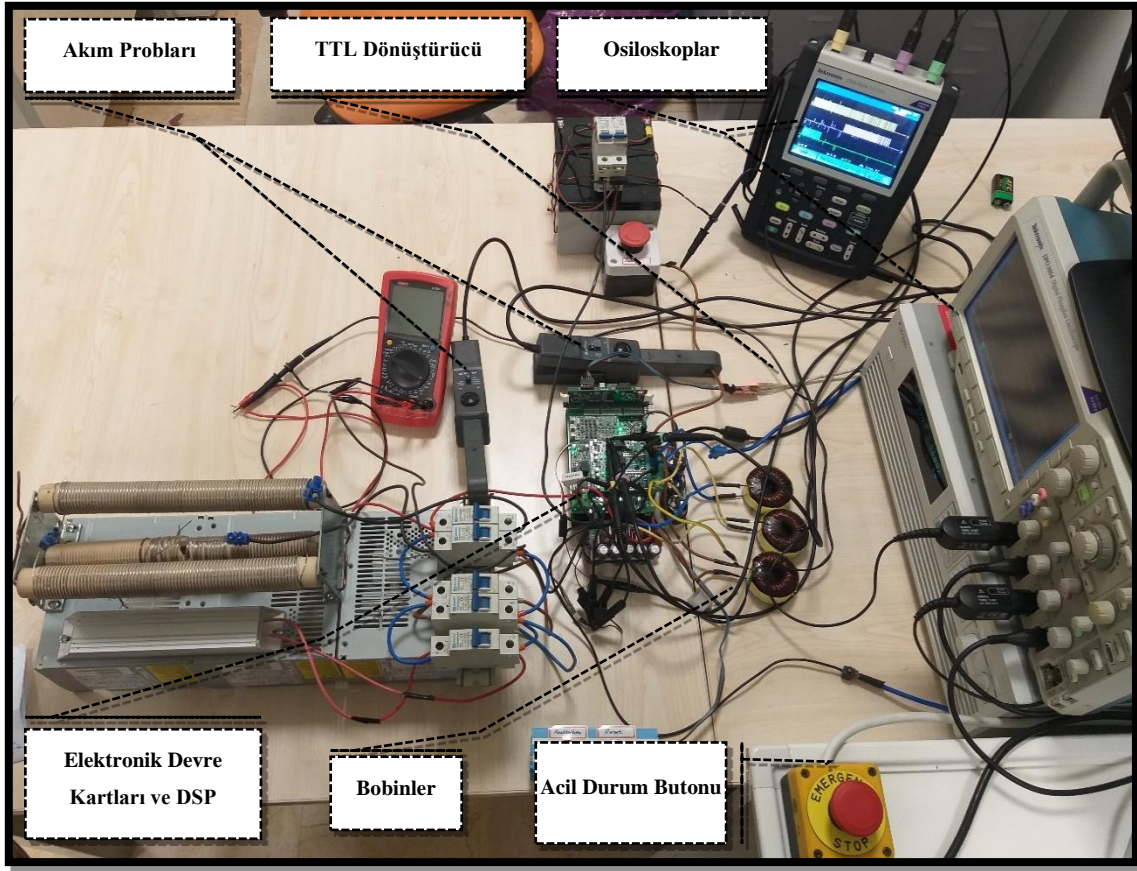


Şekil 7.1. Deneysel Çalışma Test Düzenegi – Birimler

Geliştirilen algoritmaları koşacak ve anahtarlama sinyallerini üretecek olan Texas Instruments firmasının TMS320F28335 DSP kartı, DSP katının güç katından gelebilecek gerilimlere karşı korunması için bir tampon katı, enerji yönetim sisteminin aşırı akım veya gerilimden korunması için bir koruma katı, üç denetleme kanalı ve bir de ortak DC bara hattı için toplam dört adet akım ve gerilim ölçüm katları ve bunların altında üç denetleme kanalının her biri için ikişer adet anahtarlama elemanının bulunduğu anahtarlama katı gibi farklı modüller şeklinde geliştirilen elektronik devre kartları Şekil 7.2’de görülmektedir. Bunun yanı sıra her bir denetleme kanalının girişinde kullanılan (yapılan hesaplamalar sonucu 2.5mH olarak belirlenen) bobinler ve çıkışında kullanılan RCD snubber katı da yine Şekil 7.2’de görülmektedir. Enerji yönetim sistemi anahtarlama frekansı, anahtarlama kayıplarını düşük tutabilmek üzere 10KHz gibi nispeten yüksek sayılabilecek bir değer olarak belirlendiğinden özellikle yüksek güçlerde aşırı ısınma gibi durumların engellenebilmesi için anahtarlama katı bir soğutucu plaka üzerine yerleştirilmiştir.

Ayrıca enerji yönetim sistemi deneysel çalışma test düzeneginde; seri iletişim kullanılarak PSIM benzetim programında DSP içerisindeki bazı değişkenlerin gözlemlenebilmesini sağlamak üzere bir transistör – transistör lojik (TTL) dönüştürücü, acil

durumlarda sistemi durdurulabilmesini sağlamak üzere bir acil durum butonu ve enerji depolama biriminin devreye alınıp devreden çıkarılablmesini sağlamak üzere bir batarya butonu da kullanılmaktadır.



Şekil 7.2. Deneysel Çalışma Test Düzenegi – Elemanlar

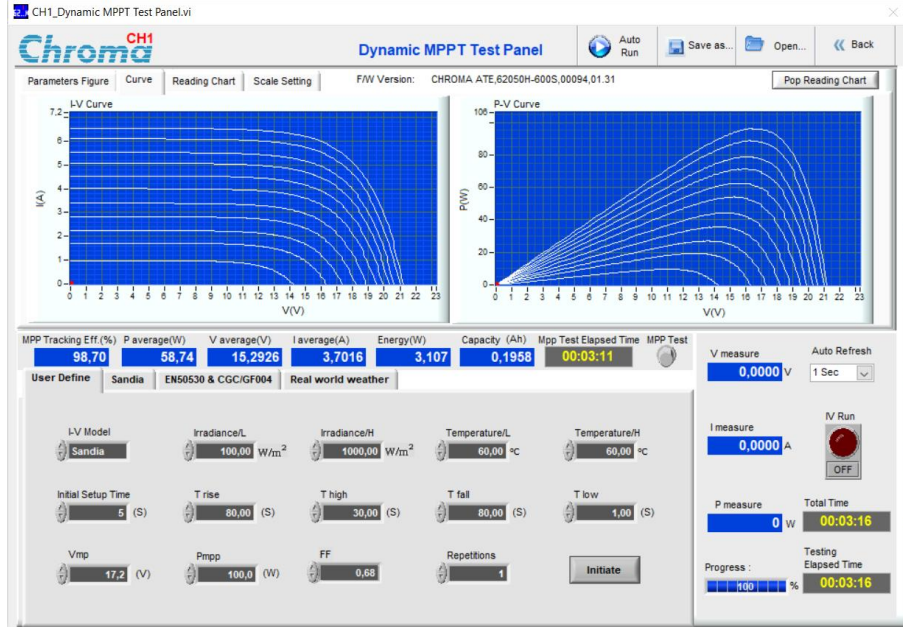
Enerji yönetim sisteminin farklı durumdaki cevabını gözlemleyebilmek üzere iki adet osiloskop kullanılmıştır. El tipi olan osiloskop ile; 1. kanal enerji üretimi birimi anahtarlama sinyalini, 3 ve 4. kanallar ise enerji depolama ve destek birimi anahtarlama sinyallerini gözlemlemek için kullanılmakta iken diğer osiloskop ile; 1. ve 2. kanallar sırası ile DC bara gerilim ve akımını ve 3. ve 4. kanallar ise sırası ile enerji depolama ve destek birimi gerilim ve akımını gözlemlemek için kullanılmaktadır. Ayrıca, DC bara, enerji depolama ve destek birimi güç değerleri de akım ve gerilim değerlerinden elde edilmekte ve osiloskop ile gözlenmektedir. Enerji üretim birimi akım, gerilim ve güç değerleri ise PV simülatörü ekranından elde edilmektedir.

7.2. Bulanık Mantık Denetleyicili Enerji Yönetim Algoritması Uygulama Çalışmaları Ve Sonuçları

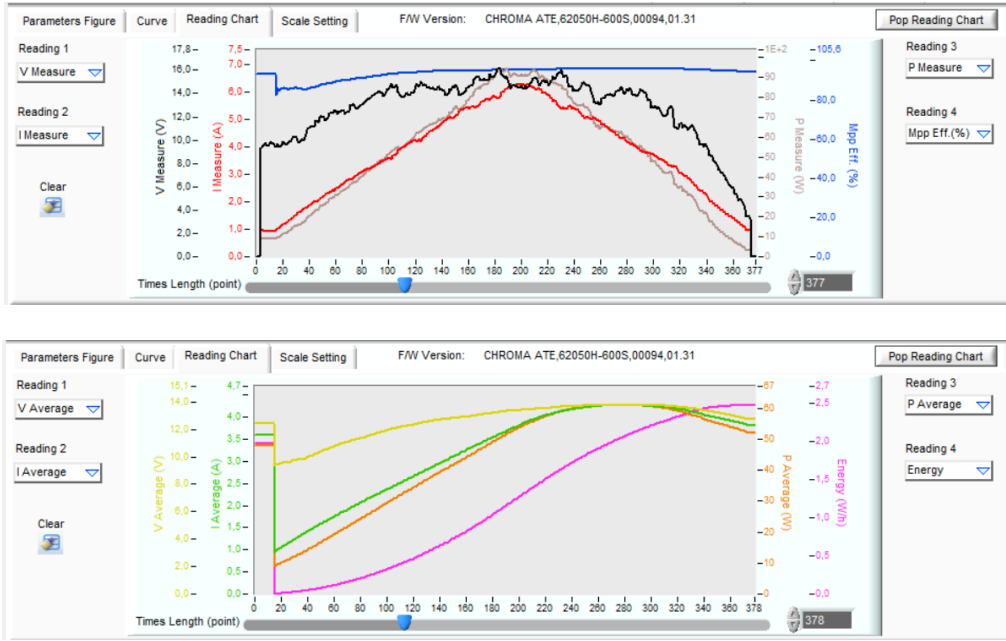
7.2.1 MGNT Uygulama Çalışmaları Ve Sonuçları

Deneysel çalışma yapmak için geliştirilen test düzeneğinde enerji üretim birimi bir PV simülatör kullanılarak oluşturulmuştur. Bu PV simülatörünün yazılımı olan *Chroma Solar Array Simulation Soft Panel* vasıtası ile uygun parametreler girilerek sistemde kullanılan PV panel gibi davranması sağlanmaktadır. Ayrıca bu yazılımın *Dynamic MPPT Test (Dinamik MGNT Testi)* kısmı sayesinde farklı güneşlenme senaryoları için PV panel benzetimleri gerçekleştirilebilmenin yanı sıra dahili MGNT belirleme algoritması sayesinde ilgili senaryo sonunda MGNT başarımları da elde edilebilmektedir.

Tez kapsamında geliştirilen bulanık mantık denetleyicili enerji yönetim algoritması, geliştirilen test düzeneğinde MGNT başarımlarını belirlemek üzere koşturulmuştur. Burada ilgili parametreler bir adet PV panel kullanılacak şekilde; maksimum güçteki gerilim – V_{mp} , 17,2V, maksimum güç noktasındaki güç – P_{mpp} , 100W, doldurma faktörü – FF , 0,68 olarak belirlenmiştir. Güneşlenme senaryosu ise güneşlenme değeri $100W/m^2$ 'den $1000W/m^2$ 'ye ve tekrar $100W/m^2$ 'ye olacak şekilde; başlangıç ayarları için 5sn., belirlenen azami güneşlenme değerine yükselme için 80sn., bu değerde kalma için 30sn., belirlenen asgari güneşlenme değerine düşme için 80sn. ve bu değerde kalma için 1sn. olacak şekilde toplam 3dk. 16sn. süreli olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda, bu senaryo süresince elde edilen enerji üretimi birimi akım (kırmızı), gerilim (siyah), güç (gri), MGNT başarımları (mavi) ve enerji (pembe) değerleri ve senaryo sonunda elde edilen MGNT başarımları Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'te verilmiştir.



Şekil 7.3. Bulanık Mantık Denetleyicili Enerji Yönetim Algoritması MGNT Başarım Oranı



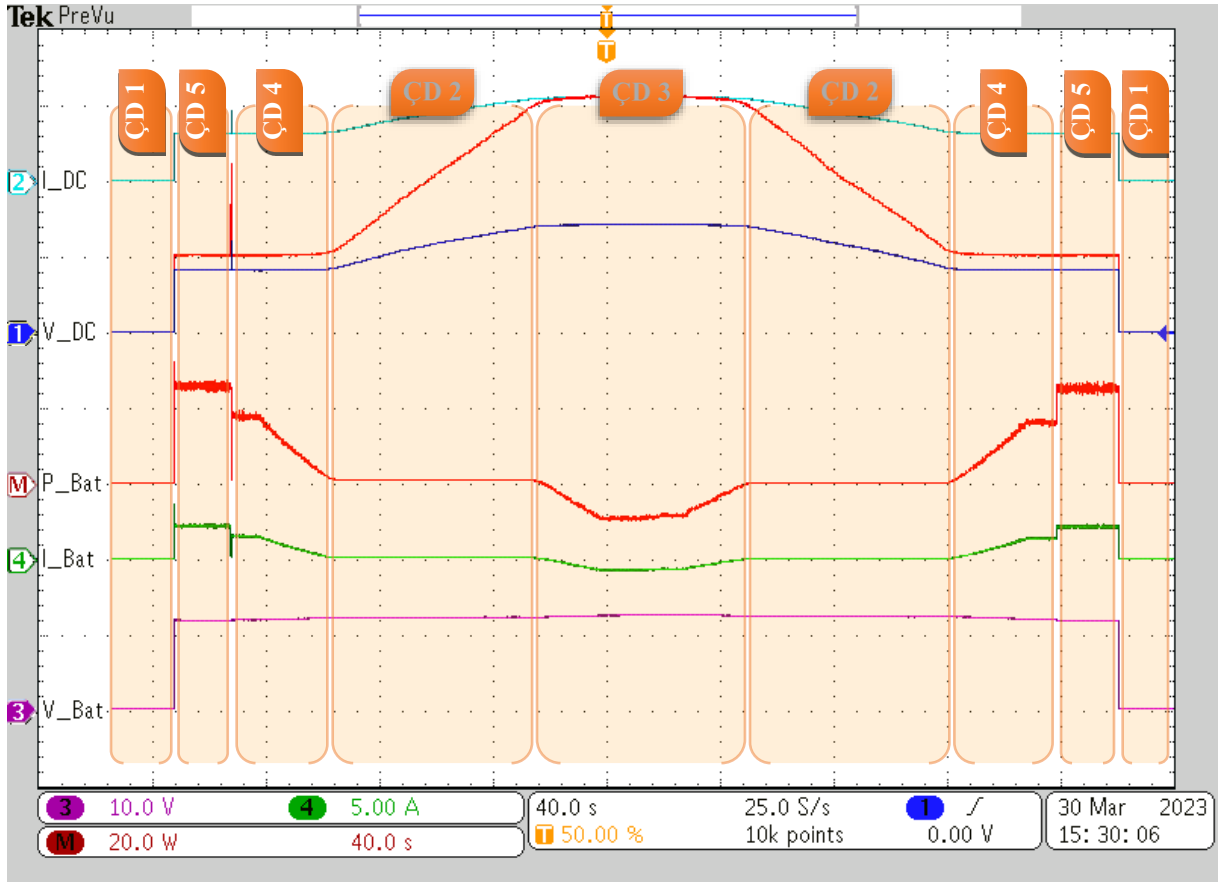
Şekil 7.4. Enerji Üretim Birimi Akım (Kırmızı), Gerilim (Siyah), Güç (Gri), MGNT Başarım Oranı (Mavi) ve Enerji (Pembe) Değerleri

Sonuçlara göre, geliştirilen bulanık mantık denetleyicili enerji yönetim algoritmasının MGNT başarım oranı, tipik bir günlük güneşlenme değişiminin oldukça agresif bir zaman aralığında benzetimi ile oluşturulan senaryosuna karşılık, PV simülatörü yazılımı tarafından %98,7 olarak belirlenmiştir.

7.2.2 Enerji Yönetim Sistemi Uygulama Çalışmaları Ve Sonuçları

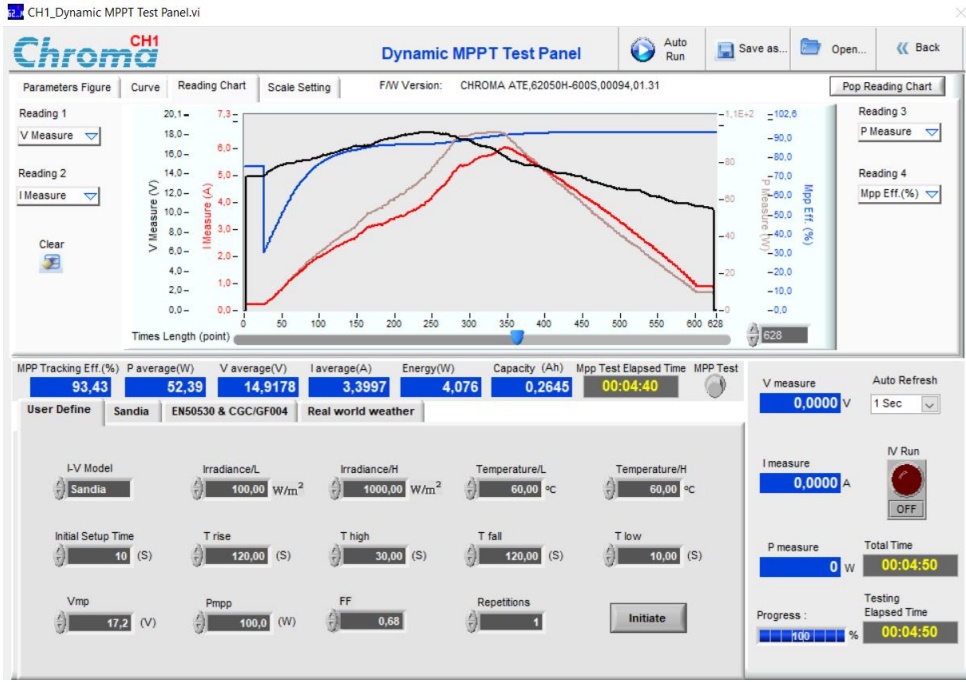
Tez kapsamında geliştirilen bulanık mantık denetleyicili enerji yönetim algoritması, geliştirilen test düzeneğinde enerji depolama ve destek birimini de içerecek şekilde enerji yönetim sistemini denetlemek üzere koşturulmuştur. Burada ilgili parametreler bir adet PV panel kullanılacak şekilde; maksimum güçteki gerilim – V_{mpp} , 17,2V, maksimum güç noktasındaki güç – P_{mpp} , 100W, doldurma faktörü – FF , 0,68 olarak belirlenmiştir. Güneşlenme senaryosu ise güneşlenme değeri $100W/m^2$ 'den $1000W/m^2$ 'ye ve tekrar $100W/m^2$ 'ye olacak şekilde; başlangıç ayarları için 10sn., belirlenen azami güneşlenme değerine yükselme için 120sn., bu değerde kalma için 30sn., belirlenen asgari güneşlenme değerine düşme için 120sn. ve bu değerde kalma için 10sn. olacak şekilde toplam 4dk. 50sn. süreli olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda, bu senaryo süresince elde edilen DC bara gerilimi (mavi), akımı (turkuaz) ve gücü (kırmızı) ve batarya gerilimi (mor), akımı (yeşil) ve gücü (kırmızı) Şekil 7.5'te verilmiştir.

Burada aynı zamanda daha önce belirlenen enerji yönetim sistemi çalışma durumlarındaki değişim de görülmektedir. Buna göre, ilk anda enerji üretim birimi ile depolama ve destek biriminin devrede olmadığı, yükün beslenemediği Çalışma Durumu (ÇD) 1 ile başlanmış, daha sonra enerji depolama ve destek biriminin (deşarj durumunda) devreye girmesi ile birlikte yükün yalnızca batarya ile beslendiği ÇD 5'e geçilmiştir. Daha sonra enerji üretimi biriminin de devreye girmesi ile birlikte yükün PV panel ve batarya ile birlikte beslendiği ÇD 4'e geçilmiştir. Bu durumda senaryo gereği güneşlenme gittikçe artmakta dolayısı ile enerji üretimi birimi giderek daha fazla güç üretmekte böylelikle enerji depolama ve destek birimi giderek devreden çıkmaktadır. Enerji üretim birimi 20W olarak belirlenen referans asgari DC bara gücünü tek başına sağlayacak miktarda bir güneşlenme değerine ulaşıldığında enerji depolama ve destek biriminin devrede olmadığı, yükün yalnızca PV panel ile beslendiği ÇD 2'ye geçilmiştir. Giderek artan güneşlenme miktarı doğrultusunda enerji üretim birimi 60W olarak belirlenen referans azami DC bara gücünü tek başına sağlayacak güce ulaştığında ise yükün yalnızca PV panel ile beslendiği aynı zamanda enerji üretimi biriminin fazla üretilen gücü enerji depolama ve destek birimine aktardığı (şarj durumu) ÇD 3'e geçilmiştir. Daha sonra senaryo gereği azalma eğilimine giren güneşlenme miktarı doğrultusunda önce ÇD 2'ye daha sonra ÇD 4, enerji üretimi biriminin devreden çıkması ile ÇD 5 ve enerji depolama ve destek biriminin de devreden çıkması ile ÇD 1'e tekrar dönüş gerçekleşmektedir.



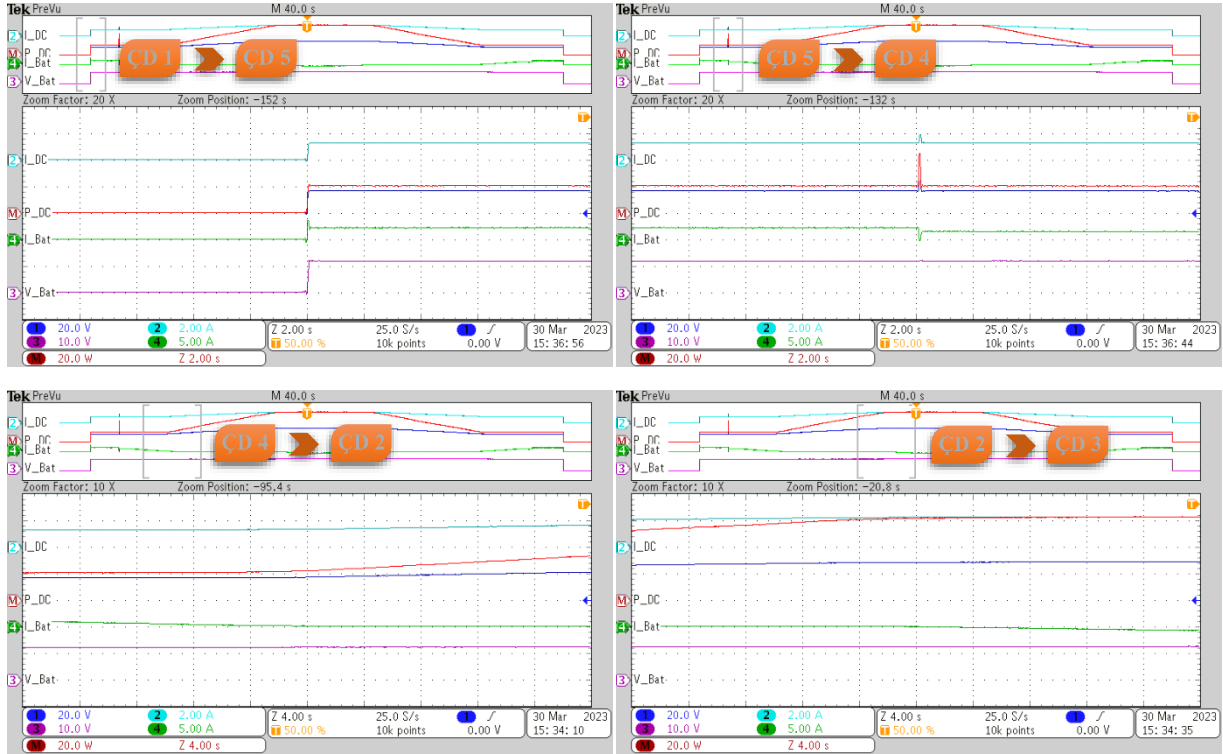
Şekil 7.5. Elde Edilen DC Bara Gerilimi (Mavi), Akımı (Turkuaz) ve Gücü (Kırmızı) ve Batarya Gerilimi (Mor), Akımı (Yeşil) ve Gücü (Kırmızı) (100Ω için)

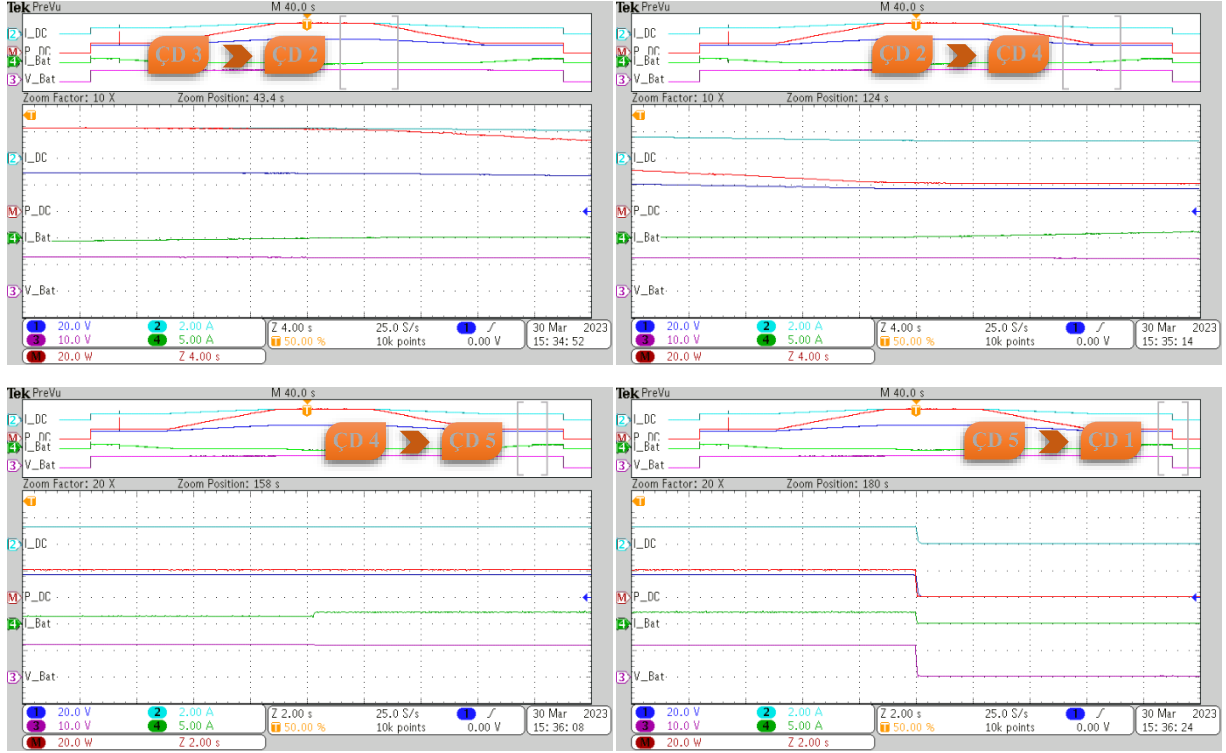
Ayrıca bu senaryo süresince elde edilen enerji üretimi birimi akım (kırmızı), gerilim (siyah), güç (gri), ve MGNT başarım oranı (mavi) değerleri ve senaryo sonunda elde edilen MGNT başarım oranı Şekil 7.6'da verilmiştir.



Şekil 7.6. Enerji Üretimi Birimi Akım (Kırmızı), Gerilim (Siyah), Güç (Gri), ve MGNT Başarım Oranı (Mavi) ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (100Ω için)

Senaryo süresince çalışma durumlarının geçişleri esnasındaki DC bara gerilimi (mavi), akımı (turkuaz), gücü (kırmızı), batarya gerilimi (mor) ve akımı (yeşil) büyütülmüş olarak Şekil 7.7’de verilmiştir.

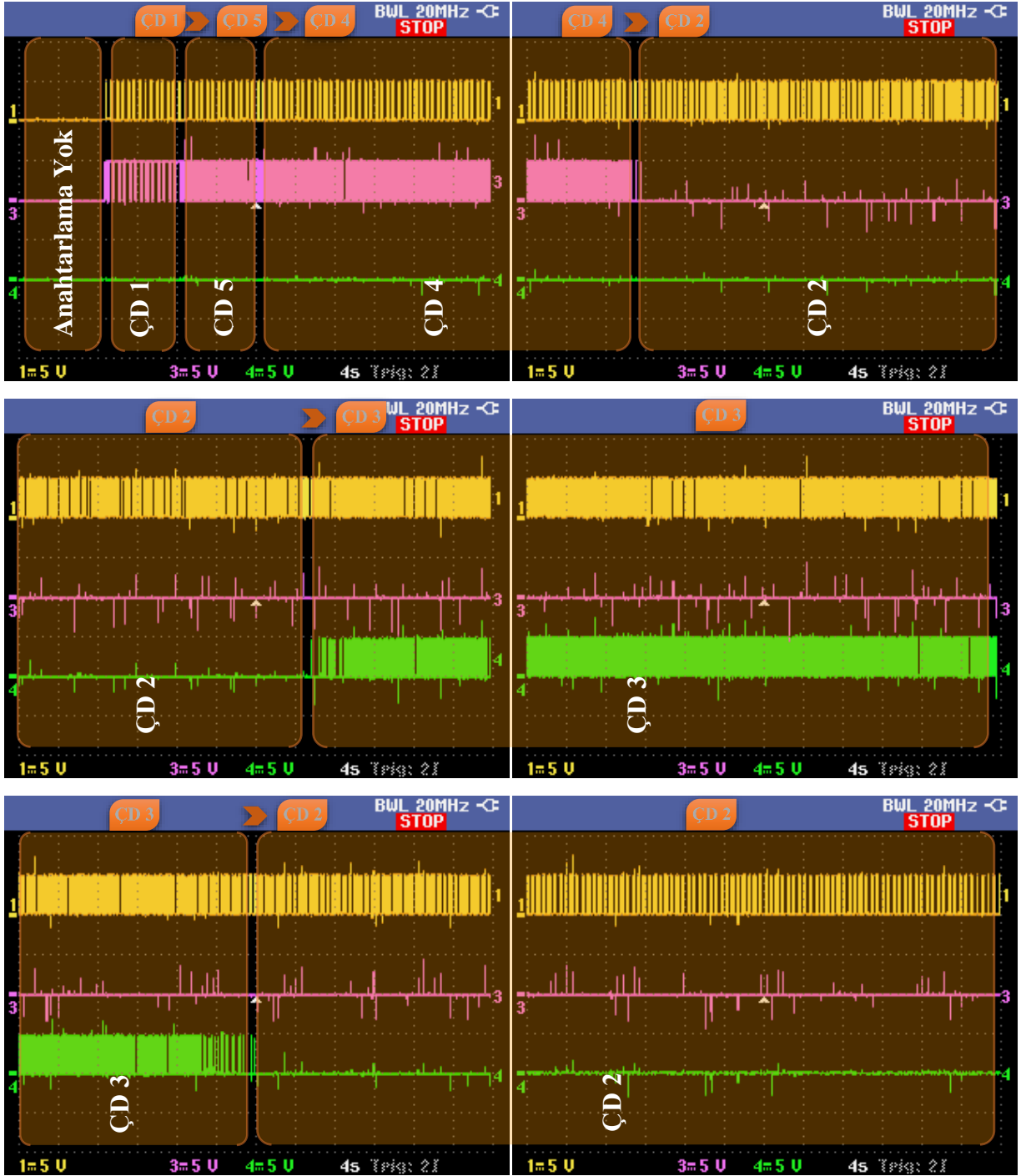


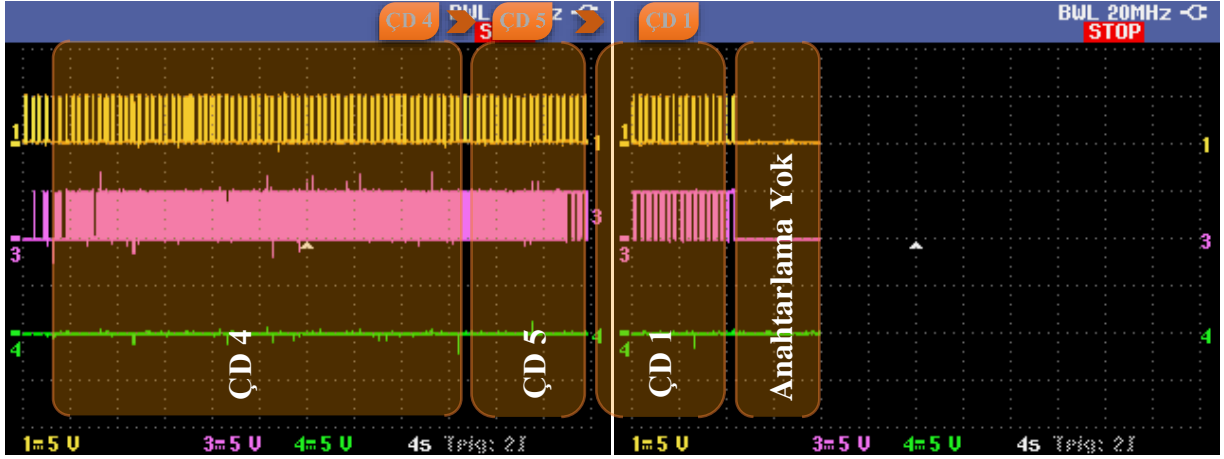


Şekil 7.7. Çalışma Durumlarının Geçiş Anları (Büyütülmüş Olarak – 100Ω için)

Senaryo süresince enerji üretimi birimi ve enerji depolama ve destek birimi anahtarlama sinyallerinin değişimi Şekil 7.8’de verilmiştir. Burada, geliştirilen bulanık mantık denetleyicili enerji yönetim algoritması tarafından enerji üretimi birimi yükseltici (alt) anahtarı için üretilen anahtarlama sinyalinin değişimi sarı eğride, enerji depolama ve destek birimi yükseltici (alt) ve düşürücü (üst) anahtarları için üretilen anahtarlama sinyallerinin değişimi de sırası ile mor ve yeşil eğrilerde görülmektedir. Buna göre, başlangıçta enerji yönetim sistemi kapalı iken daha sonra sistem açılmakta ve ÇD 1’e geçilmektedir. Bu durumda enerji üretimi birimi ve enerji depolama ve destek biriminin her ikisinin de yükseltici (alt) anahtarı yükü besleyebilmek için anahtarlansmaktadır. Daha sonra ÇD 2’ye geçilmesi ile birlikte enerji depolama ve destek birimi (deşarj durumunda) yükseltici anahtarının anahtarlama sinyalinin, doluluk oranının 20W referans asgari DC bara gücünü sağlayabilecek şekilde değişmesi ile birlikte değiştiği görülmektedir. Işınım miktarının artması ile birlikte enerji üretim biriminin sağlayabildiği güç miktarı 20W’a yaklaşması ve özellikle bu değeri aşması ile birlikte enerji üretimi birimi anahtarlama sinyalinin de değiştiği görülmektedir. Enerji üretim biriminin 20W referans asgari DC bara gücünü tek başına sağlayabilmesi ile birlikte enerji depolama ve destek birimi devreden çıkmakta ve bu doğrultuda anahtarlama sinyallerinin de kesildiği görülmektedir. Işınım miktarının artması ile birlikte enerji depolama ve destek biriminin düşürücü (üst) anahtarı anahtarlama sinyalinin enerji üretim birimi tarafından 60W referans azami DC bara

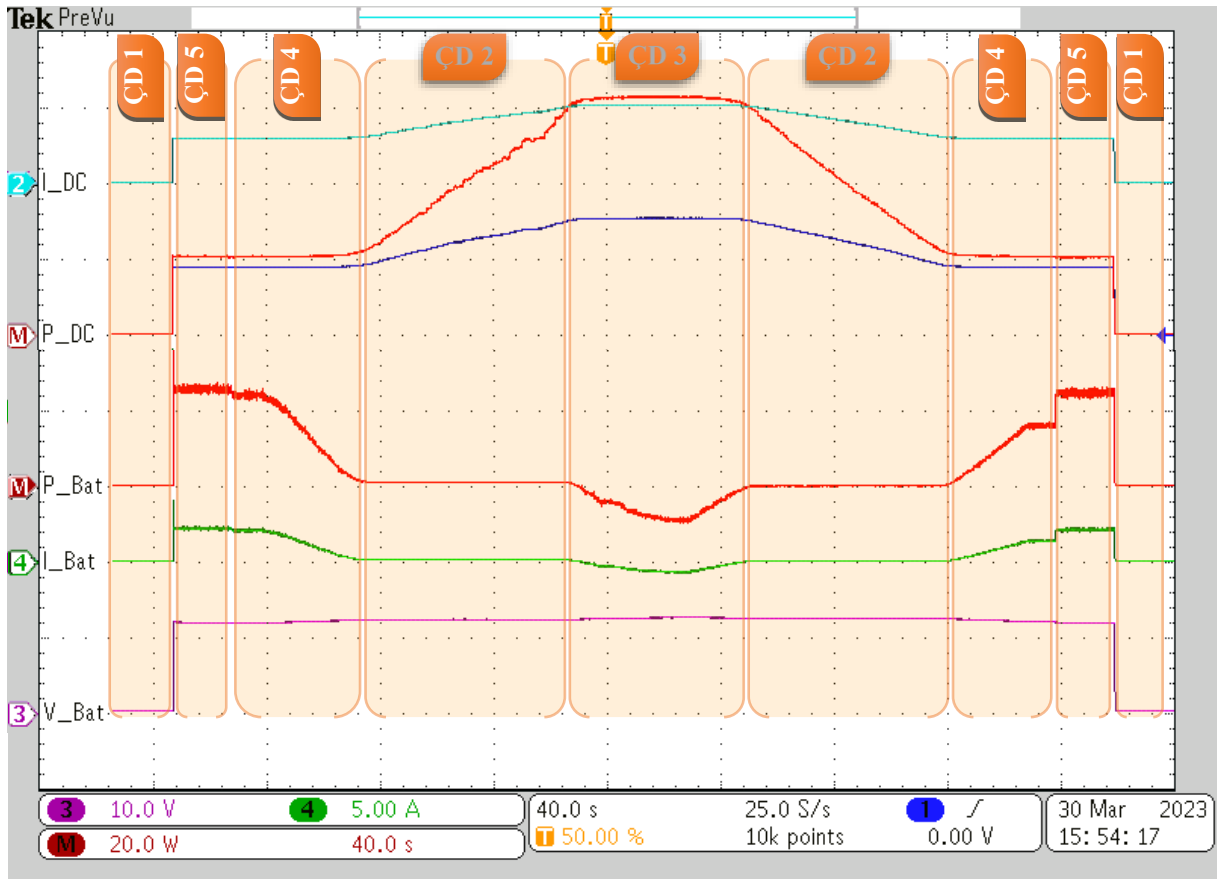
gücü üzerinde üretilen tüm fazla gücü, enerji depolama ve destek birimine aktaracak şekilde değiştiği görülmektedir. Daha sonra senaryo gereği azalma eğilimine giren güneşlenme miktarı doğrultusunda önce ÇD 2'ye daha sonra ÇD 4, enerji üretimi biriminin devreden çıkması ile ÇD 5 ve enerji depolama ve destek biriminin de devreden çıkması ile ÇD 1'e tekrar dönüş gerçekleşmekte ve ilgili anahtarlama sinyalleri de bu doğrultuda değişim göstermektedir.



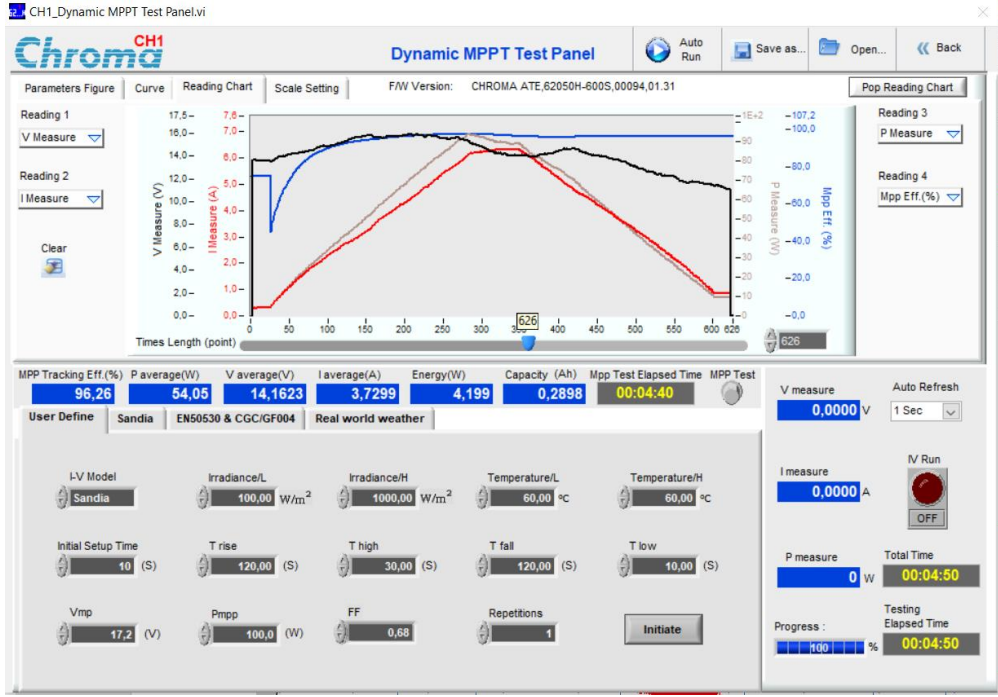


Şekil 7.8. Enerji Üretimi Birimi ve Enerji Depolama ve Destek Birimi Anahtarlama Sinyallerinin Değişimi (100Ω için)

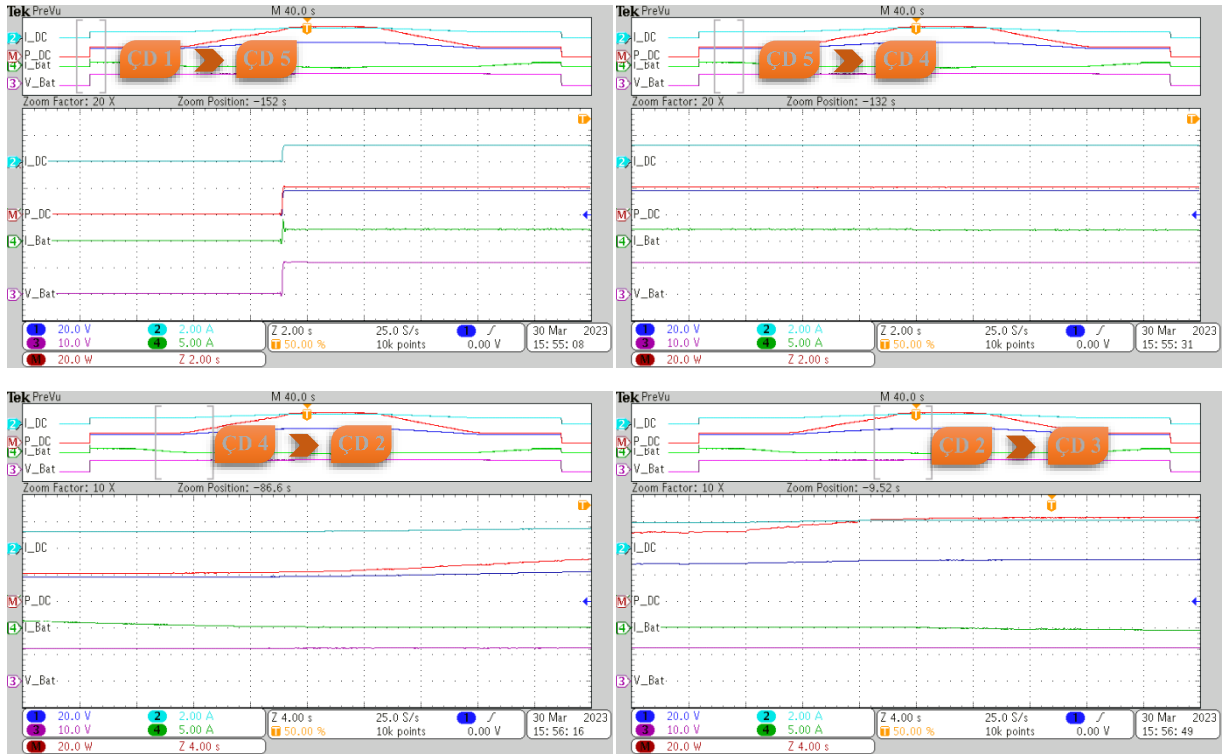
Aynı senaryo, test düzeneğinde yük 100Ω'dan 50Ω'a düşürülerek tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 7.9 – Şekil 7.11'de verilmiştir.

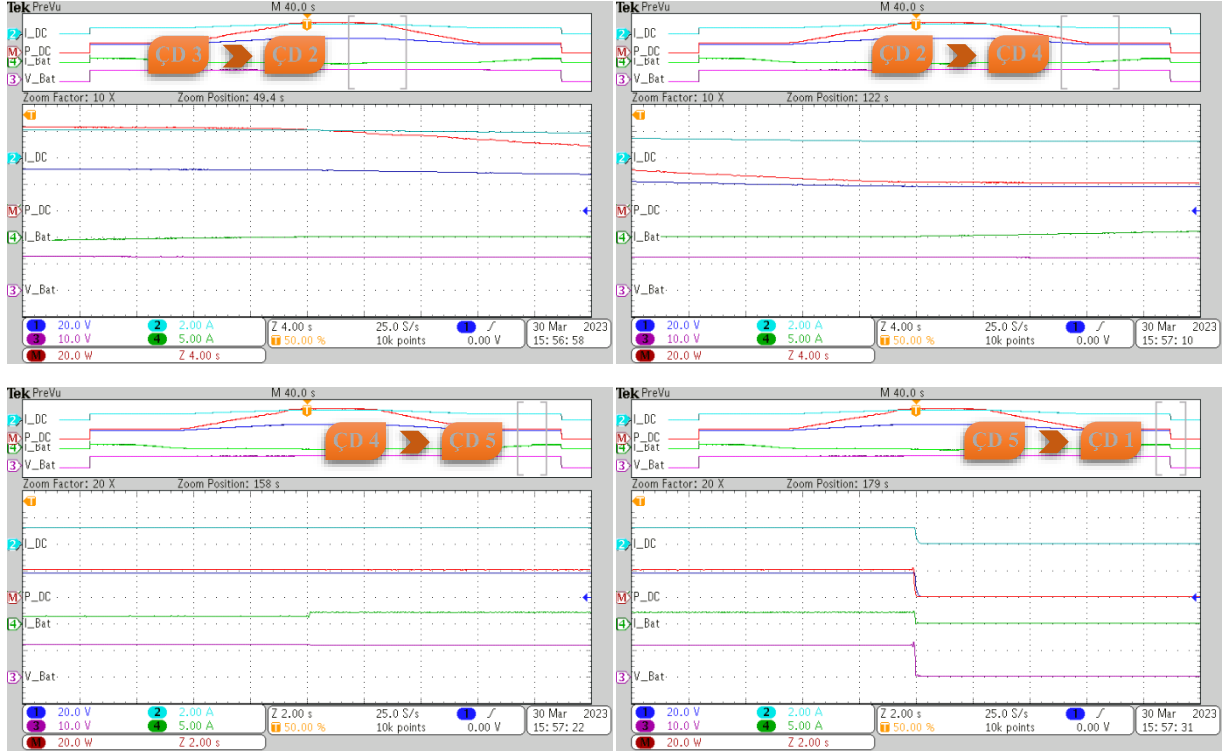


Şekil 7.9. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (50Ω için)



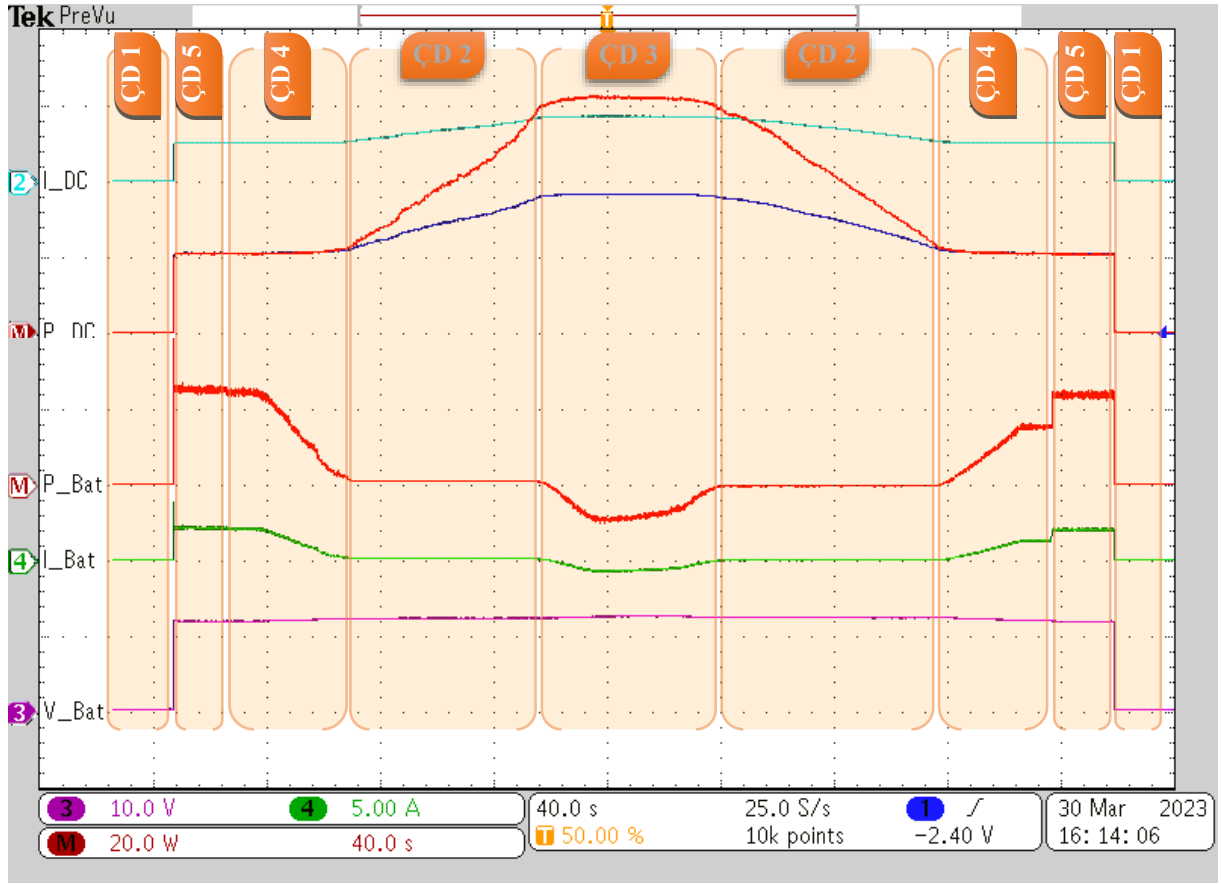
Şekil 7.10. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (50Ω için)



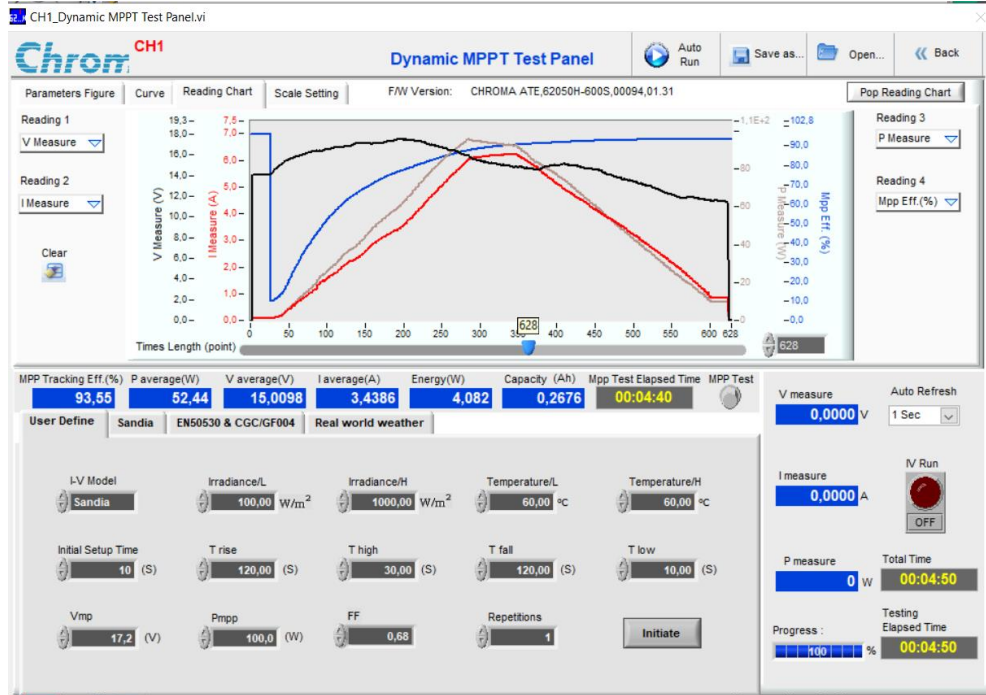


Şekil 7.11. Çalışma Durumlarının Geçiş Anları (Büyütülmüş Olarak – 50Ω için)

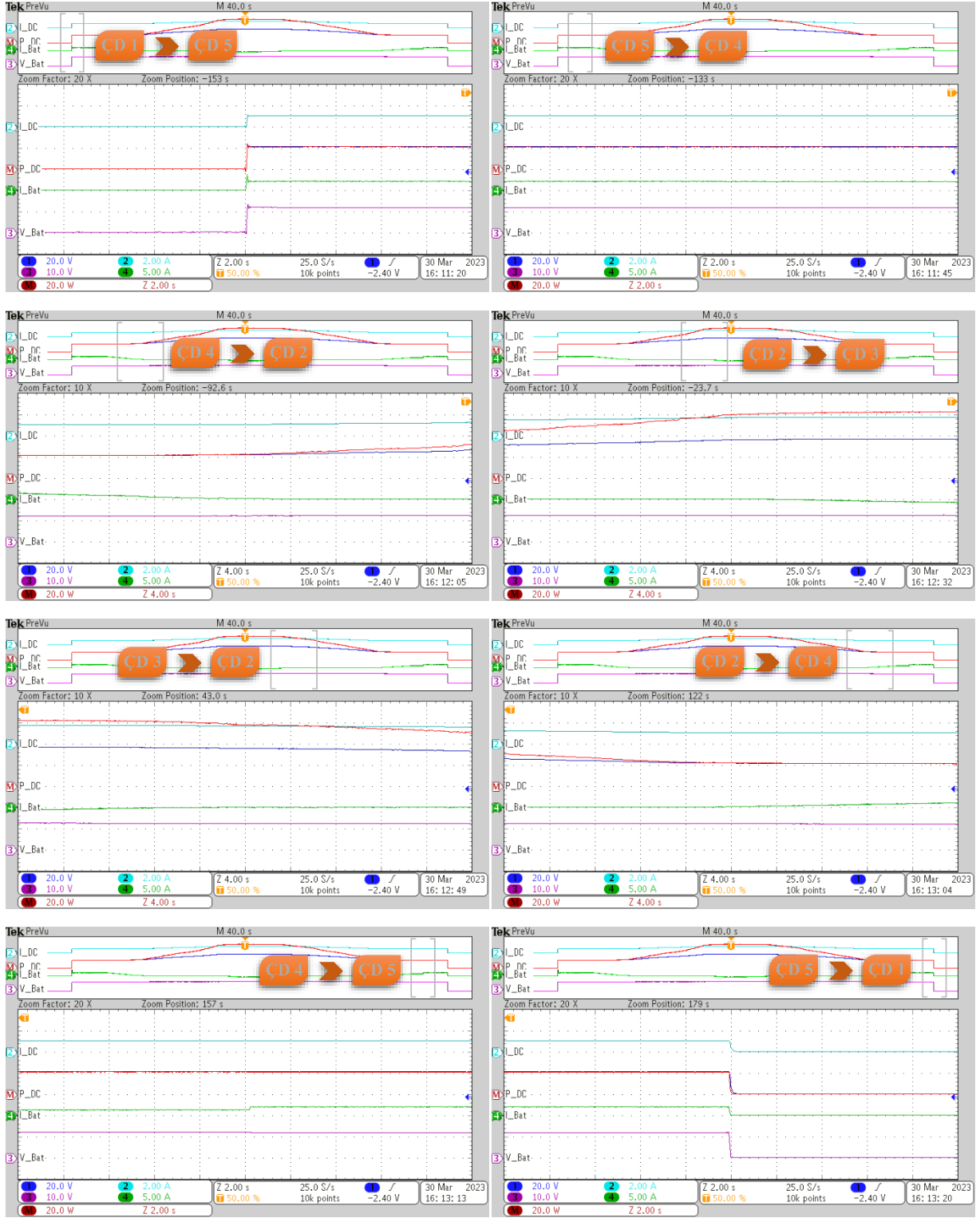
Aynı senaryo, test düzeneğinde yük 50Ω'dan 25Ω'a düşürülerek tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 7.12 – Şekil 7.14'te verilmiştir.



Şekil 7.12. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (25Ω için)



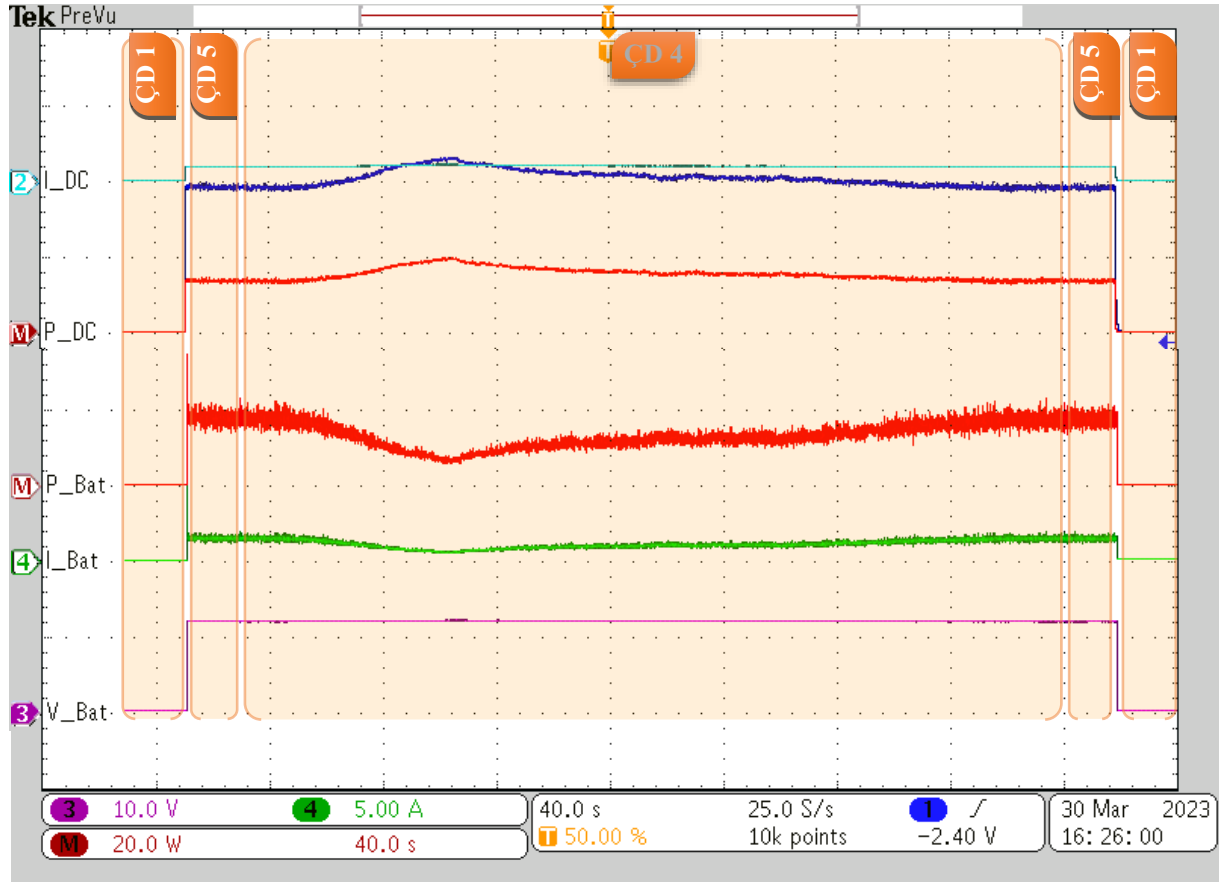
Şekil 7.13. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (25Ω için)



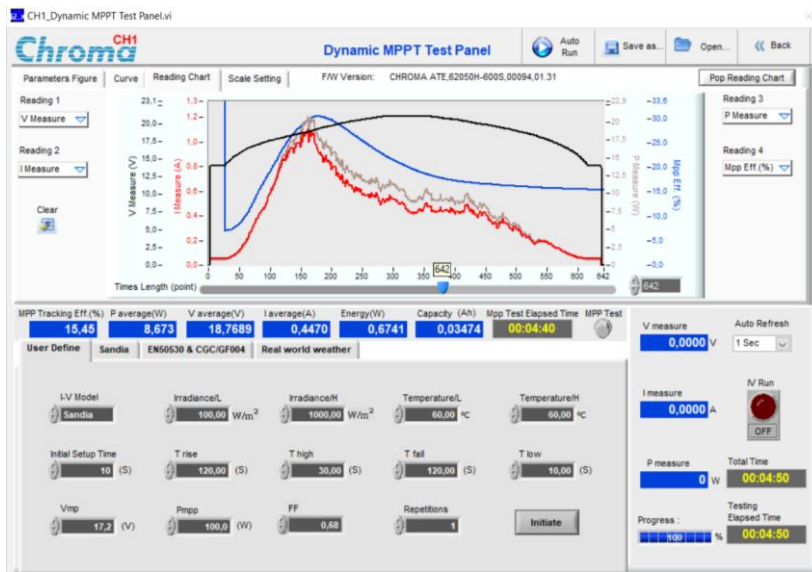
Şekil 7.14. Çalışma Durumlarının Geçiş Anları (Büyütülmüş Olarak – 25Ω için)

Aynı senaryo, test düzeneğinde yük 25Ω'dan 13Ω'a düşürülerek tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'da verilmiştir. Burada diğer yük testlerden farklı olarak yükün 13Ω gibi oldukça düşük bir değerde olması nedeni ile 20W referans asgari DC bara gücü enerji üretimi birimi tarafından tek başına hiç sağlanamamakta ve sistem çalışma durumu, ÇD

4'ten ÇD 2'ye geçememektedir. Bu yük değerinde, bulanık mantık denetleyicili enerji algoritmasının MGNT başarım oranının da oldukça düştüğü görülmektedir.

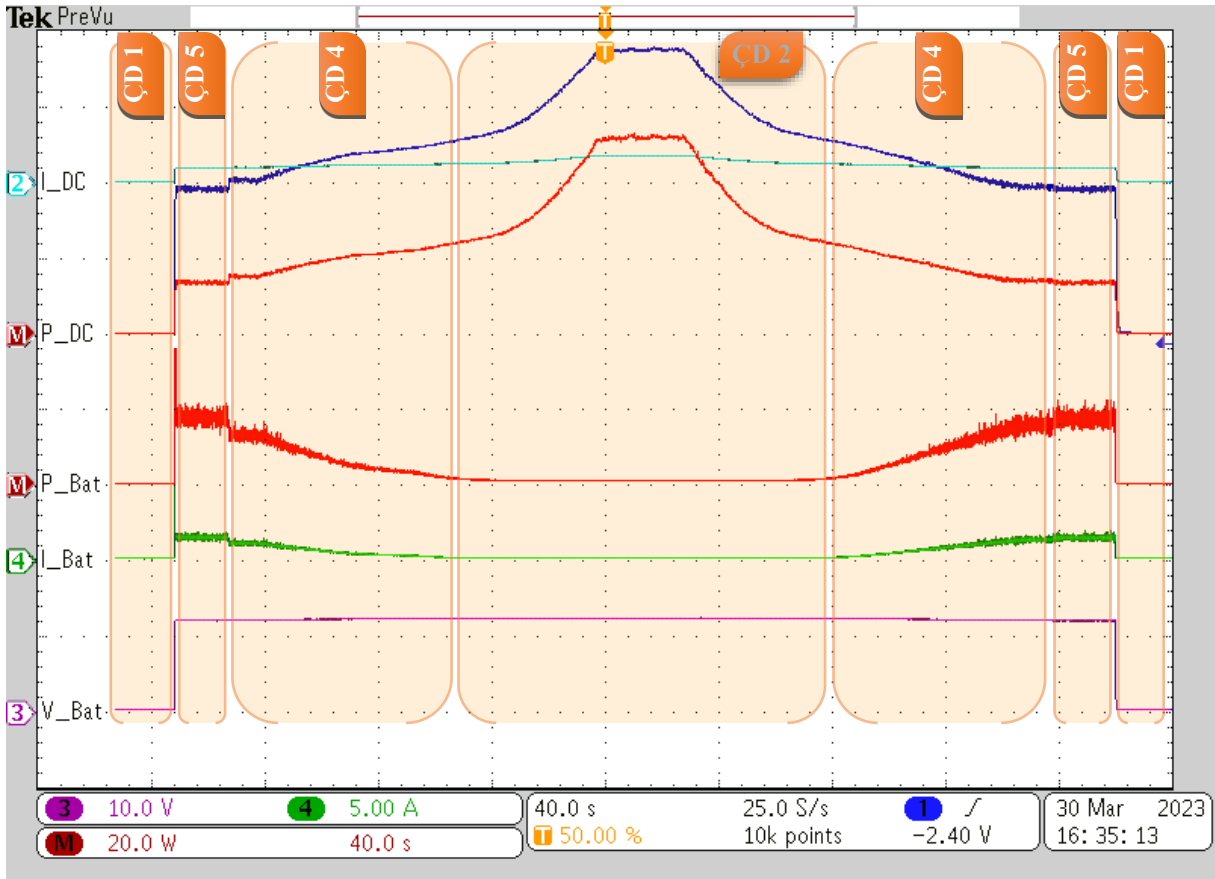


Şekil 7.15. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (13Ω için)

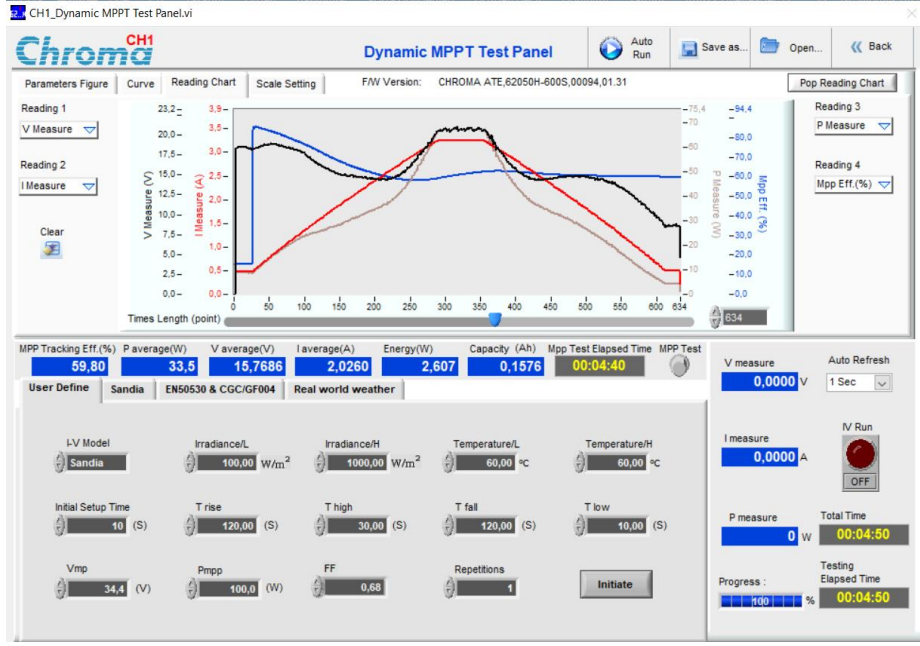


Şekil 7.16. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (13Ω için)

Aynı senaryo, test düzeneğinde yük 13Ω iken iki adet PV panel seri bağlanması ile çıkış gerilimi artırılarak tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 7.17 ve Şekil 7.18’de verilmiştir. Buna göre iki adet PV panel seri bağlandığında enerji üretimi biriminin sağlayabileceği gerilim miktarı artmış (17,2V’tan 34,4V’a) dolayısı ile bir önceki yük testinde hiç geçilemeyen ÇD 2’ye geçilebilmiştir. Fakat bu sefer de 60W referans azami DC bara gücü sağlanamadığı için diğer yük değerlerindeki testlerde ulaşılan ÇD 3 sistem çalışma durumuna hiç ulaşamamıştır.

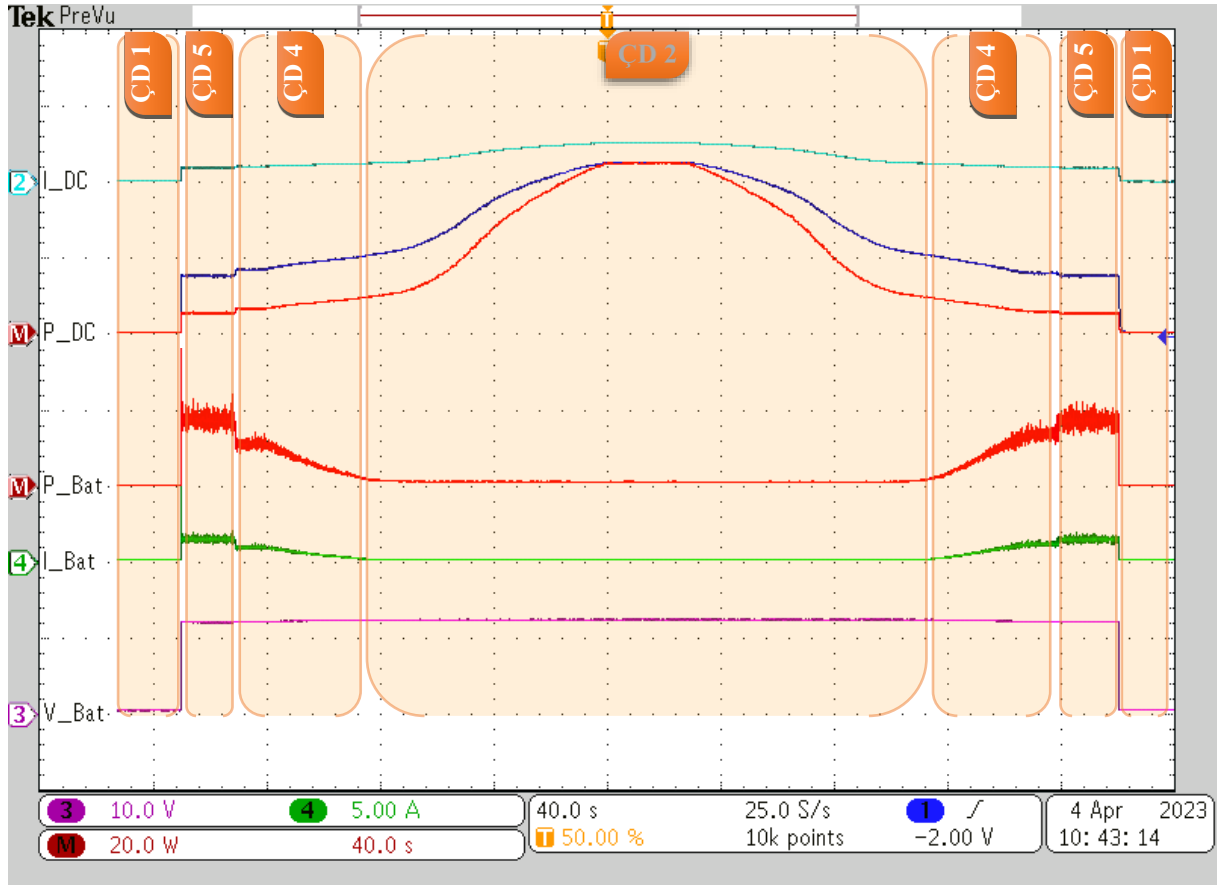


Şekil 7.17. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (13Ω için – 2 PV Panel Seri Bağlı 34,4V, 100W)

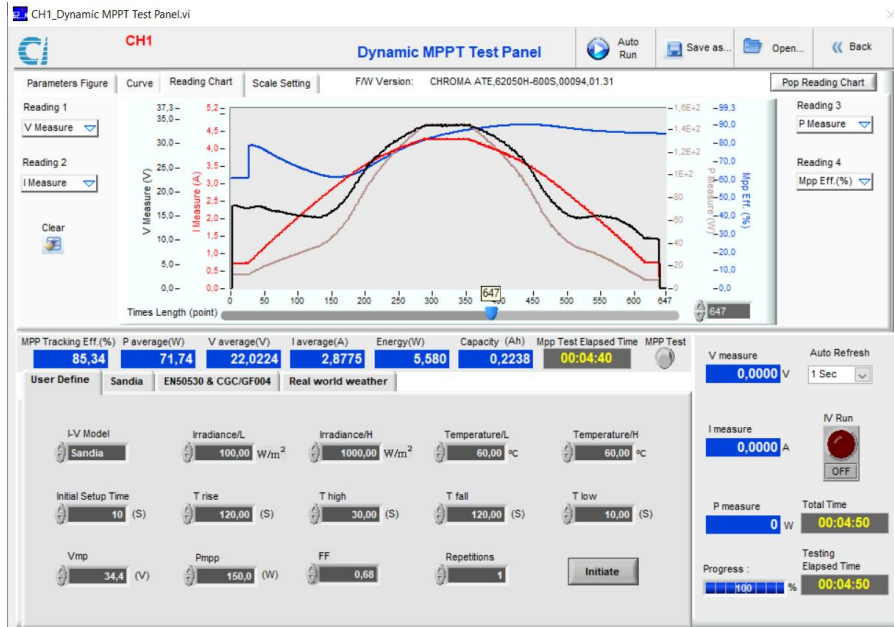


Şekil 7.18. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (13Ω için – 2 PV Panel Seri Bağlı 34,4V, 100W)

Aynı senaryo, test düzeneğinde yük yine 13Ω iken iki adet PV panel seri ve paralel bağlanması ile çıkış gerilimi ve gücü artırılarak tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 7.19 ve Şekil 7.20’de verilmiştir. Burada ise PV paneller seri ve paralel bağlandığında enerji üretimi biriminin sağlayabileceği gerilim ve akım dolayısı ile de güç miktarı artmıştır (gerilim 17,2V’tan 34,4V’a, güç 100W’tan 150W’a). Böylelikle, bir önceki yük testine kıyasla ÇD 2’ye nispeten daha kısa bir sürede geçilebilmiş böylelikle daha uzun süre bu durumda kalınabilmektedir. Fakat bu sefer de yine 60W referans azami DC bara gücü sağlanamadığı için diğer yük değerlerindeki testlerde ulaşılan ÇD 3 sistem çalışma durumuna hiç ulaşamamıştır.



Şekil 7.19. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (13Ω için – 2 PV Panel Seri ve Paralel Bağlı 34,4V, 150W)

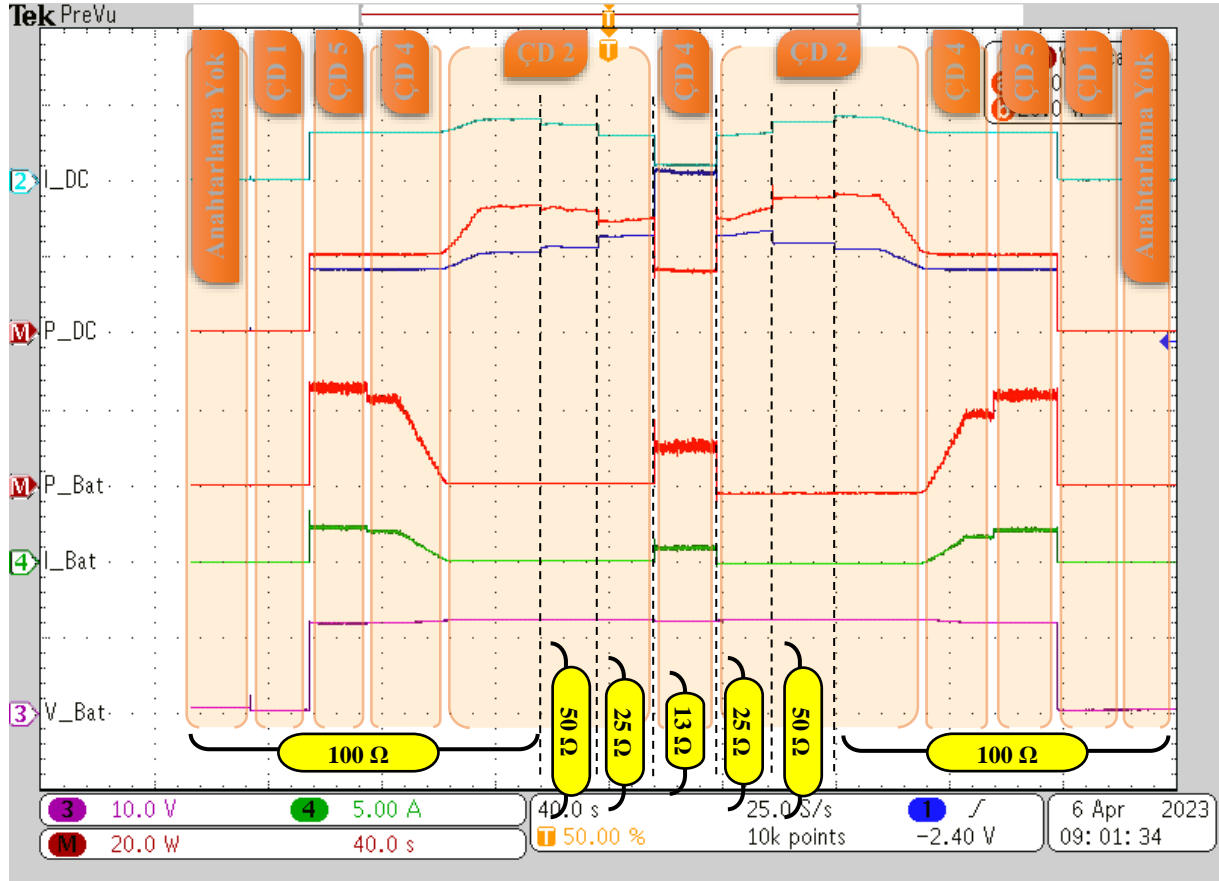


Şekil 7.20. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (13Ω için – 2 PV Panel Seri ve Paralel Bağlı 34,4V, 150W)

Tez kapsamında geliştirilen bulanık mantık denetleyicili enerji yönetim algoritmasının, geliştirilen test düzeneğinde aynı senaryodaki farklı yük durumlarına verdiği cevaplar da incelenmiştir. Burada ilgili parametreler bir adet PV panel kullanılacak şekilde; maksimum güçteki gerilim – V_{mp} , 17,2V, maksimum güç noktasındaki güç – P_{mpp} , 100W, doldurma faktörü – FF , 0,68 olarak belirlenmiştir. Güneşlenme senaryosu ise güneşlenme değeri $100W/m^2$ 'den $500W/m^2$ 'ye ve tekrar $100W/m^2$ 'ye olacak şekilde; başlangıç ayarları için 10sn., belirlenen azami güneşlenme değerine yükselme için 30sn., bu değerde kalma için 140sn., belirlenen asgari güneşlenme değerine düşme için 30sn. ve bu değerde kalma için 10sn. olacak şekilde toplam 3dk. 40sn. süreli olarak belirlenmiştir. Güneşlenme $500W/m^2$ 'ye ulaştığında yük değeri 100Ω 'dan kademeli olarak 50Ω , 25Ω ve 13Ω değerine düşürülmüş sonra tekrar kademeli olarak 13Ω , 25Ω , 50Ω ve 100Ω ' yükseltilmiştir. Bu doğrultuda, bu senaryo süresince elde edilen DC bara gerilimi (mavi), akımı (turkuaz) ve gücü (kırmızı) ve batarya gerilimi (mor), akımı (yeşil) ve gücü (kırmızı) Şekil 7.21'de verilmiştir.

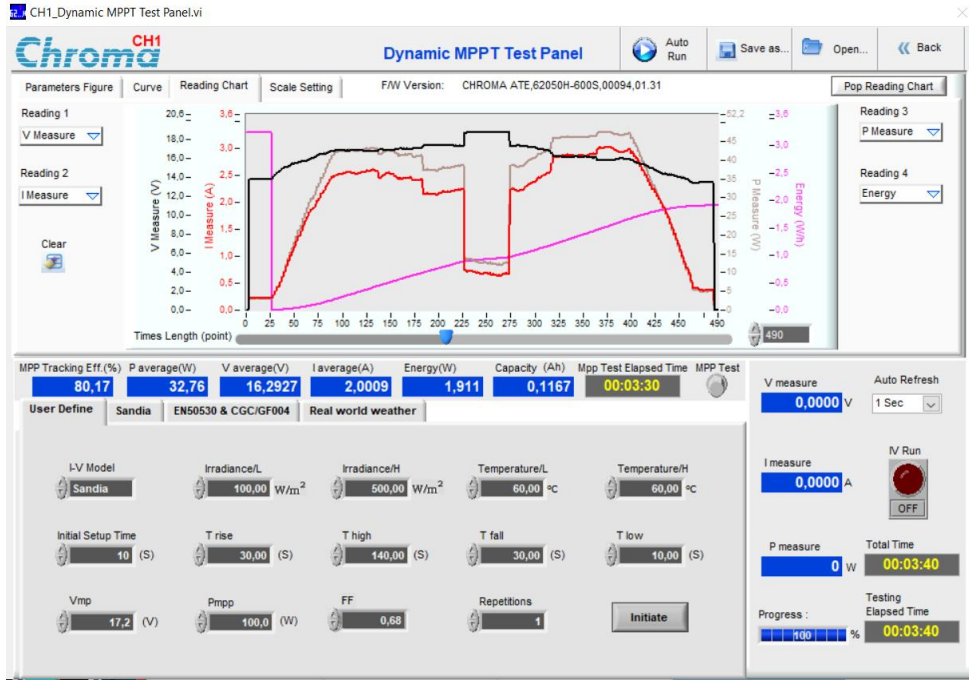
Burada aynı zamanda daha önce belirlenen enerji yönetim sistemi çalışma durumlarındaki değişim de görülmektedir. Buna göre, ilk anda enerji üretim biriminin de depolama ve destek biriminin de devrede olmadığı yükün beslenemediği ÇD 1 ile başlanmış, daha sonra enerji depolama ve destek biriminin (deşarj durumunda – yükseltici tip) devreye girmesi ile birlikte yükün yalnızca batarya ile beslendiği ÇD 5'e geçilmiştir. Daha sonra enerji üretimi biriminin de devreye girmesi ile birlikte yükün PV panel ve batarya ile birlikte beslendiği ÇD 4'e geçilmiştir. Bu durumda senaryo gereği güneşlenme gittikçe artmakta dolayısı ile enerji üretimi birimi giderek daha fazla güç üretmekte böylelikle enerji depolama ve destek birimi giderek devreden çıkmaktadır. Enerji üretim birimi 20W olarak belirlenen referans asgari DC bara gücünü tek başına sağlayacak miktarda bir güneşlenme değerine ulaşıldığında, enerji depolama ve destek biriminin devrede olmadığı yükün yalnızca PV panel ile beslendiği ÇD 2'ye geçilmiştir. Güneşlenme miktarının $500W/m^2$ 'de sabit kalması ile birlikte DC bara gücünün referans güç değerleri aralığında kaldığı görülmektedir. Bu esnada yük değeri 50Ω 'a daha sonra da 25Ω 'a düşürülmekte ve algoritma tarafından değiştirilen doluluk oranı doğrultusunda DC bara gücü hafif bir azalış göstermekle birlikte yine referans aralıkta kalmakta ve sistem ÇD 2 de çalışmaya devam etmektedir. Yük değeri 13Ω 'a düşürüldüğünde ise enerji üretimi birimi, belirlenen referans asgari DC bara gücü sağlayamadığından enerji depolama ve destek birimi (deşarj durumunda – yükseltici tip) devreye girerek gerekli ek gücü sağlamakta ve DC bara gücü 20W değerine ulaştırılmaktadır. Bu süreçte sistem çalışma durumu da ÇD 4'te olacak şekilde değiştirilmektedir. Daha sonra

yük değeri tekrar 25Ω, 50Ω ve 100Ω' yükseltildiğinde enerji üretim birimi yükü tekrar tek başına besleyebilir duruma gelmekte ve bu doğrultuda sistem ÇD 2'ye dönmektedir. Daha sonra senaryo gereği azalma eğilimine giren güneşlenme miktarı doğrultusunda önce ÇD 4, enerji üretimi biriminin devreden çıkması ile ÇD 5 ve enerji depolama ve destek biriminin de devreden çıkması ile ÇD 1'e tekrar dönüş gerçekleşmektedir.



Şekil 7.21. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (500W/m² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin)

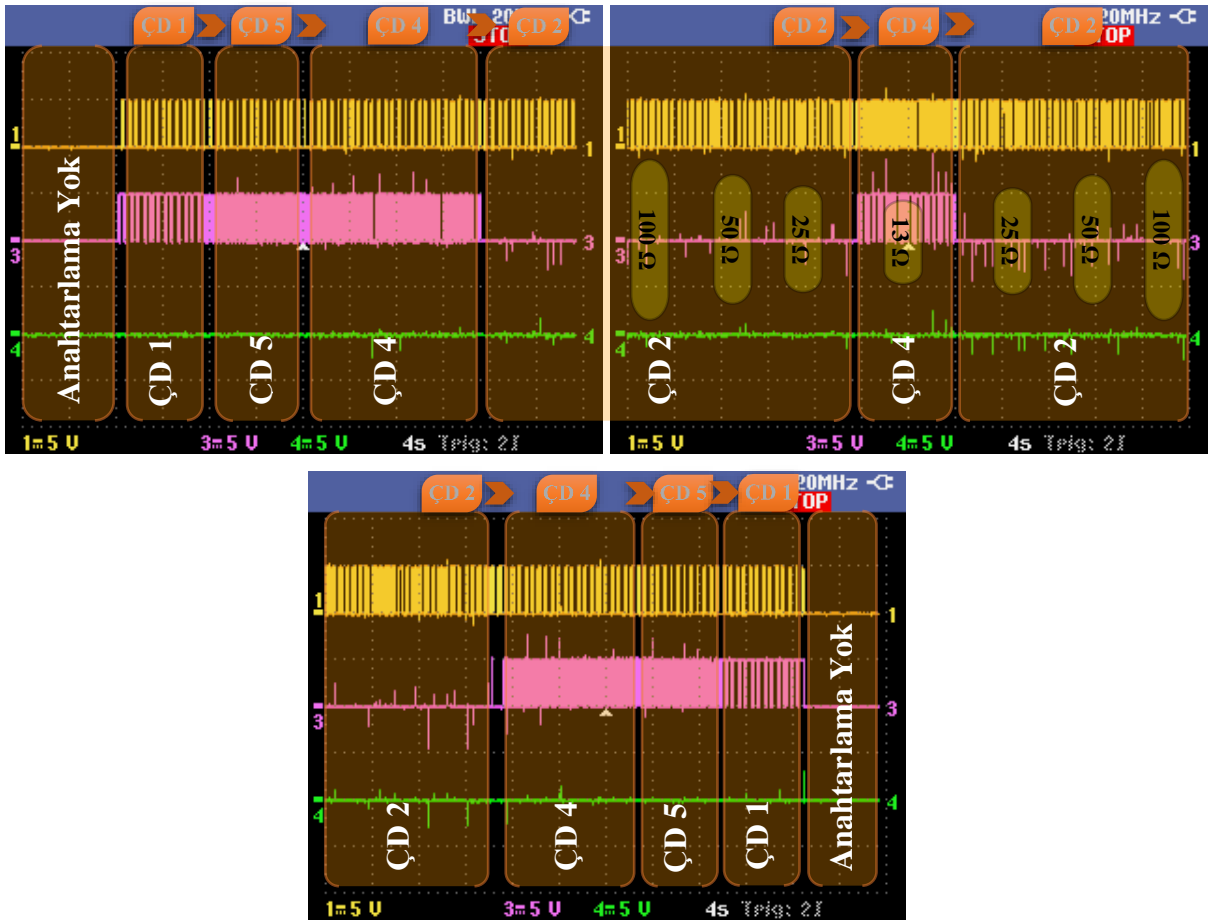
Ayrıca bu senaryo süresince elde edilen enerji üretimi birimi akım (kırmızı), gerilim (siyah), güç (gri), ve MGNT başarım oranı (mavi) değerleri ve senaryo sonunda elde edilen MGNT başarım oranı Şekil 7.22'de verilmiştir.



Şekil 7.22. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (500W/m² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin)

Senaryo süresince enerji üretimi birimi ve enerji depolama ve destek birimi anahtarlama sinyallerinin değişimi Şekil 7.23'te verilmiştir. Burada, geliştirilen bulanık mantık denetleyicili enerji yönetim algoritması tarafından enerji üretimi birimi yükseltici (alt) anahtarı için üretilen anahtarlama sinyalinin değişimi sarı eğride, enerji depolama ve destek birimi yükseltici (alt) ve düşürücü (üst) anahtarları için üretilen anahtarlama sinyallerinin değişimi de sırası ile mor ve yeşil eğrilerde görülmektedir. Buna göre, başlangıçta enerji yönetim sistemi kapalı iken daha sonra sistem açılmakta ve ÇD 1'e geçilmektedir. Bu durumda enerji üretimi birimi ve enerji depolama ve destek biriminin her ikisinin de yükseltici (alt) anahtarı yükü besleyebilmek için anahtarlanmaktadır. Daha sonra ÇD 2'ye geçilmesi ile birlikte enerji depolama ve destek birimi (deşarj durumu – yükseltici tip) yükseltici anahtarının anahtarlama sinyalinin doluluk oranının belirlenen referans asgari DC bara gücü sağlayabileceği şekilde değişmesi ile birlikte değiştiği görülmektedir. Işınım miktarının artması ile birlikte enerji üretim biriminin sağlayabildiği güç miktarı 20W'a yaklaşması ve özellikle bu değeri aşması ile birlikte enerji üretimi birimi anahtarlama sinyalinin de değiştiği görülmektedir. Enerji üretim biriminin 20W referans asgari DC bara gücünü tek başına sağlayabilmesi ile birlikte enerji depolama ve destek birimi devreden çıkmakta ve bu doğrultuda anahtarlama sinyallerinin de kesildiği görülmektedir. Işınım miktarı 500W/m²'de sabit iken yük değeri 100Ω'dan kademeli olarak 13Ω'a

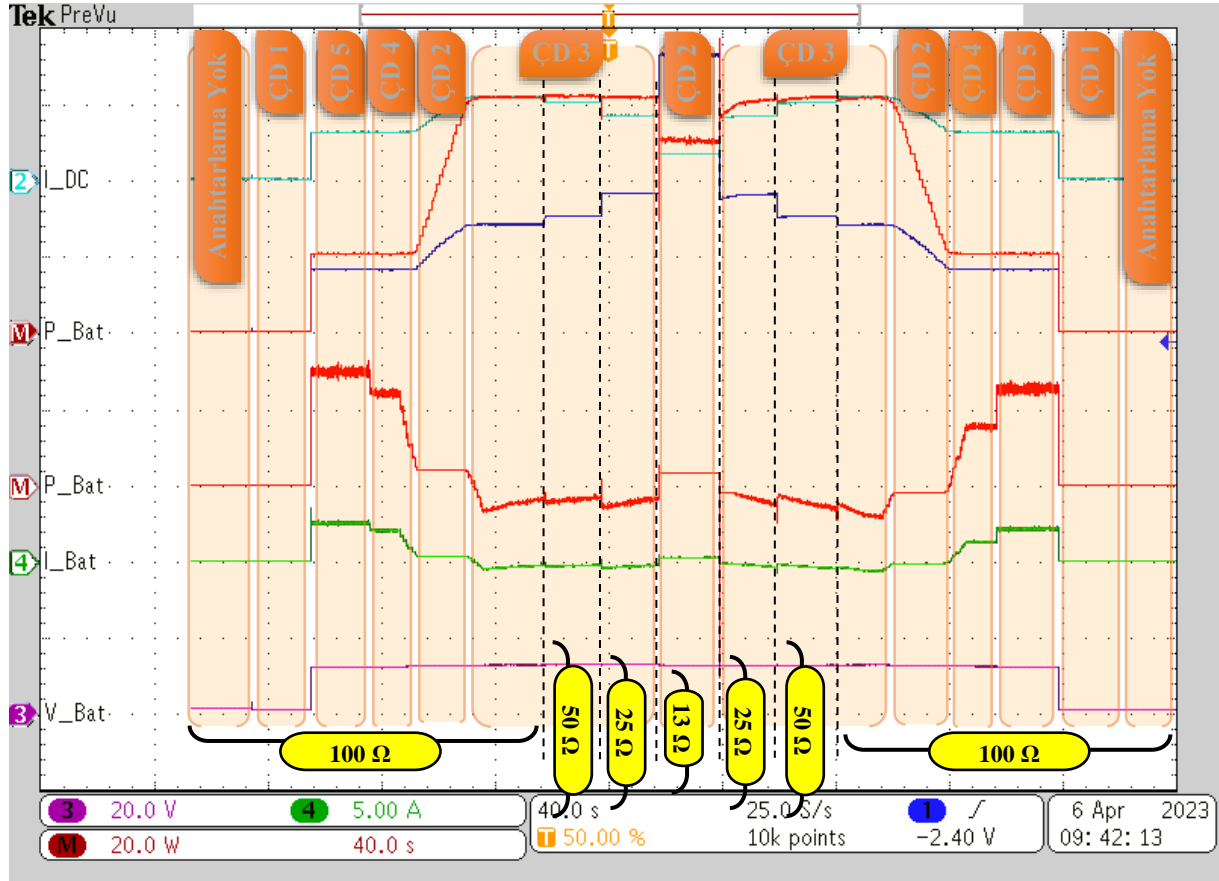
düşürülmekte 13Ω 'a kadar değişim göstermeyen (devre dışı) enerji depolama ve destek birimi anahtarlama sinyalleri bu yük değerinde enerji üretimi biriminin yetersiz kalması ile birlikte alt anahtar için anahtarlama sinyali gönderilecek şekilde (deşarj durumu – yükseltici tip) değiştiği görülmektedir. Bu süreçte sistem çalışma durumu da ÇD 4'te olacak şekilde değiştirilmektedir. Yük değeri tekrar 25Ω , 50Ω ve 100Ω ' yükseltildiğinde enerji üretim birimi yükü tek başına besleyebilir duruma gelmekte ve bu doğrultuda sistem ÇD 2'ye dönmektedir. Daha sonra senaryo gereği azalma eğilimine giren güneşlenme miktarı doğrultusunda önce ÇD 4, enerji üretimi biriminin devreden çıkması ile ÇD 5 ve enerji depolama ve destek biriminin de devreden çıkması ile ÇD 1'e tekrar dönüş gerçekleşmekte ve ilgili anahtarlama sinyalleri de bu doğrultuda değişim göstermektedir.



Şekil 7.23. Enerji Üretimi Birimi ve Enerji Depolama ve Destek Birimi Anahtarlama Sinyallerinin Değişimi ($500W/m^2$ Işınımında 100Ω , 50Ω , 25Ω , 13Ω Yük Değişimi İçin)

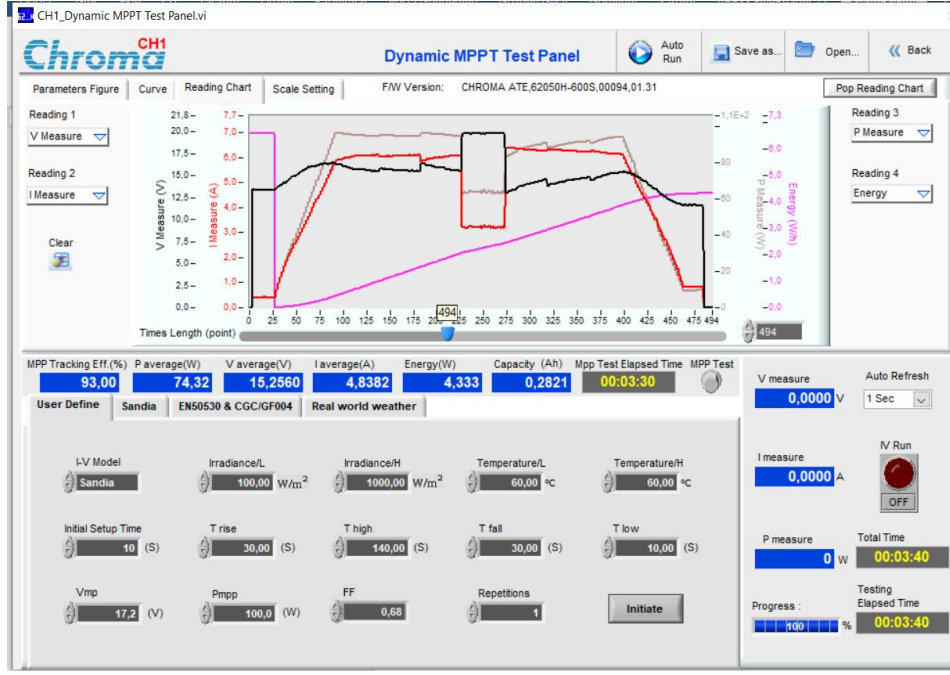
Aynı senaryo, test düzeneğinde güneşlenme miktarı $100W/m^2$ 'den $1000W/m^2$ 'ye ve tekrar $100W/m^2$ 'ye olacak şekilde değiştirilerek sistemin farklı yük durumlarına verdiği cevaplar incelenmiş elde edilen sonuçlar ise Şekil 7.24'te verilmiştir.

Burada önceki senaryodan farklı olarak, güneşlenme miktarının 1000W/m^2 'de sabit kalması ile birlikte belirlenen referans azami DC bara gücünün aşıldığı ve sistemin enerji depolama ve destek biriminin şarj durumunda (düşürücü tip) devrede olduğu ÇD 3'te çalıştığı görülmektedir. Bu esnada yük değeri 50Ω 'a daha sonra da 25Ω 'a düşürülmekte ve algoritma tarafından değiştirilen doluluk oranı doğrultusunda belirlenen referans azami DC bara gücü üzerinde üretilen güç bataryaya aktarılmakta ve sistem ÇD 3'te çalışmaya devam etmektedir. Yük değeri 13Ω 'a düşürüldüğünde ise enerji üretimi birimi, artık belirlenen referans azami DC bara gücün altında bir güç sağlayabildiğinden enerji depolama ve destek birimi devre dışı kalmaktadır. Bu süreçte sistem çalışma durumu da ÇD 2 olacak şekilde değiştirilmektedir. Daha sonra yük değeri tekrar 25Ω , 50Ω ve 100Ω ' yükseltildiğinde enerji üretim birimi belirlenen referans azami DC bara gücü üzerinde bir güç sağlayabilir duruma gelmekte ve bu doğrultuda sistem ÇD 3'e dönmektedir.



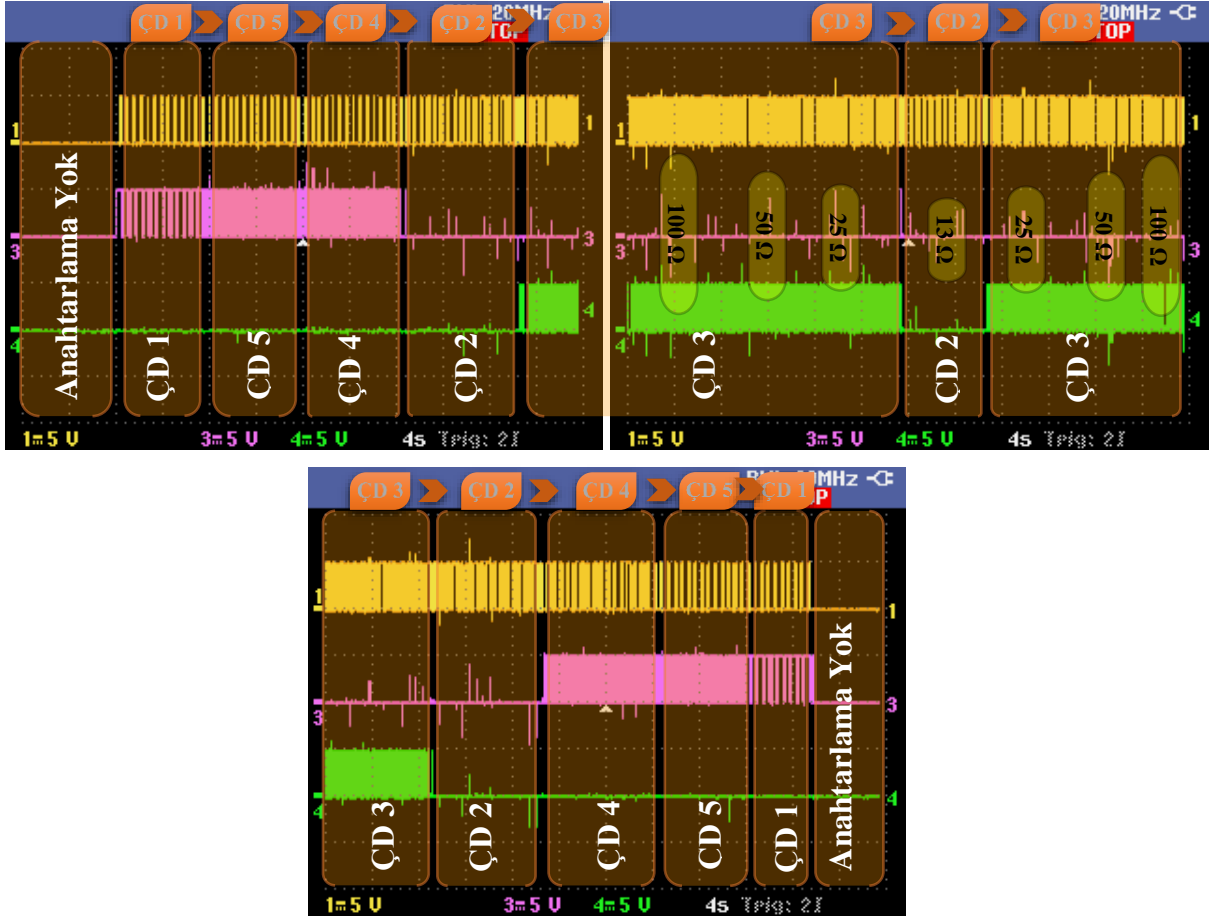
Şekil 7.24. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (1000W/m^2 Işınımında 100Ω , 50Ω , 25Ω , 13Ω Yük Değişimi İçin)

Ayrıca bu senaryo süresince elde edilen enerji üretimi birimi akım (kırmızı), gerilim (siyah), güç (gri), ve MGNT başarım oranı (mavi) değerleri ve senaryo sununda elde edilen MGNT başarım oranı Şekil 7.25'te verilmiştir.



Şekil 7.25. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı ($1000\text{W}/\text{m}^2$ Işınımında 100Ω , 50Ω , 25Ω , 13Ω Yük Değişimi İçin)

Enerji üretimi birimi, enerji depolama ve destek birimi anahtarlama sinyallerinin değişimi de Şekil 7.26’da verilmiştir. Burada önceki senaryodan farklı olarak, ışınım miktarı $1000\text{W}/\text{m}^2$ ’de sabit iken yük değeri 100Ω ’dan kademeli olarak 13Ω ’a düşürülmekte 13Ω ’a kadar değişim göstermeyen (şarj durumunda – düşürücü tip) enerji depolama ve destek birimi anahtarlama sinyallerinin, bu yük değerinde enerji üretimi biriminin belirlenen referans azami DC bara gücün altında bir güç sağlayabilmesi ile birlikte anahtarlama sinyali gönderilmeyecek şekilde (devre dışı) değiştiği görülmektedir. Bu süreçte sistem çalışma durumu da ÇD 2 olacak şekilde değiştirilmektedir. Daha sonra yük değeri tekrar 25Ω , 50Ω ve 100Ω ’ yükseltildiğinde enerji üretim birimi belirlenen referans azami DC bara gücünün üzerinde bir güç güç sağlayabilir duruma gelmekte ve bu doğrultuda sistem ÇD 3’e dönmektedir.

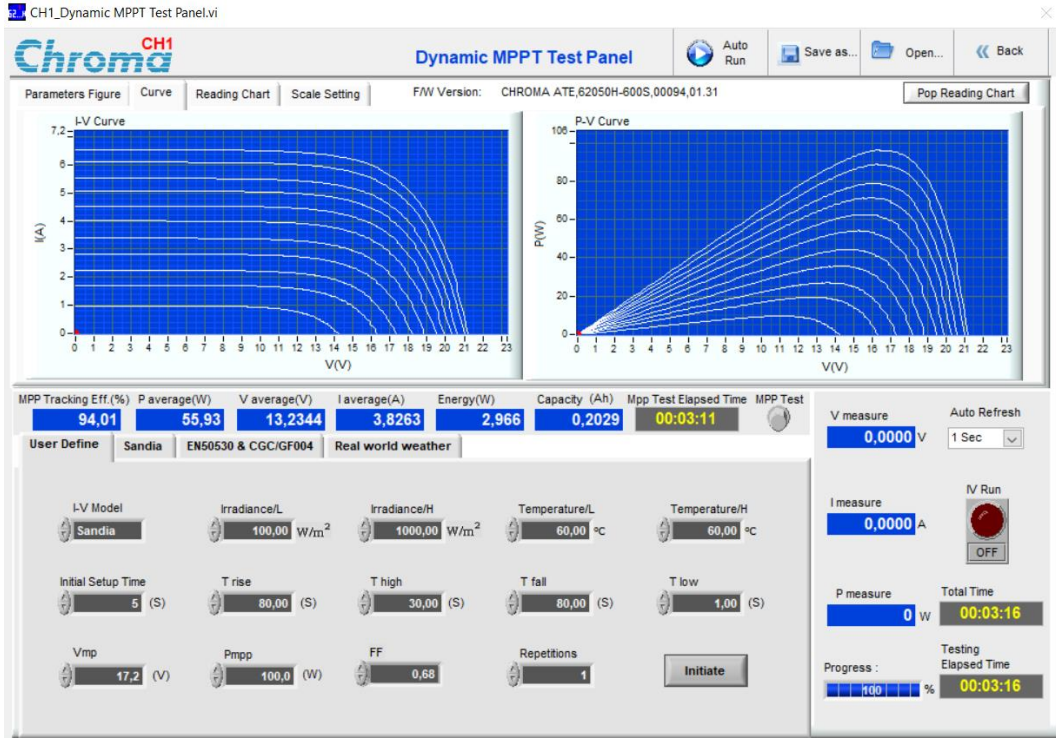


Şekil 7.26. Enerji Üretimi Birimi ve Enerji Depolama ve Destek Birimi Anahtarlama Sinyallerinin Değişimi (1000W/m² Işınmında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin)

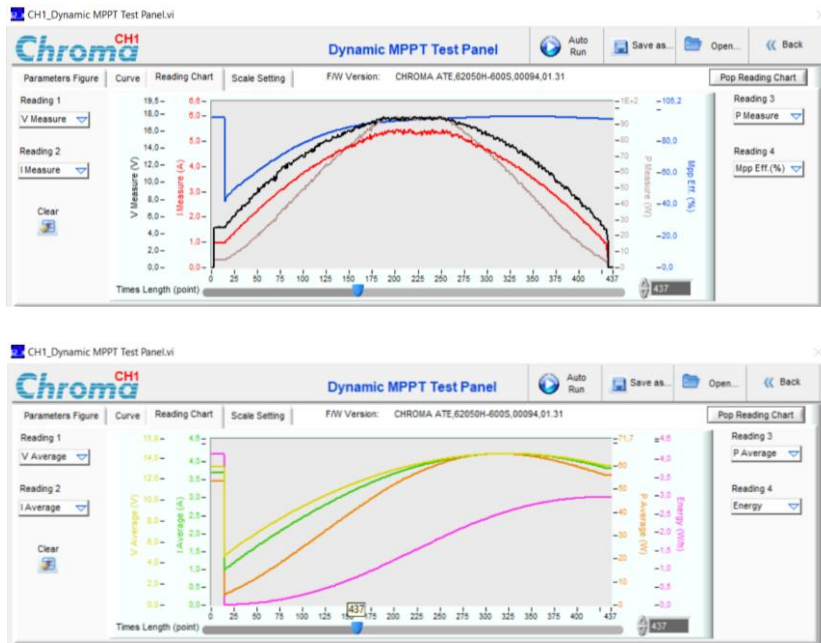
7.3. Bulanık Mantık PID Denetleyicili Enerji Yönetim Algoritması Uygulama Çalışmaları Ve Sonuçları

7.3.1 MGNT Uygulama Çalışmaları Ve Sonuçları

Tez kapsamında geliştirilen bulanık mantık PID denetleyicili enerji yönetim algoritması, geliştirilen test düzeneğinde MGNT başarımını belirlemek üzere koşturulmuştur. Bir önceki bölümde, bulanık mantık denetleyicili enerji yönetim algoritması ile aynı test koşullarında test edilebilmesi için tüm parametreler aynı olacak şekilde belirlenmiştir. Bu doğrultuda, bu senaryo süresince elde edilen enerji üretimi birimi akım (kırmızı), gerilim (siyah), güç (gri), MGNT başarım oranı (mavi) ve enerji (pembe) değerleri ve senaryo sonunda elde edilen MGNT başarım oranı Şekil 7.27 ve Şekil 7.28’de verilmiştir.



Şekil 7.27. Bulanık Mantık PID Denetleyicili Enerji Yönetim Algoritması MGNT Başarım Oranı



Şekil 7.28. Enerji Üretim Birimi Akım (Kırmızı), Gerilim (Siyah), Güç (Gri), MGNT Başarım Oranı (Mavi) ve Enerji (Pembe) Değerleri

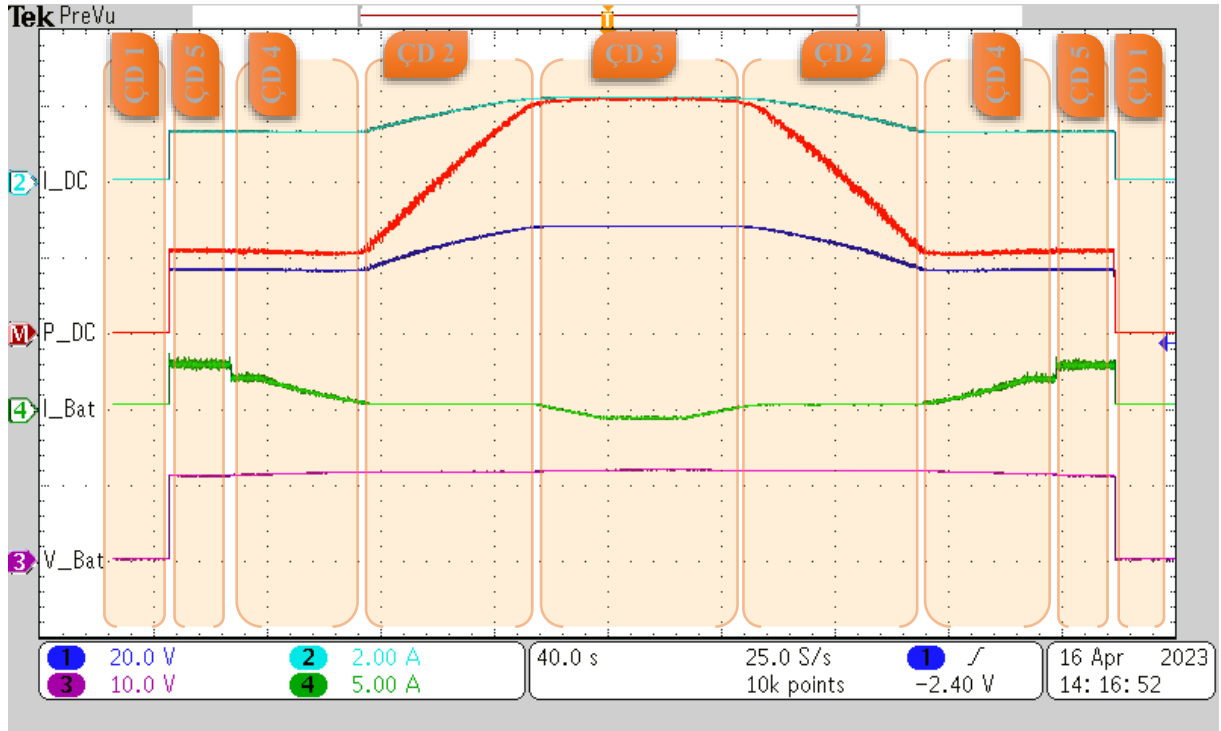
Sonuçlara göre, geliştirilen bulanık mantık denetleyicili enerji yönetim algoritmasının MGNT başarım oranı, tipik bir günlük güneşlenme değişiminin oldukça agresif bir zaman

aralığında benzetimi ile oluşturulan senaryosuna karşılık, PV simülatörü yazılımı tarafından %94,01 olarak belirlenmiştir.

7.3.2 Enerji Yönetim Sistemi Uygulama Çalışmaları Ve Sonuçları

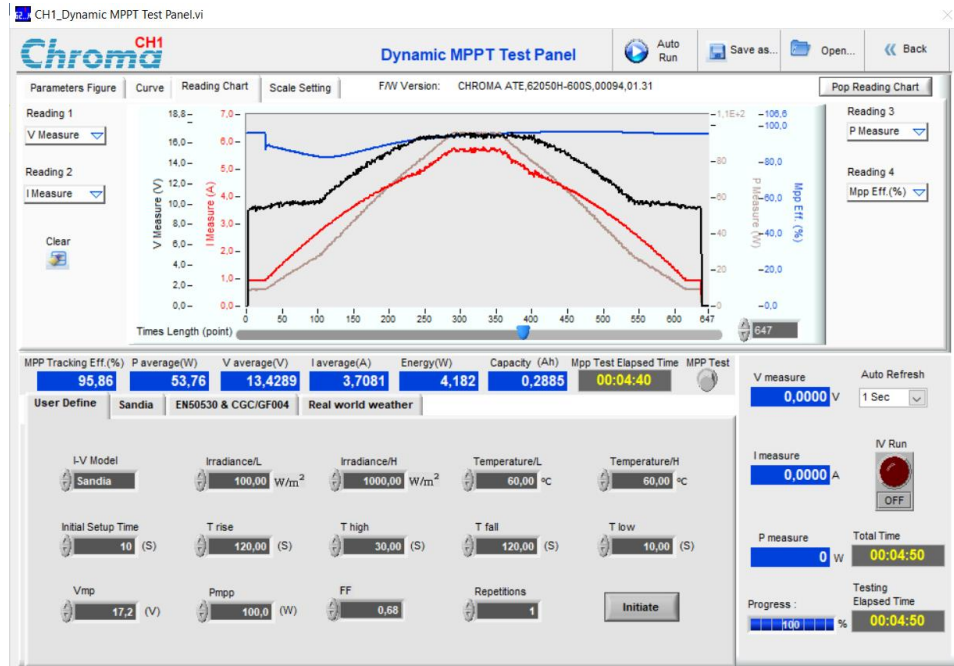
Tez kapsamında geliştirilen bulanık mantık PID denetleyicili enerji yönetim algoritması, geliştirilen test düzeneğinde enerji depolama ve destek birimini de içerecek şekilde enerji yönetim sistemini denetlemek üzere koşturulmuştur. Bir önceki bölümde, bulanık mantık denetleyicili enerji yönetim algoritması ile aynı test koşullarında test edilebilmesi için tüm parametreler aynı olacak şekilde belirlenmiştir. Bu doğrultuda, bu senaryo süresince elde edilen DC bara gerilimi (mavi), akımı (turkuaz) ve gücü (kırmızı) ve batarya gerilimi (mor), akımı (yeşil) ve gücü (kırmızı) Şekil 7.29'da verilmiştir.

Burada aynı zamanda daha önce belirlenen enerji yönetim sistemi çalışma durumlarındaki değişim de görülmektedir. Buna göre, ilk anda enerji üretim birimi ile depolama ve destek biriminin devrede olmadığı, yükün beslenemediği Çalışma Durumu (ÇD) 1 ile başlanmış, daha sonra enerji depolama ve destek biriminin (deşarj durumunda) devreye girmesi ile birlikte yükün yalnızca batarya ile beslendiği ÇD 5'e geçilmiştir. Daha sonra enerji üretimi biriminin de devreye girmesi ile birlikte yükün PV panel ve batarya ile birlikte beslendiği ÇD 4'e geçilmiştir. Bu durumda senaryo gereği güneşlenme gittikçe artmakta dolayısı ile enerji üretimi birimi giderek daha fazla güç üretmekte böylelikle enerji depolama ve destek birimi giderek devreden çıkmaktadır. Enerji üretim birimi 20W olarak belirlenen referans asgari DC bara gücünü tek başına sağlayacak miktarda bir güneşlenme değerine ulaşıldığında enerji depolama ve destek biriminin devrede olmadığı, yükün yalnızca PV panel ile beslendiği ÇD 2'ye geçilmiştir. Giderek artan güneşlenme miktarı doğrultusunda enerji üretim birimi 60W olarak belirlenen referans azami DC bara gücünü tek başına sağlayacak güce ulaştığında ise yükün yalnızca PV panel ile beslendiği aynı zamanda enerji üretimi biriminin fazla üretilen gücü enerji depolama ve destek birimine aktardığı (şarj durumu) ÇD 3'e geçilmiştir. Daha sonra senaryo gereği azalma eğilimine giren güneşlenme miktarı doğrultusunda önce ÇD 2'ye daha sonra ÇD 4, enerji üretimi biriminin devreden çıkması ile ÇD 5 ve enerji depolama ve destek biriminin de devreden çıkması ile ÇD 1'e tekrar dönüş gerçekleşmektedir.



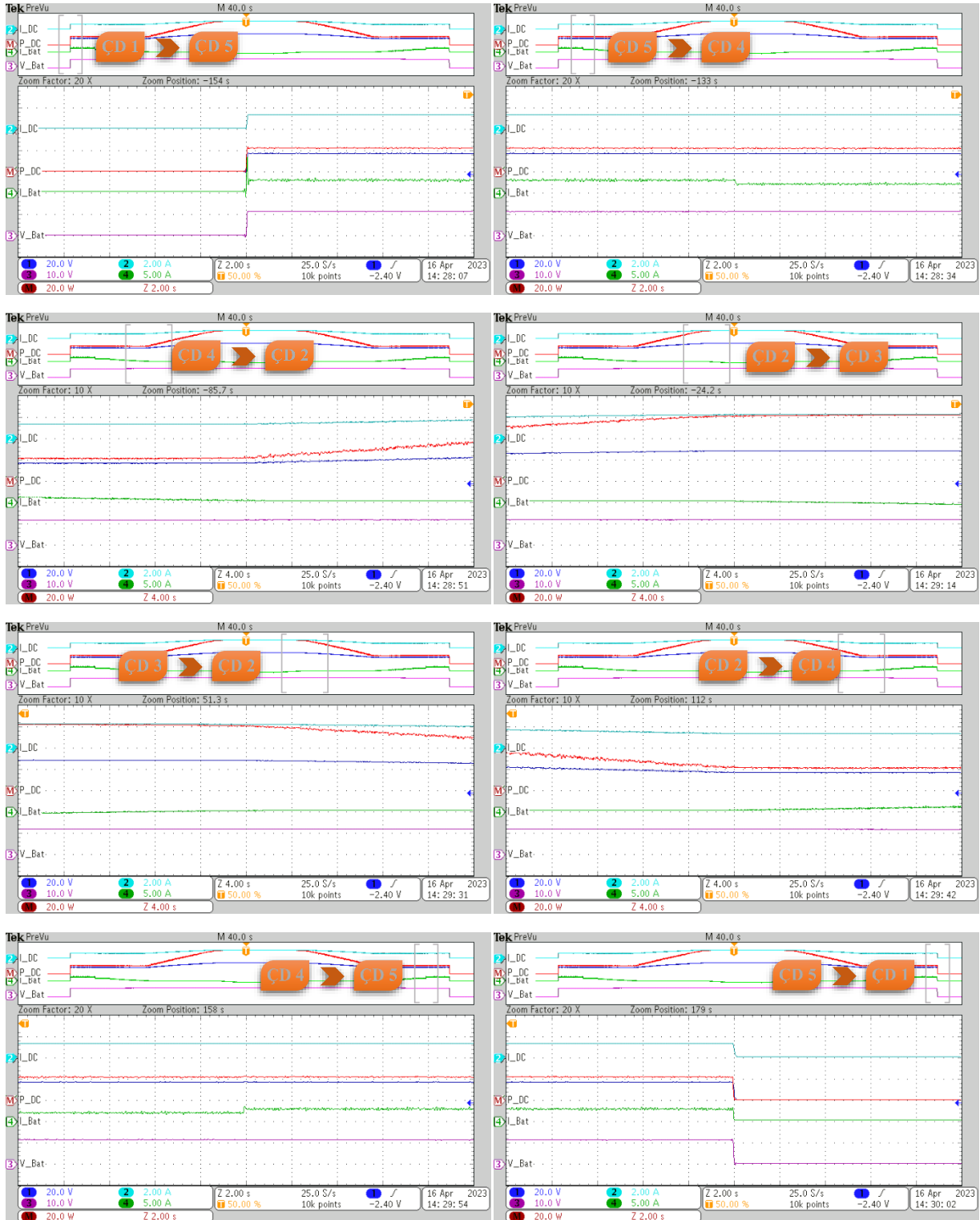
Şekil 7.29. Elde Edilen DC Bara Gerilimi (Mavi), Akımı (Turkuaz) ve Gücü (Kırmızı) ve Batarya Gerilimi (Mor), Akımı (Yeşil) ve Gücü (Kırmızı) (100Ω için)

Ayrıca bu senaryo süresince elde edilen enerji üretimi birimi akım (kırmızı), gerilim (siyah), güç (gri), ve MGNT başarım oranı (mavi) değerleri ve senaryo sonunda elde edilen MGNT başarım oranı Şekil 7.30’da verilmiştir.



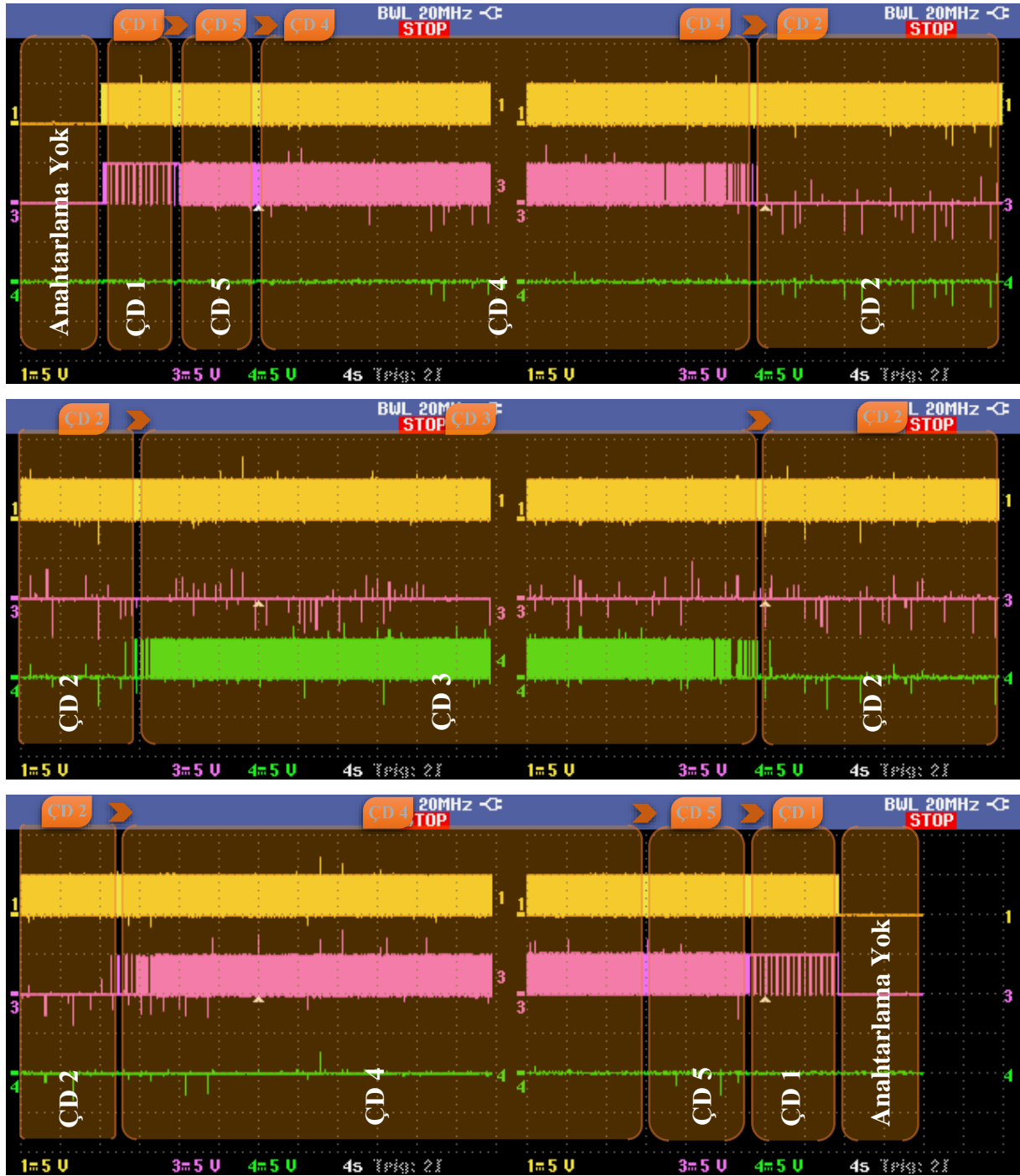
Şekil 7.30. Enerji Üretimi Birimi Akım (Kırmızı), Gerilim (Siyah), Güç (Gri) ve MGNT Başarım Oranı

Senaryo süresince çalışma durumlarının geçişleri esnasındaki DC bara gerilimi (mavi), akımı (turkuaz), gücü (kırmızı), batarya gerilimi (mor) ve akımı (yeşil) Şekil 7.31’de verilmiştir.



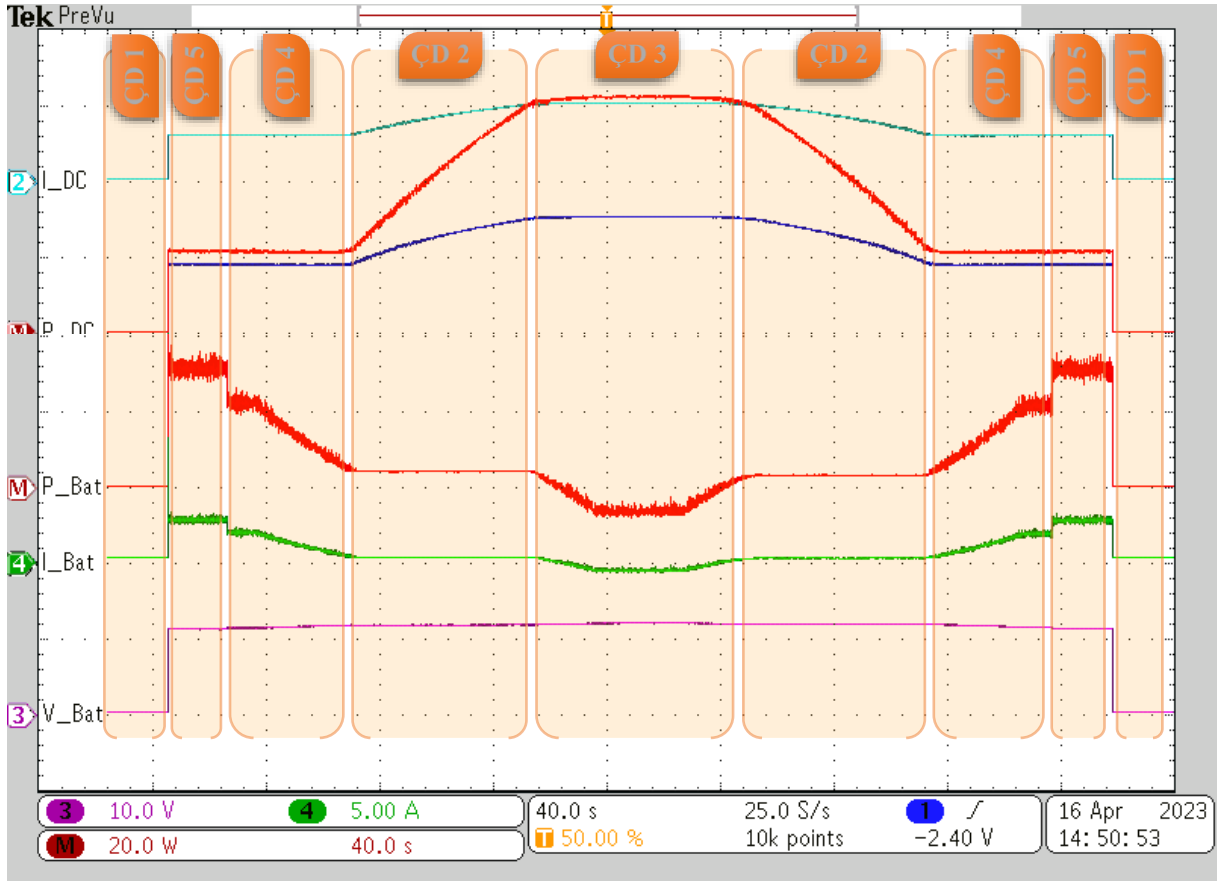
Şekil 7.31. Çalışma Durumlarının Geçiş Anları (Büyütülmüş Olarak – 100Ω için)

Senaryo süresince enerji üretimi birimi ve enerji depolama ve destek birimi anahtarlama sinyallerinin değişimi Şekil 7.32’de verilmiştir. Burada, geliştirilen bulanık mantık PID denetleyicili enerji yönetim algoritması tarafından enerji üretimi birimi yükseltici (alt) anahtarı için üretilen anahtarlama sinyalinin değişimi sarı eğride, enerji depolama ve destek birimi yükseltici (alt) ve düşürücü (üst) anahtarları için üretilen anahtarlama sinyallerinin değişimi de sırası ile mor ve yeşil eğrilerde görülmektedir. Buna göre, başlangıçta enerji yönetim sistemi kapalı iken daha sonra sistem açılmakta ve ÇD 1’e geçilmektedir. Bu durumda enerji üretimi birimi ve enerji depolama ve destek biriminin her ikisinin de yükseltici (alt) anahtarı yükü besleyebilmek için anahtarlanmaktadır. Daha sonra ÇD 2’ye geçilmesi ile birlikte enerji depolama ve destek birimi (deşarj durumunda) yükseltici anahtarının anahtarlama sinyalinin, doluluk oranının 20W referans asgari DC bara gücünü sağlayabilecek şekilde değişmesi ile birlikte değiştiği görülmektedir. Işınım miktarının artması ile birlikte enerji üretim biriminin sağlayabildiği güç miktarı 20W’a yaklaşması ve özellikle bu değeri aşması ile birlikte enerji üretimi birimi anahtarlama sinyalinin de değiştiği görülmektedir. Enerji üretim biriminin 20W referans asgari DC bara gücünü tek başına sağlayabilmesi ile birlikte enerji depolama ve destek birimi devreden çıkmakta ve bu doğrultuda anahtarlama sinyallerinin de kesildiği görülmektedir. Işınım miktarının artması ile birlikte enerji depolama ve destek biriminin düşürücü (üst) anahtarı anahtarlama sinyalinin enerji üretim birimi tarafından 60W referans azami DC bara gücü üzerinde üretilen tüm fazla gücü, enerji depolama ve destek birimine aktaracak şekilde değiştiği görülmektedir. Daha sonra senaryo gereği azalma eğilimine giren güneşlenme miktarı doğrultusunda önce ÇD 2’ye daha sonra ÇD 4, enerji üretimi biriminin devreden çıkması ile ÇD 5 ve enerji depolama ve destek biriminin de devreden çıkması ile ÇD 1’e tekrar dönüş gerçekleşmekte ve ilgili anahtarlama sinyalleri de bu doğrultuda değişim göstermektedir.

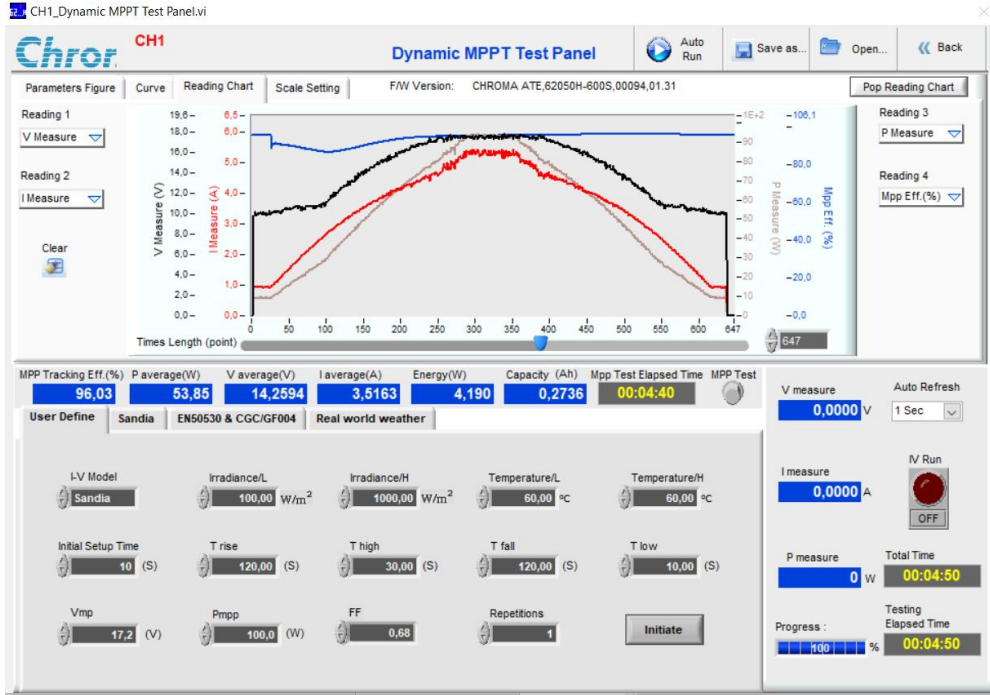


Şekil 7.32. Enerji Üretimi Birimi ve Enerji Depolama ve Destek Birimi Anahtarlama Sinyallerinin Değişimi (100Ω için)

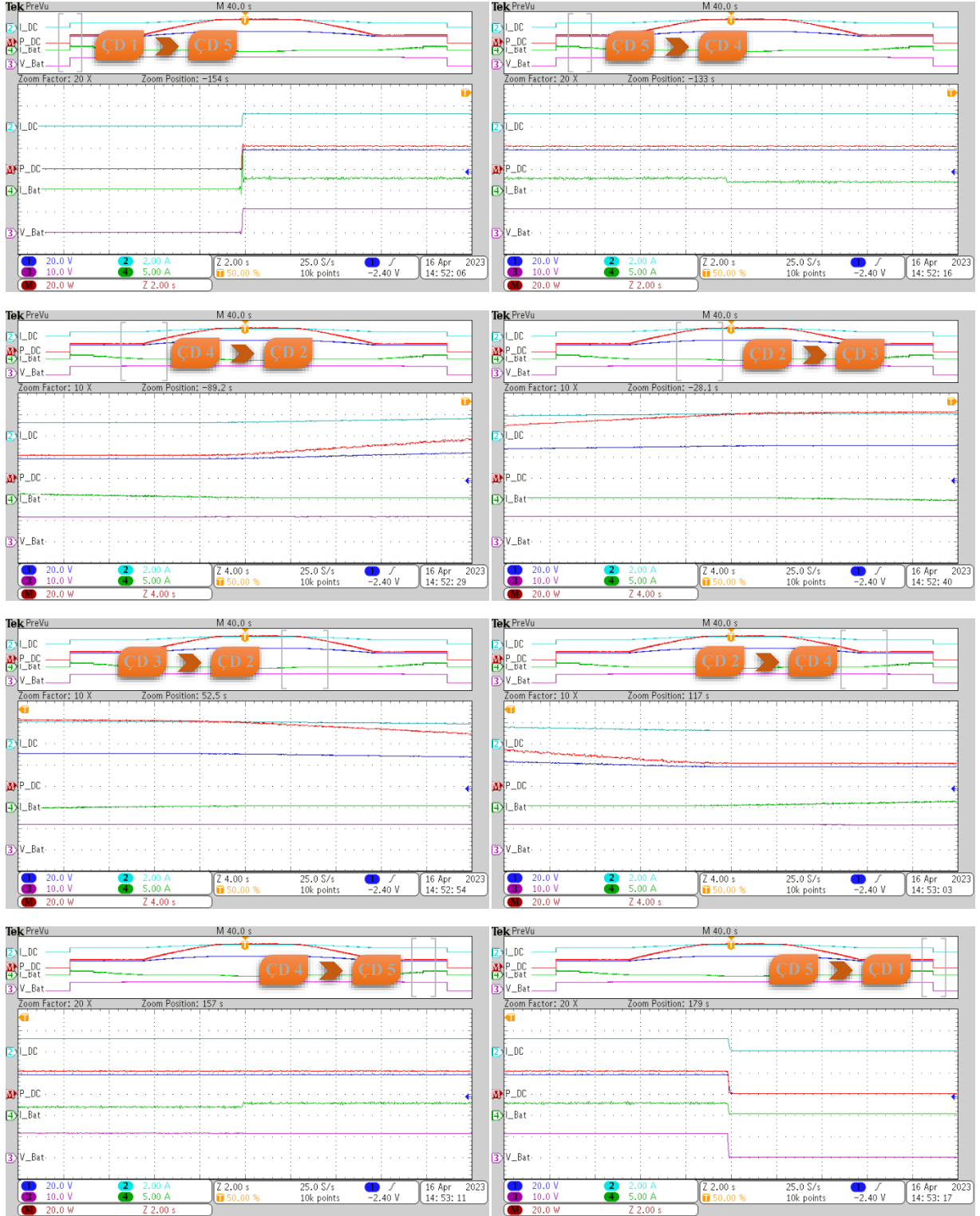
Aynı senaryo, test düzeneğinde yük 100Ω'dan 50Ω'a düşürülerek tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 7.33 – Şekil 7.35'te verilmiştir.



Şekil 7.33. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (50Ω için)



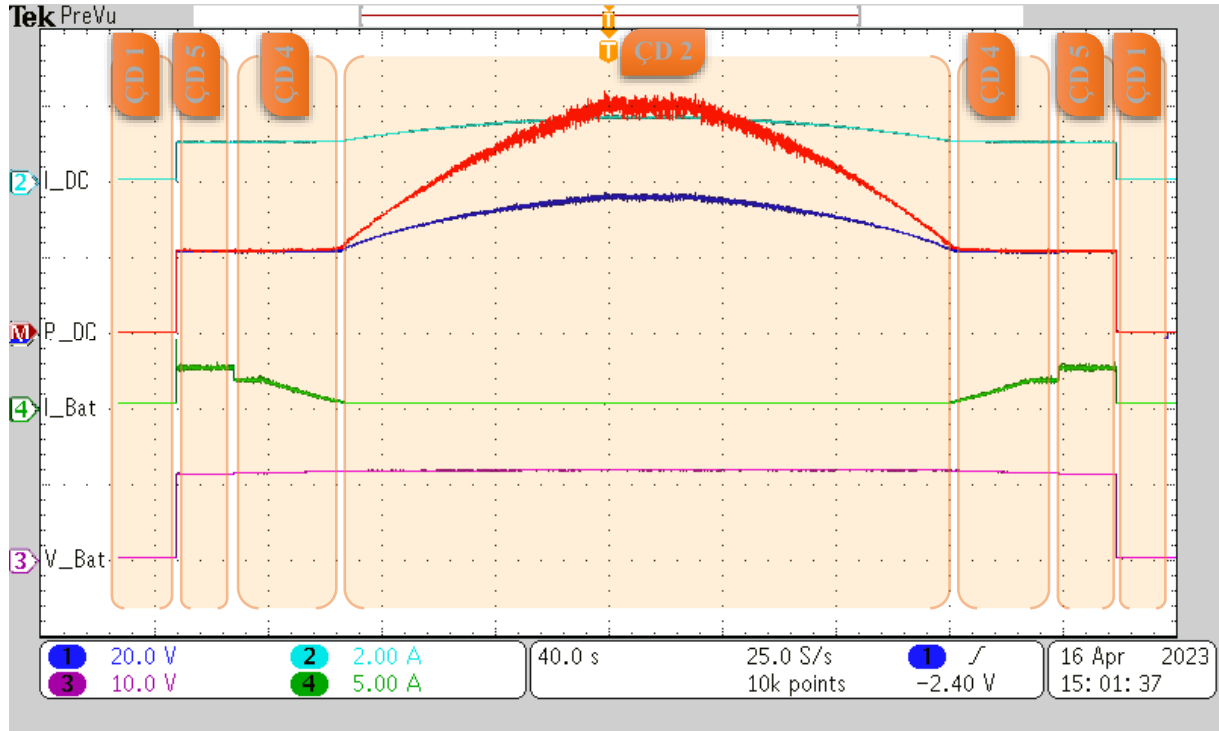
Şekil 7.34. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (50Ω için)



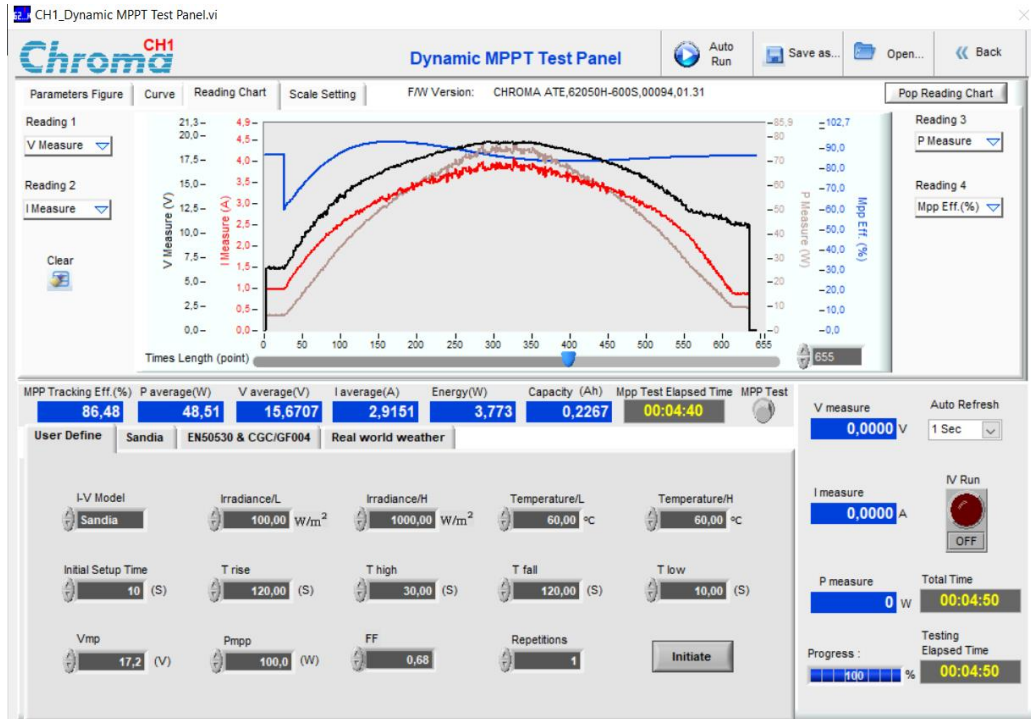
Şekil 7.35. Çalışma Durumlarının Geçiş Anları (Büyütülmüş Olarak – 50Ω için)

Aynı senaryo, test düzeneğinde yük 50Ω'dan 25Ω'a düşürülerek tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 7.36 ve Şekil 7.37'de verilmiştir. Burada diğer yük testlerinden farklı olarak, 60W referans azami DC bara gücü enerji üretimi birimi tarafından tek başına hiç sağlanamamakta ve sistem çalışma durumu, ÇD 2'den ÇD 3'e geçememektedir. Bu aşamada,

bulanık mantık PID denetleyicili enerji algoritmasının MGNT başarım oranının da nispeten düştüğü görülmektedir.

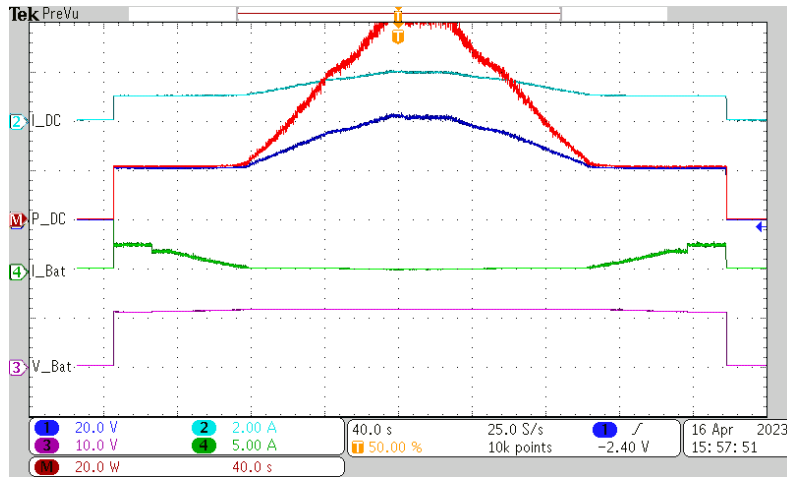


Şekil 7.36. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (25Ω için)

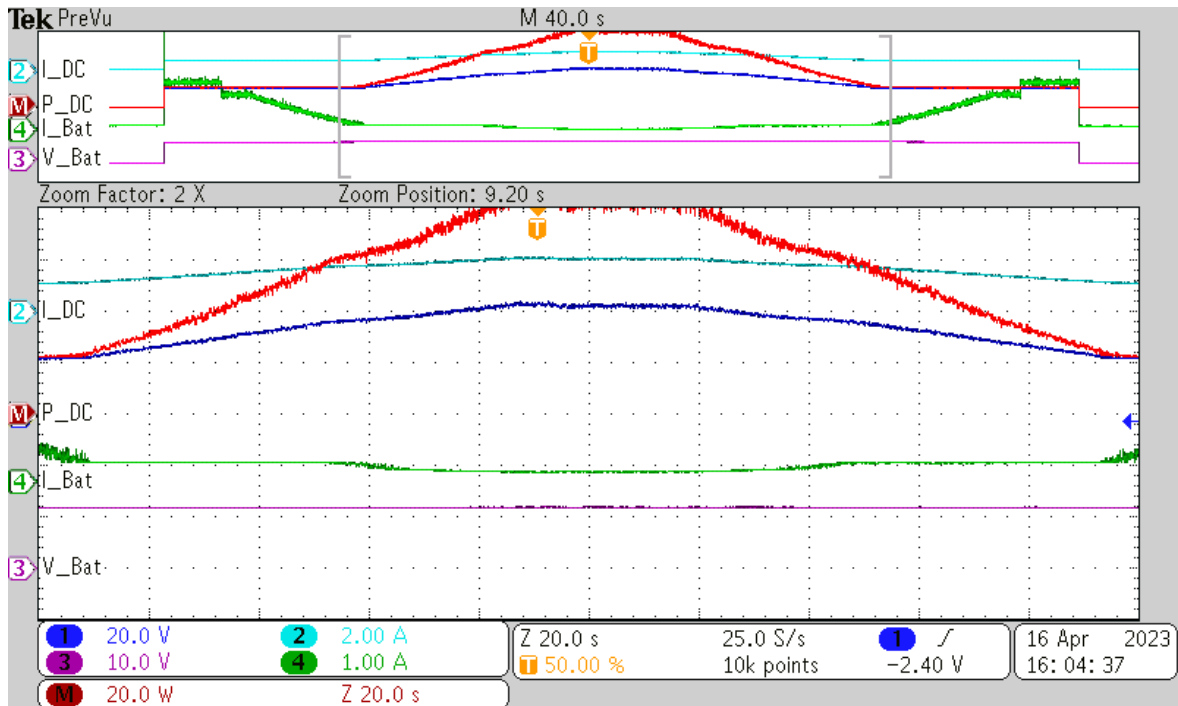


Şekil 7.37. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (25Ω için)

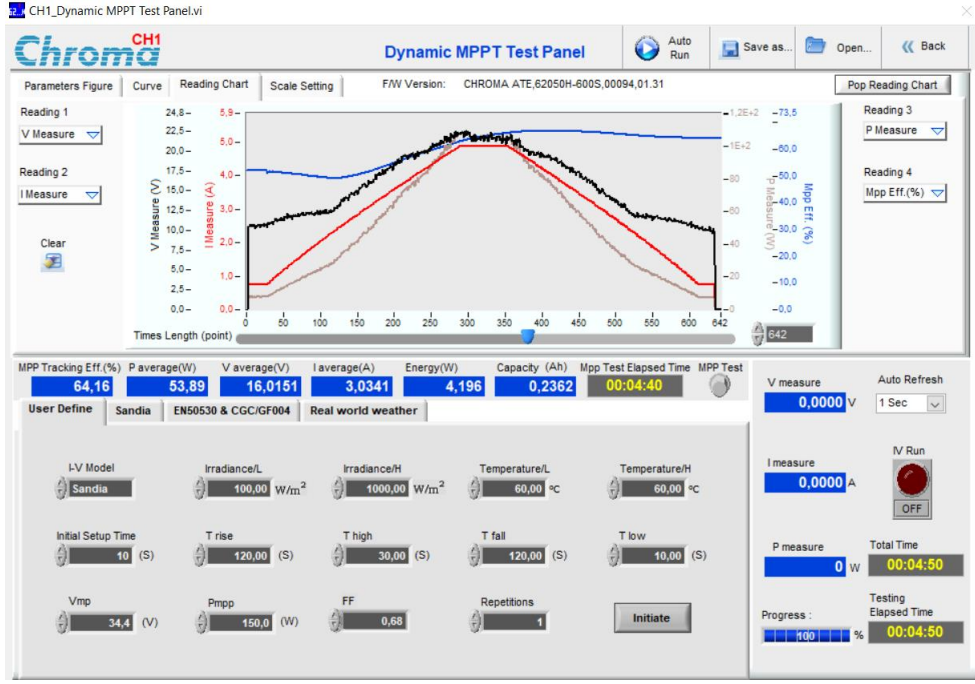
Aynı senaryo, test düzeneğinde yük yine 25Ω iken iki adet PV panel seri ve paralel bağlanması ile çıkış gerilimi ve gücü artırılarak tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 7.38 – Şekil 7.40’da verilmiştir. Burada ise PV paneller seri ve paralel bağlandığında enerji üretimi biriminin sağlayabileceği gerilim ve akım dolayısı ile de güç miktarı artmıştır (gerilim $17,2V$ ’tan $34,4V$ ’a, güç $100W$ ’tan $150W$ ’a). Böylelikle, $60W$ referans azami DC bara gücü sağlanabilmiş bir önceki testte ulaşılamayan ÇD 3 sistem çalışma durumuna düşük bir şarj akımı ile olsa da ulaşılabilmektedir.



Şekil 7.38. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (25Ω için – $34,4V$, $150W$)

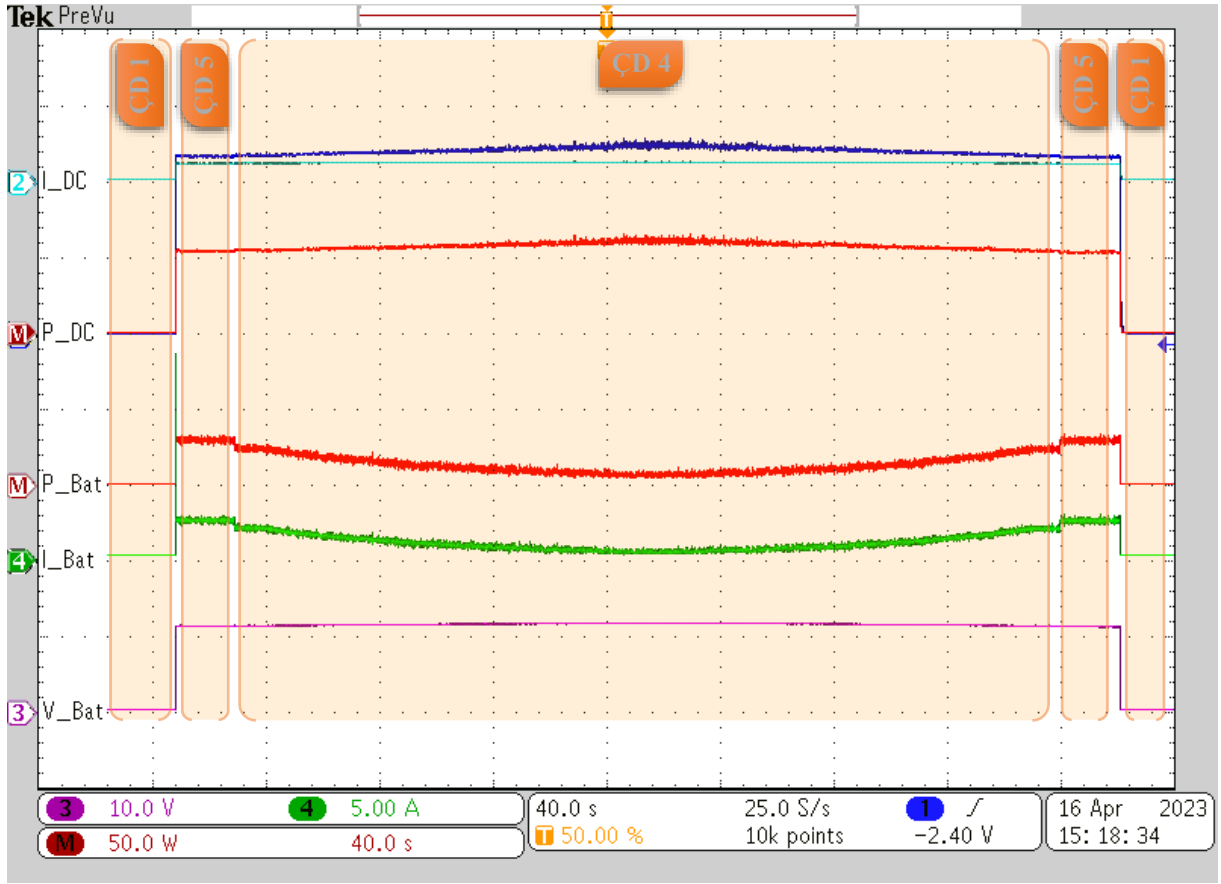


Şekil 7.39. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (25Ω için – $34,4V$, $150W$) (Büyütülmüş Olarak)

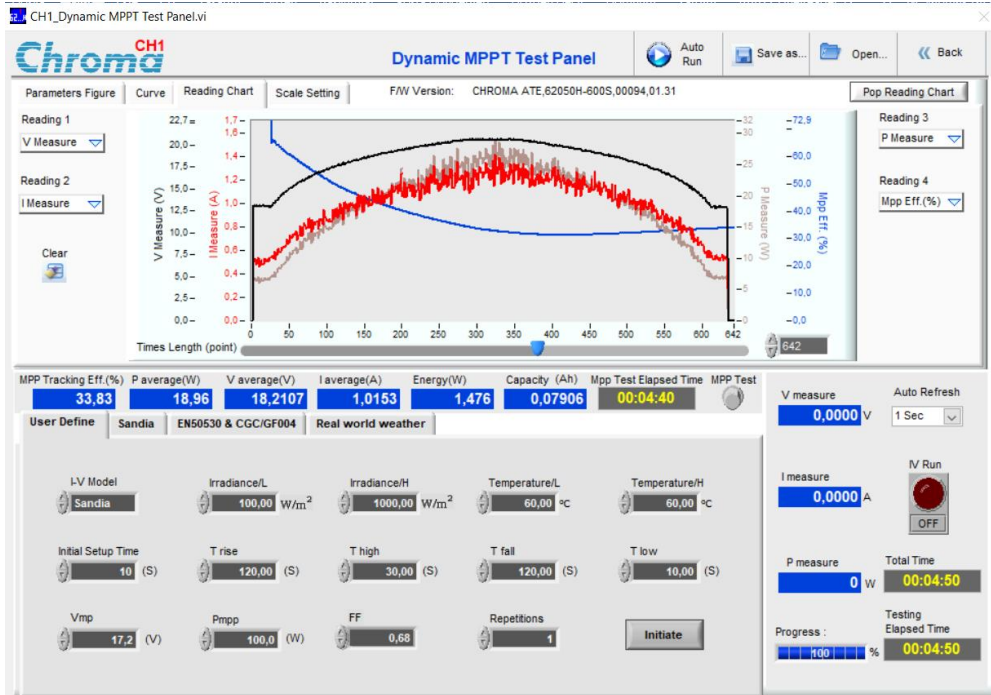


Şekil 7.40. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (25Ω için – 34,4V, 150W)

Aynı senaryo (tek PV panel için), test düzeneğinde yük 25Ω 'dan 13Ω 'a düşürülerek tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 7.41 ve Şekil 7.42'de verilmiştir. Burada diğer yük testlerden farklı olarak yükün 13Ω gibi oldukça düşük bir değerde olması nedeni ile 20W referans asgari DC bara gücü enerji üretimi birimi tarafından tek başına hiç sağlanamamakta ve sistem çalışma durumu, ÇD 4'ten ÇD 2'e geçememektedir. Bu yük değerinde, bulanık mantık PID denetleyicili enerji algoritmasının MGNT başarım oranının da oldukça düştüğü görülmektedir.

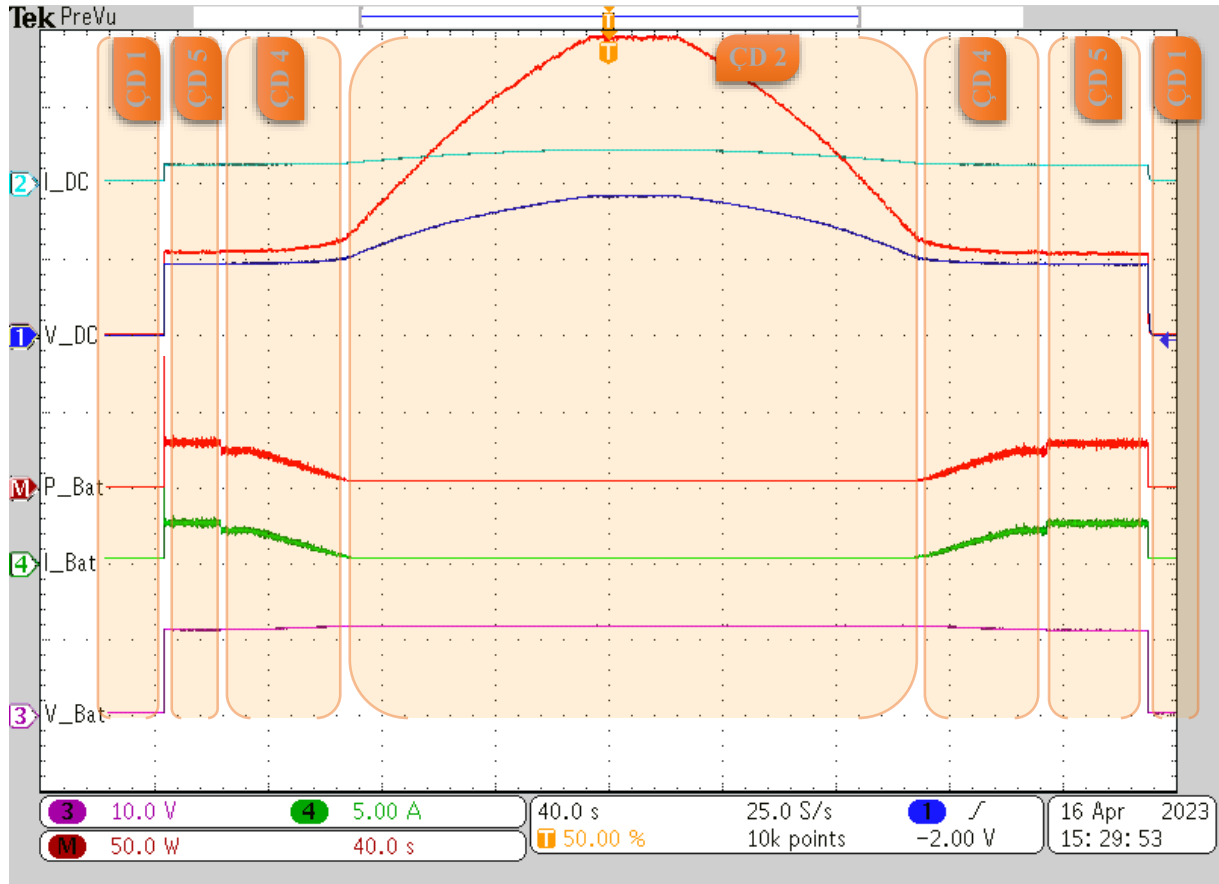


Şekil 7.41. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (13Ω için)

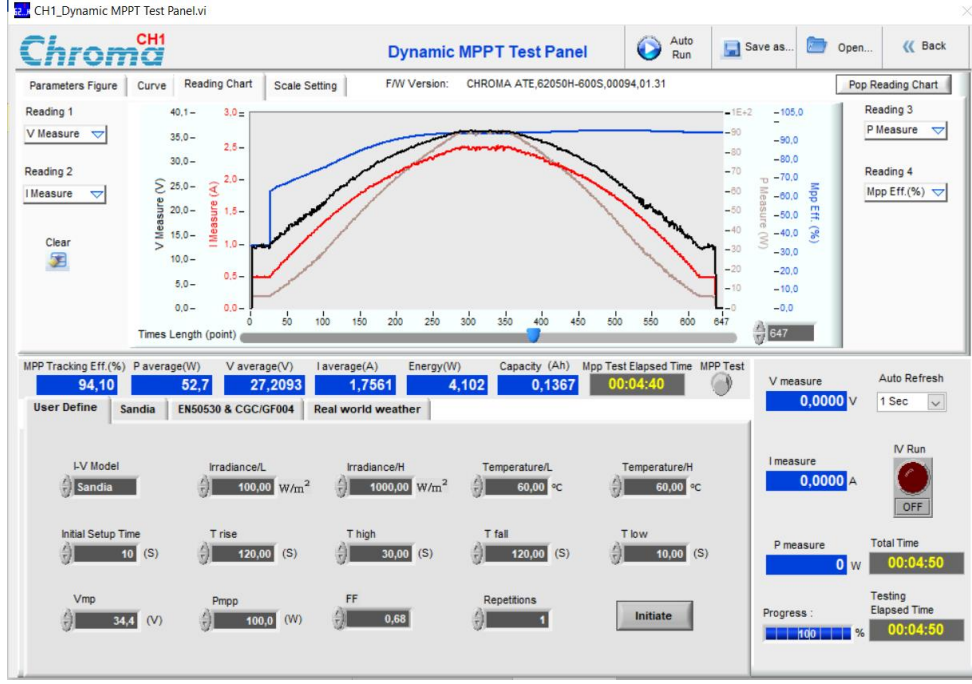


Şekil 7.42. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (13Ω için)

Aynı senaryo, test düzeneğinde yük 13Ω iken iki adet PV panel seri bağlanması ile çıkış gerilimi artırılarak tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 7.43 ve Şekil 7.44'te verilmiştir. Buna göre iki adet PV panel seri bağlandığında enerji üretimi biriminin sağlayabileceği gerilim miktarı artmış (17,2V'tan 34,4V'a) dolayısı ile bir önceki yük testinde hiç geçilemeyen ÇD 2'ye geçilebilmiştir. Fakat bu sefer de 60W referans azami DC bara gücü sağlanamadığı için diğer yük değerlerindeki testlerde ulaşılan ÇD 3 sistem çalışma durumuna hiç ulaşamamıştır.

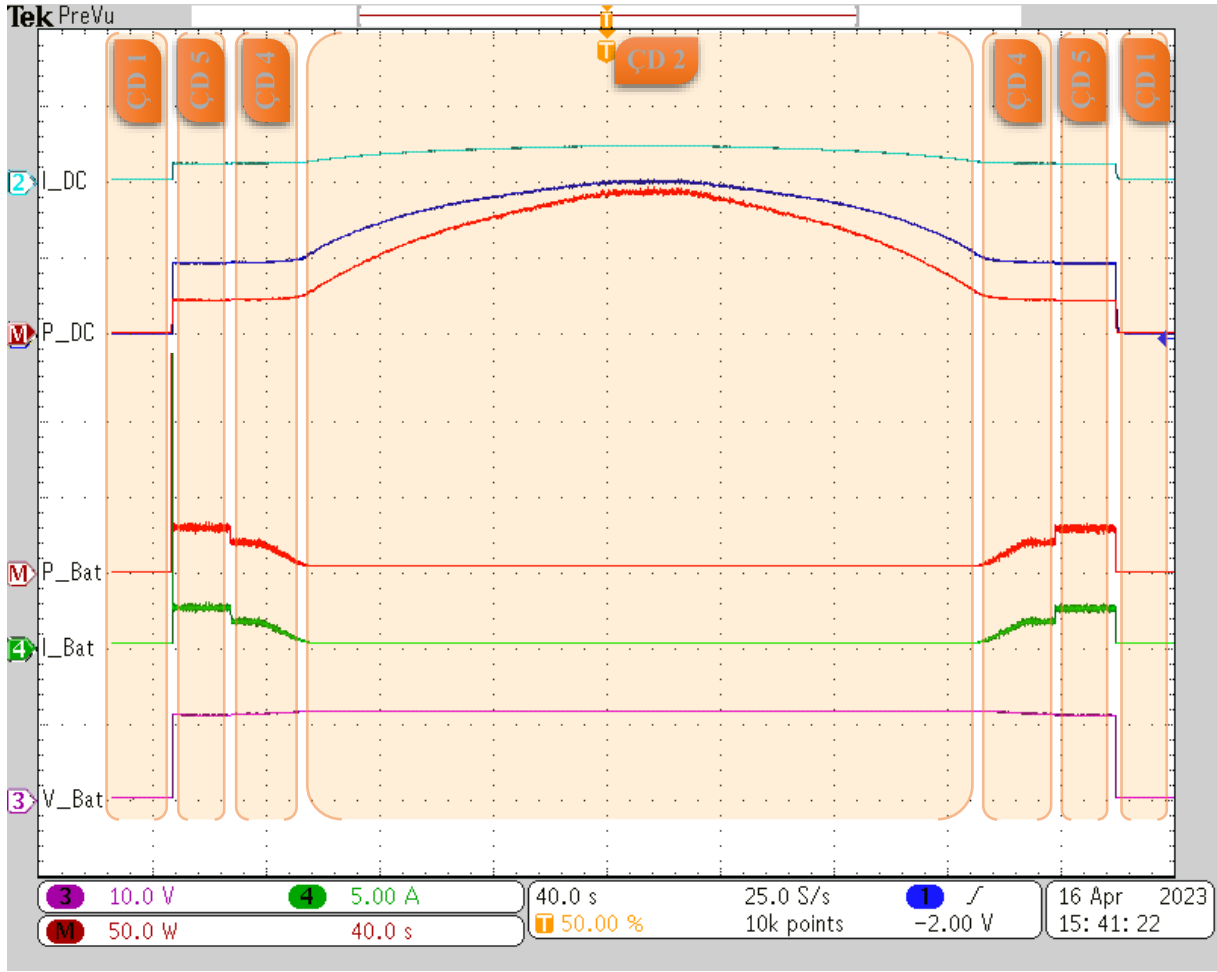


Şekil 7.43. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (13Ω için – 2 PV Panel Seri Bağlı 34,4V, 100W)

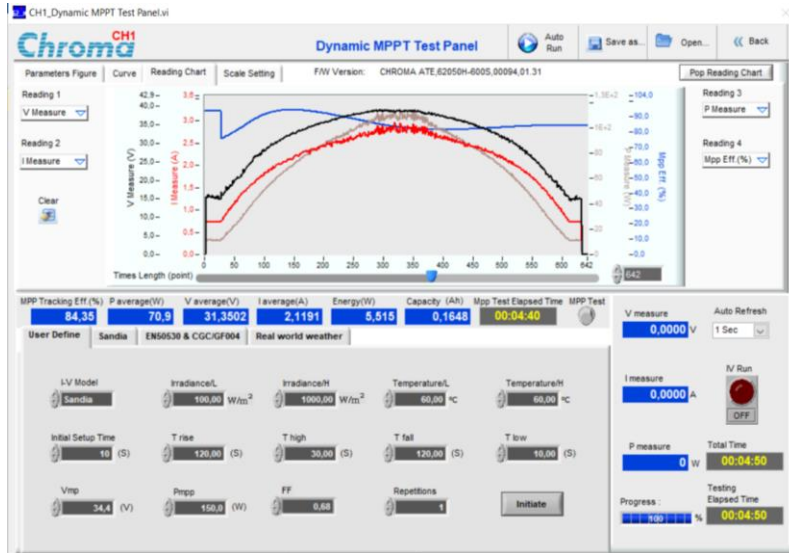


Şekil 7.44. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (13Ω için – 2 PV Panel Seri Bağlı 34,4V, 100W)

Aynı senaryo, test düzeneğinde yük yine 13Ω iken iki adet PV panel seri ve paralel bağlanması ile çıkış gerilimi ve gücü artırılarak tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 7.45 ve Şekil 7.46’da verilmiştir. Burada ise PV paneller seri ve paralel bağlandığında enerji üretimi biriminin sağlayabileceği gerilim ve akım dolayısı ile de güç miktarı artmıştır (gerilim 17,2V’tan 34,4V’a, güç 100W’tan 150W’a). Böylelikle, bir önceki yük testine kıyasla ÇD 2’ye nispeten daha kısa bir sürede geçilebilmiş böylelikle daha uzun süre bu durumda kalınabilmektedir. Fakat bu sefer de yine 60W referans azami DC bara gücü sağlanamadığı için diğer yük değerlerindeki testlerde ulaşılan ÇD 3 sistem çalışma durumuna hiç ulaşamamıştır.



Şekil 7.45. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (13Ω için – 2 PV Panel Seri ve Paralel Bağlı 34,4V, 150W)

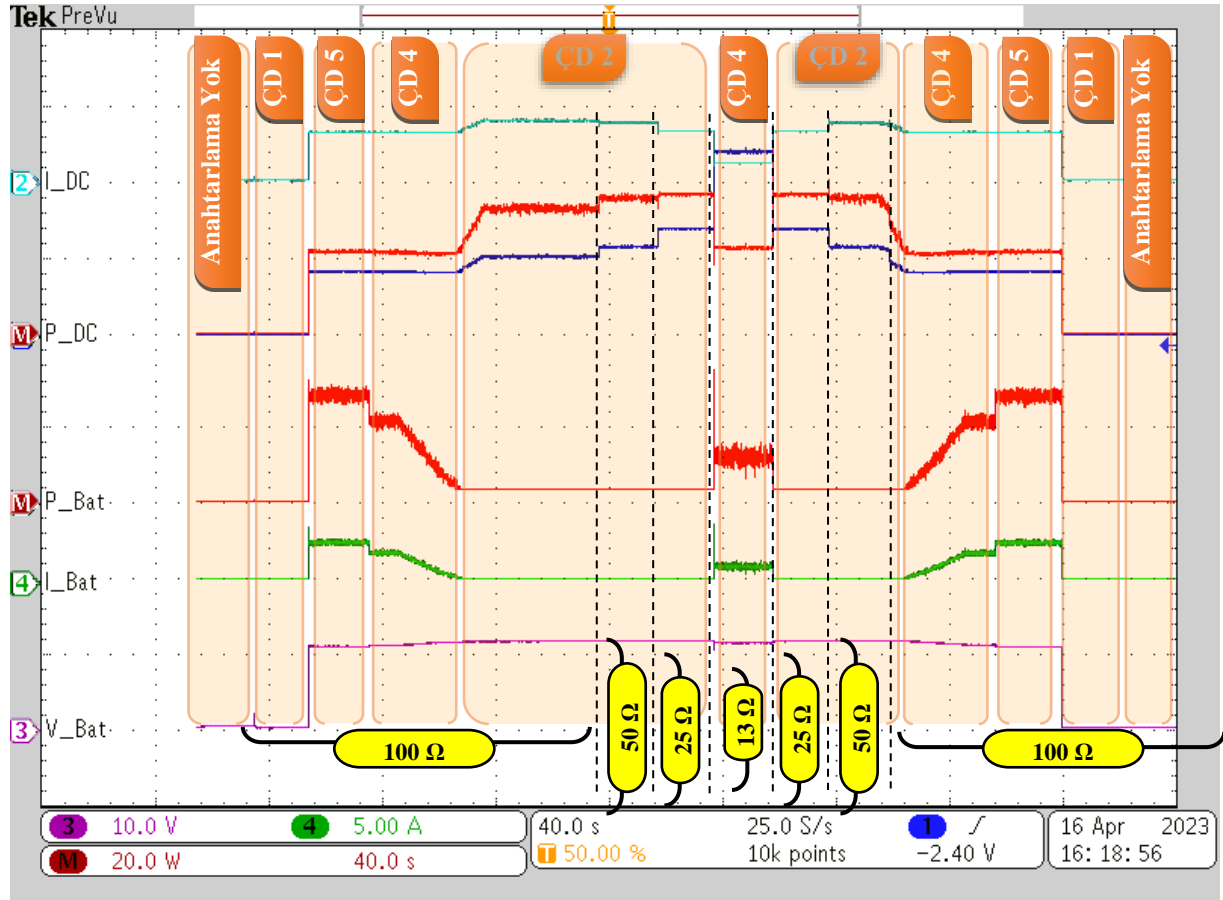


Şekil 7.46. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (13Ω için – 2 PV Panel Seri ve Paralel Bağlı 34,4V, 150W)

Tez kapsamında geliştirilen bulanık mantık PID denetleyicili enerji yönetim algoritmasının, geliştirilen test düzeneğinde aynı senaryodaki farklı yük durumlarına verdiği cevaplar da incelenmiştir. Bir önceki bölümde, bulanık mantık denetleyicili enerji yönetim algoritması ile aynı test koşullarında test edilebilmesi için tüm parametreler aynı olacak şekilde belirlenmiştir. Güneşlenme $500\text{W}/\text{m}^2$ 'ye ulaştığında yük değeri 100Ω 'dan kademeli olarak 50Ω , 25Ω ve 13Ω değerine düşürülmüş sonra tekrar kademeli olarak 13Ω , 25Ω , 50Ω ve 100Ω ' yükseltilmiştir. Bu doğrultuda, bu senaryo süresince elde edilen DC bara gerilimi (mavi), akımı (turkuaz) ve gücü (kırmızı) ve batarya gerilimi (mor), akımı (yeşil) ve gücü (kırmızı) Şekil 7.47'de verilmiştir.

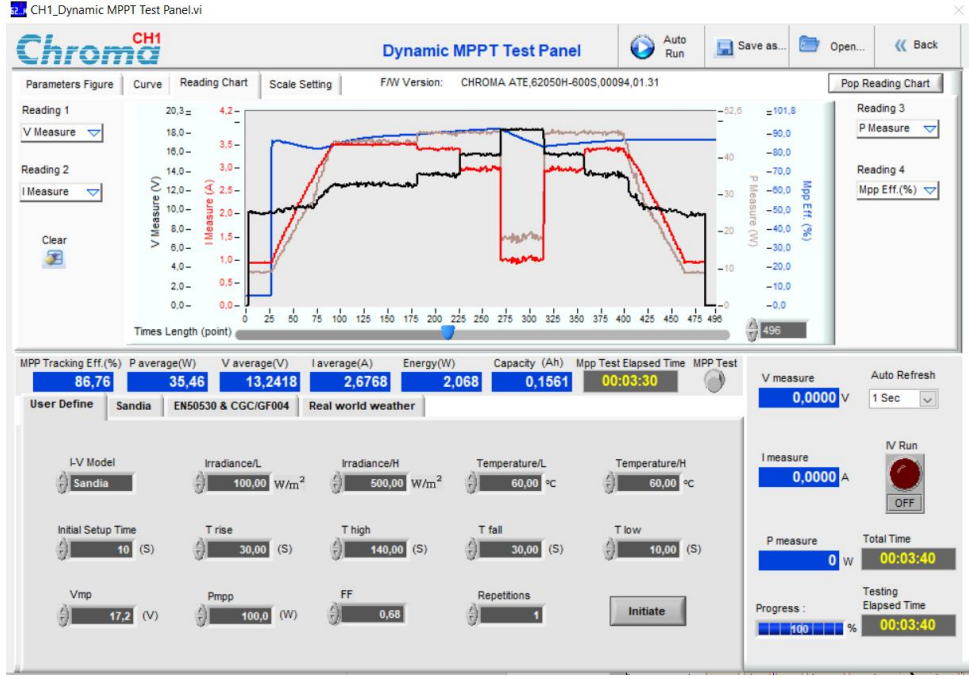
Burada aynı zamanda daha önce belirlenen enerji yönetim sistemi çalışma durumlarındaki değişim de görülmektedir. Buna göre, ilk anda enerji üretim biriminin de depolama ve destek biriminin de devrede olmadığı yükün beslenemediği ÇD 1 ile başlanmış, daha sonra enerji depolama ve destek biriminin (deşarj durumunda – yükseltici tip) devreye girmesi ile birlikte yükün yalnızca batarya ile beslendiği ÇD 5'e geçilmiştir. Daha sonra enerji üretimi biriminin de devreye girmesi ile birlikte yükün PV panel ve batarya ile birlikte beslendiği ÇD 4'e geçilmiştir. Bu durumda senaryo gereği güneşlenme gittikçe artmakta dolayısı ile enerji üretimi birimi giderek daha fazla güç üretmekte böylelikle enerji depolama ve destek birimi giderek devreden çıkmaktadır. Enerji üretim birimi 20W olarak belirlenen referans asgari DC bara gücünü tek başına sağlayacak miktarda bir güneşlenme değerine ulaşıldığında, enerji depolama ve destek biriminin devrede olmadığı yükün yalnızca PV panel ile beslendiği ÇD 2'ye geçilmiştir. Güneşlenme miktarının $500\text{W}/\text{m}^2$ 'de sabit kalması ile birlikte DC bara gücünün referans güç değerleri aralığında kaldığı görülmektedir. Bu esnada yük değeri 50Ω 'a daha sonra da 25Ω 'a düşürülmekte ve algoritma tarafından değiştirilen doluluk oranı doğrultusunda DC bara gücü hafif bir azalış göstermekle birlikte yine referans aralıkta kalmakta ve sistem ÇD 2 de çalışmaya devam etmektedir. Yük değeri 13Ω 'a düşürüldüğünde ise enerji üretimi birimi, belirlenen referans asgari DC bara gücü sağlayamadığından enerji depolama ve destek birimi (deşarj durumunda – yükseltici tip) devreye girerek gerekli ek gücü sağlamakta ve DC bara gücü 20W değerine ulaştırılmaktadır. Bu süreçte sistem çalışma durumu da ÇD 4'te olacak şekilde değiştirilmektedir. Daha sonra yük değeri tekrar 25Ω , 50Ω ve 100Ω ' yükseltildiğinde enerji üretim birimi yükü tekrar tek başına besleyebilir duruma gelmekte ve bu doğrultuda sistem ÇD 2'ye dönmektedir. Daha sonra senaryo gereği azalma eğilimine giren güneşlenme miktarı doğrultusunda önce ÇD 4, enerji

üretimi biriminin devreden çıkması ile ÇD 5 ve enerji depolama ve destek biriminin de devreden çıkması ile ÇD 1'e tekrar dönüş gerçekleşmektedir.



Şekil 7.47. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü (500W/m² Işınımda 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin)

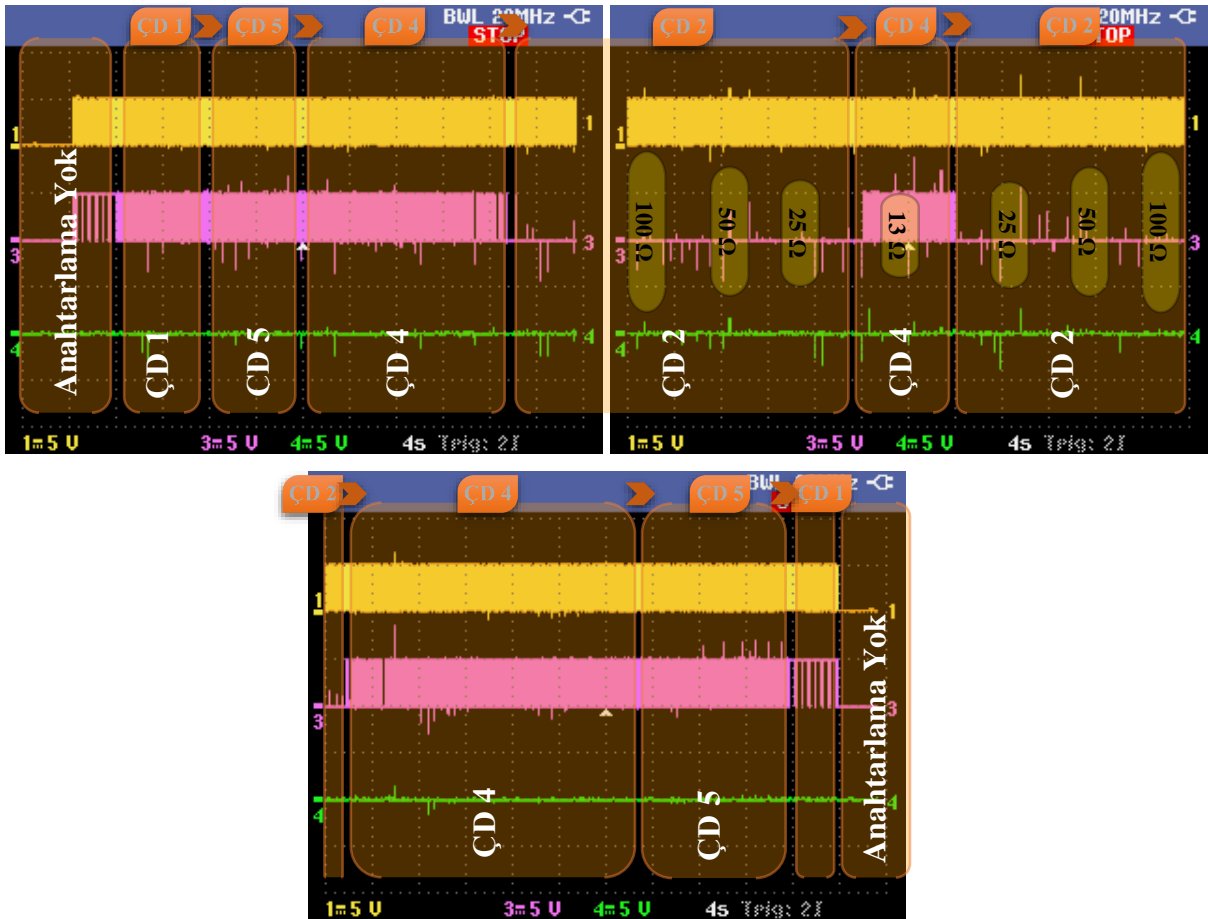
Ayrıca bu senaryo süresince elde edilen enerji üretimi birimi akım (kırmızı), gerilim (siyah), güç (gri), ve MGNT başarım oranı (mavi) değerleri ve senaryo sonunda elde edilen MGNT başarım oranı Şekil 7.48'de verilmiştir.



Şekil 7.48. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (500W/m² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin)

Senaryo süresince enerji üretimi birimi ve enerji depolama ve destek birimi anahtarlama sinyallerinin değişimi Şekil 7.49’da verilmiştir. Burada, geliştirilen bulanık mantık denetleyicili enerji yönetim algoritması tarafından enerji üretimi birimi yükseltici (alt) anahtarı için üretilen anahtarlama sinyalinin değişimi sarı eğride, enerji depolama ve destek birimi yükseltici (alt) ve düşürücü (üst) anahtarları için üretilen anahtarlama sinyallerinin değişimi de sırası ile mor ve yeşil eğrilerde görülmektedir. Buna göre, başlangıçta enerji yönetim sistemi kapalı iken daha sonra sistem açılmakta ve ÇD 1’e geçilmektedir. Bu durumda enerji üretimi birimi ve enerji depolama ve destek biriminin her ikisinin de yükseltici (alt) anahtarı yükü besleyebilmek için anahtarlanmaktadır. Daha sonra ÇD 2’ye geçilmesi ile birlikte enerji depolama ve destek birimi (deşarj durumu – yükseltici tip) yükseltici anahtarının anahtarlama sinyalinin doluluk oranının belirlenen referans asgari DC bara gücü sağlayabileceği şekilde değişmesi ile birlikte değiştiği görülmektedir. Işınım miktarının artması ile birlikte enerji üretim biriminin sağlayabildiği güç miktarı 20W’a yaklaşması ve özellikle bu değeri aşması ile birlikte enerji üretimi birimi anahtarlama sinyalinin de değiştiği görülmektedir. Enerji üretim biriminin 20W referans asgari DC bara gücünü tek başına sağlayabilmesi ile birlikte enerji depolama ve destek birimi devreden çıkmakta ve bu doğrultuda anahtarlama sinyallerinin de kesildiği görülmektedir. Işınım miktarı 500W/m²’de sabit iken yük değeri 100Ω’ dan kademeli olarak

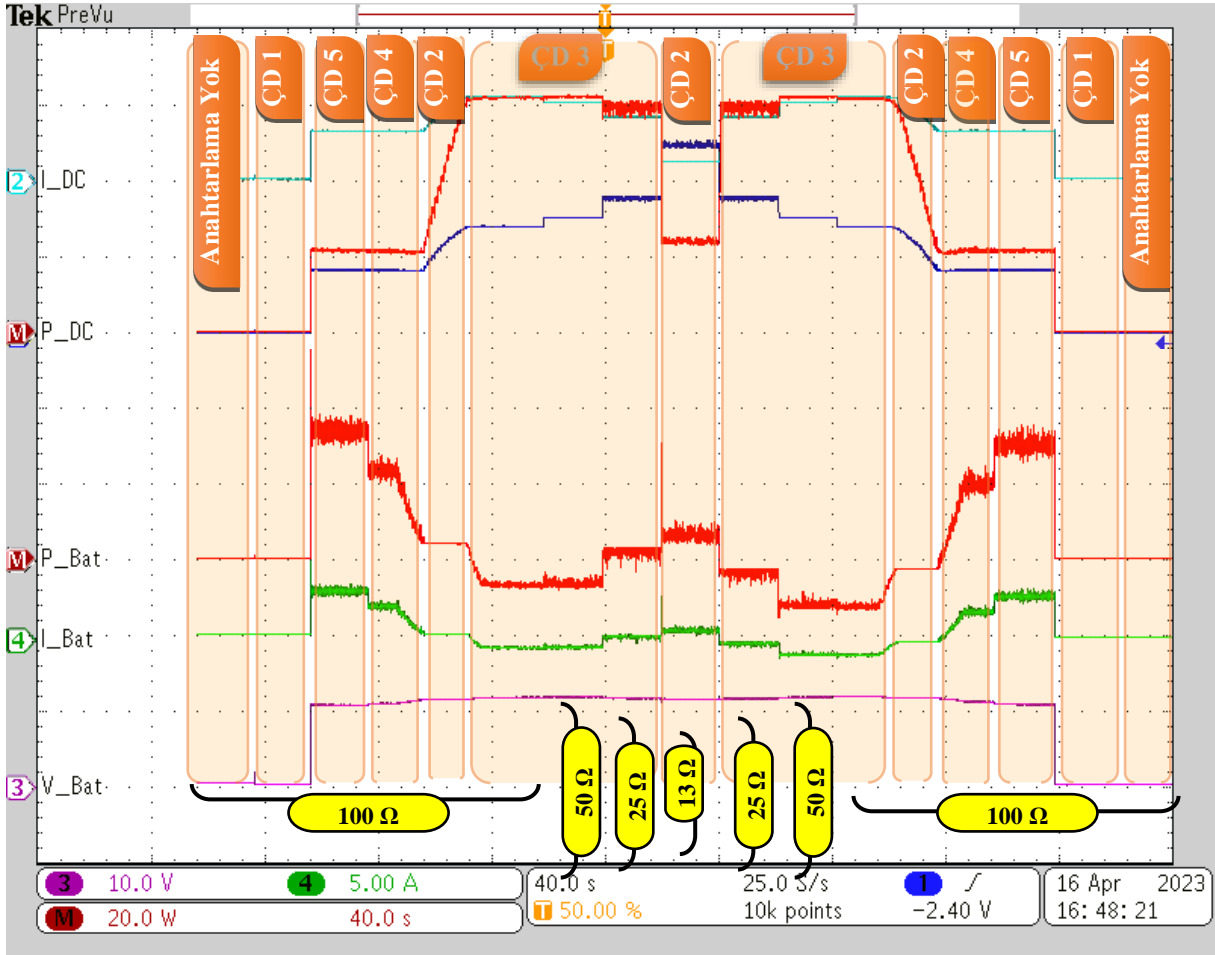
13Ω'a düşürülmekte 13Ω'a kadar değişim göstermeyen (devre dışı) enerji depolama ve destek birimi anahtarlama sinyalleri bu yük değerinde enerji üretimi biriminin yetersiz kalması ile birlikte alt anahtar için anahtarlama sinyali gönderilecek şekilde (deşarj durumu – yükseltici tip) değiştiği görülmektedir. Bu süreçte sistem çalışma durumu da ÇD 4'te olacak şekilde değiştirilmektedir. Yük değeri tekrar 25Ω, 50Ω ve 100Ω'ye yükseltildiğinde enerji üretim birimi yükü tek başına besleyebilir duruma gelmekte ve bu doğrultuda sistem ÇD 2'ye dönmektedir. Daha sonra senaryo gereği azalma eğilimine giren güneşlenme miktarı doğrultusunda önce ÇD 4, enerji üretimi biriminin devreden çıkması ile ÇD 5 ve enerji depolama ve destek biriminin de devreden çıkması ile ÇD 1'e tekrar dönüş gerçekleşmekte ve ilgili anahtarlama sinyalleri de bu doğrultuda değişim göstermektedir.



Şekil 7.49. Enerji Üretimi Birimi ve Enerji Depolama ve Destek Birimi Anahtarlama Sinyallerinin Değişimi (500W/m² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin)

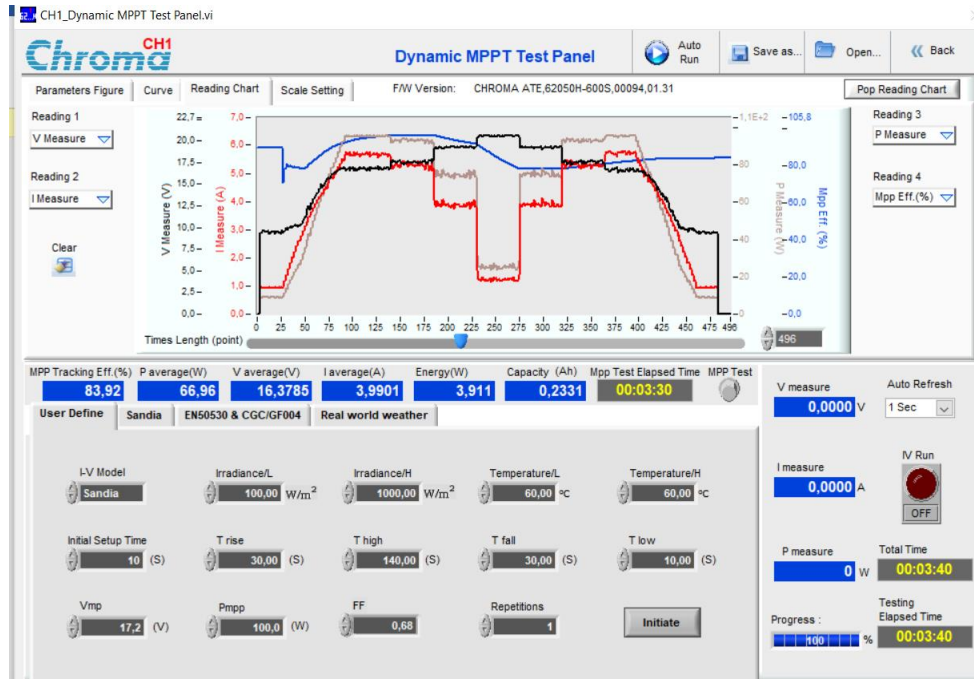
Aynı senaryo, test düzeneğinde güneşlenme miktarı 100W/m²'den 1000W/m²'ye ve tekrar 100W/m²'ye olacak şekilde değiştirilerek sistemin farklı yük durumlarına verdiği cevaplar incelenmiş elde edilen sonuçlar ise Şekil 7.50'de verilmiştir.

Burada önceki senaryodan farklı olarak, güneşlenme miktarının $1000\text{W}/\text{m}^2$ 'de sabit kalması ile birlikte belirlenen referans azami DC bara gücünün aşıldığı ve sistemin enerji depolama ve destek biriminin şarj durumunda (düşürücü tip) devrede olduğu ÇD 3'te çalıştığı görülmektedir. Bu esnada yük değeri 50Ω 'a daha sonra da 25Ω 'a düşürülmekte ve algoritma tarafından değiştirilen doluluk oranı doğrultusunda belirlenen referans azami DC bara gücü üzerinde üretilen güç bataryaya aktarılmakta ve sistem ÇD 3'te çalışmaya devam etmektedir. Yük değeri 13Ω 'a düşürüldüğünde ise enerji üretimi birimi, artık belirlenen referans azami DC bara gücün altında bir güç sağlayabildiğinden enerji depolama ve destek birimi devre dışı kalmaktadır. Bu süreçte sistem çalışma durumu da ÇD 2 olacak şekilde değiştirilmektedir. Daha sonra yük değeri tekrar 25Ω , 50Ω ve 100Ω ' yükseltildiğinde enerji üretim birimi belirlenen referans azami DC bara gücü üzerinde bir güç sağlayabilir duruma gelmekte ve bu doğrultuda sistem ÇD 3'e dönmektedir.



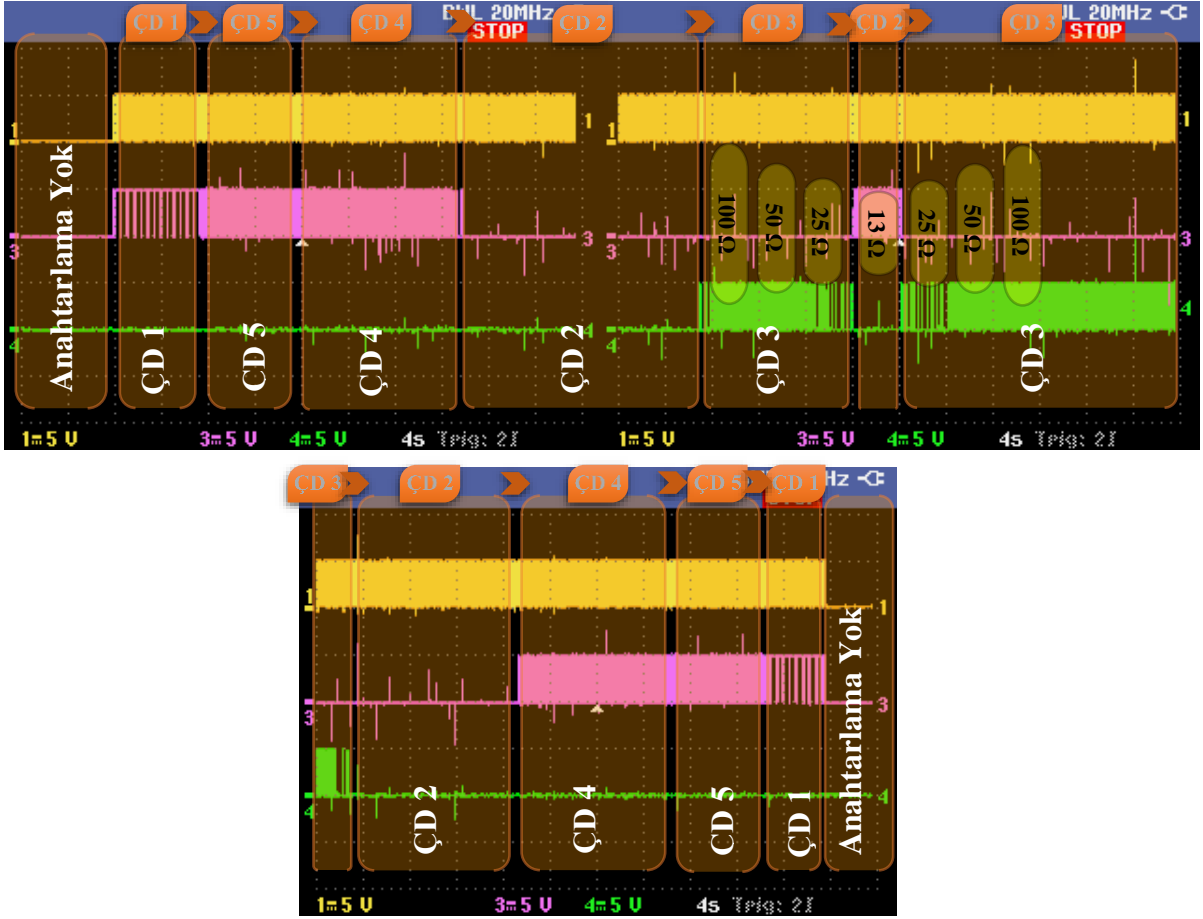
Şekil 7.50. Elde Edilen DC Bara Gerilimi, Akımı ve Gücü ve Batarya Gerilimi, Akımı ve Gücü ($1000\text{W}/\text{m}^2$ Işımmda 100Ω , 50Ω , 25Ω , 13Ω Yük Değişimi İçin)

Ayrıca bu senaryo süresince elde edilen enerji üretimi birimi akım (kırmızı), gerilim (siyah), güç (gri), ve MGNT başarım oranı (mavi) değerleri ve senaryo sonunda elde edilen MGNT başarım oranı Şekil 7.51’de verilmiştir.



Şekil 7.51. Enerji Üretimi Birimi Akım, Gerilim, Güç ve MGNT Başarım Oranı Değerleri ve Senaryo Sununda Elde Edilen MGNT Başarım Oranı (1000W/m² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin)

Enerji üretimi birimi, enerji depolama ve destek birimi anahtarlama sinyallerinin değişimi de Şekil 7.52’de verilmiştir. Burada önceki senaryodan farklı olarak, ışınım miktarı 1000W/m²’de sabit iken yük değeri 100Ω’den kademeli olarak 13Ω’a düşürülmekte 13Ω’a kadar değişim göstermeyen (şarj durumunda – düşürücü tip) enerji depolama ve destek birimi anahtarlama sinyallerinin, bu yük değerinde enerji üretimi biriminin belirlenen referans azami DC bara gücün altında bir güç sağlayabilmesi ile birlikte anahtarlama sinyali gönderilmeyecek şekilde (devre dışı) değiştiği görülmektedir. Bu süreçte sistem çalışma durumu da ÇD 2 olacak şekilde değiştirilmektedir. Daha sonra yük değeri tekrar 25Ω, 50Ω ve 100Ω’ yükseltildiğinde enerji üretim birimi belirlenen referans azami DC bara gücünün üzerinde bir güç güç sağlayabilir duruma gelmekte ve bu doğrultuda sistem ÇD 3’e dönmektedir.



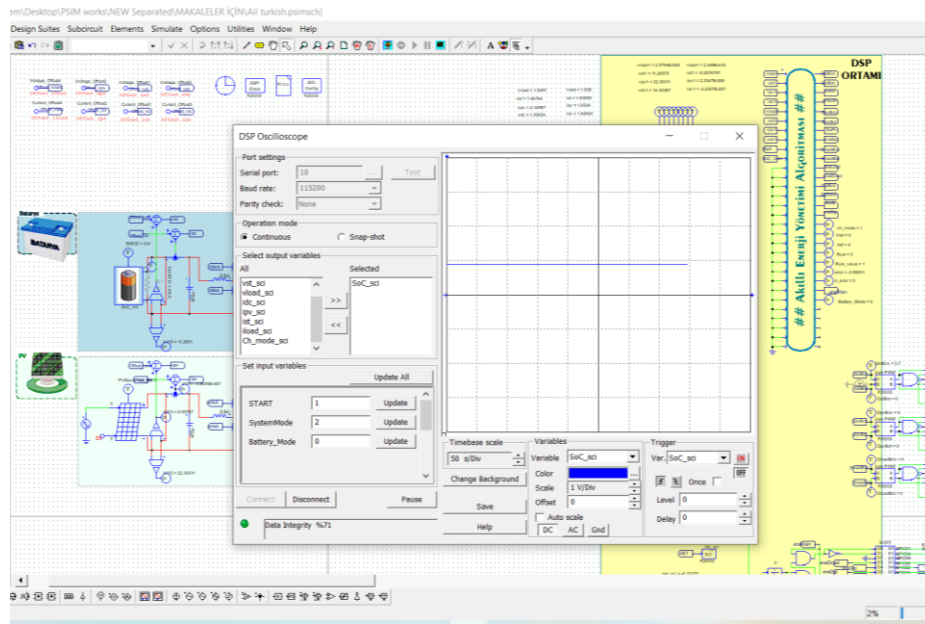
Şekil 7.52. Enerji Üretimi Birimi ve Enerji Depolama ve Destek Birimi Anahtarlama Sinyallerinin Değişimi (1000W/m² Işınımında 100Ω, 50Ω, 25Ω, 13Ω Yük Değişimi İçin)

7.4. SoC Belirleme Uygulama Çalışması Ve Sonuçları

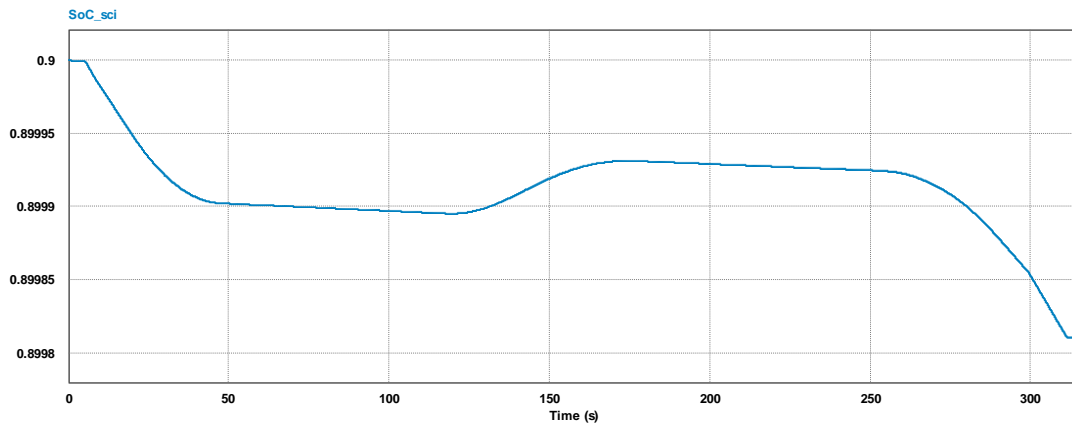
Tez kapsamında geliştirilen SoC belirleme algoritmasından, belirlenen bir güneşlenme senaryosu doğrultusunda, enerji sisteminin farklı çalışma durumları için elde edilen, enerji depolama ve destek birimi doluluk durumu değerindeki değişim Şekil 7.53 ve Şekil 7.54'te verilmiştir. Güneşlenme senaryosu, güneşlenme değeri 100W/m²'den 1000W/m²'ye ve tekrar 100W/m²'ye olacak şekilde; başlangıç ayarları için 10sn., belirlenen azami güneşlenme değerine yükselme için 120sn., bu değerde kalma için 30sn., belirlenen asgari güneşlenme değerine düşme için 120sn. ve bu değerde kalma için 10sn. olacak şekilde toplam 4dk. 50sn. süreli olarak belirlenmiştir.

YEK tabanlı enerji yönetim sisteminin PSIM programında geliştirilen benzetim modelinde, TTL dönüştürücü vasıtasıyla, DSP ile seri iletişim protokolü kullanılarak iletişim kurulmuş böylelikle ilgili yazılımın *DSP Oscilloscope* ekranı üzerinde, elde edilen SoC verisi gözlemlenmiştir. Şekil 7.53'de verilen *DSP Oscilloscope* ekranındaki görüntüde, belirlenen SoC değeri değişim göstermiyormuş gibi görünmektedir. Bu durum, 4dk. 50sn.'lik bir süre

içerisinde bu değerin gözlenmeye çalışılmasından kaynaklanmaktadır. Bu denli kısa bir sürede bir bataryanın doluluk durumunda oldukça küçük ($\approx 0,0002$) bir değişim göstermektedir. Şekil 7.54'te bu eğrinin büyütülmüş halinde ise bu küçük değişim daha rahat görülebilmektedir. Bu eğriye göre ilk anda batarya devre dışı olduğundan değişim göstermemekte daha sonra yalnızca batarya devrede olduğu için yüksek fakat PV panellerin devreye girmesi ile birlikte giderek azalan bir eğim ile azaldığı görülmektedir. Batarya devreden çıktığında yine değişmeyen bir doluluk durumu eğrisi daha sonra PV panellerden üretilen fazla güç ile şarj olan bir batarya için artan şarj bitiminde tekrar devre dışı olduğundan yine değişmeyen bir doluluk durumu eğrisi görülmektedir.



Şekil 7.53. Geliştirilen SoC Belirleme Algoritmasından Belirlenen Bir Güneşlenme Senaryosun Doğrultusunda Elde Edilen SoC Değerinin Değişimi – DSP Oscilloscope Ekranı



Şekil 7.54. Geliştirilen SoC Belirleme Algoritmasından Belirlenen Bir Güneşlenme Senaryosun Doğrultusunda Elde Edilen SoC Değerinin Değişimi – Büyütülmüş Hali

8. SONUÇ

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de artan enerji ihtiyacının tükenmekte olan ve oldukça fazla çevresel olumsuz etkileri bulunan fosil tabanlı enerji kaynakları tarafından karşılanma oranı giderek azalmaktadır. Bu doğrultuda fosil tabanlı enerji kaynakları, yerini sonsuz ve oldukça az çevresel olumsuz etkileri bulunmasıyla daha sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak görülen, YEK'lere bırakılmaktadır. Doğası gereği elde edilen enerji miktarının değişken ve kararsız olması gibi olumsuzlukları, enerji depolama sistemleri destekli geliştirilen birliktelikler ile ortadan kaldırılabilen YEK'lerin kullanım yaygınlığı, bu alandaki teşviklerin de etkisi ile her geçen gün artmaktadır. Şebekeden bağımsız, kendi enerjisini üreten ve hatta bazı durumlarda ihtiyaç duyduğundan daha fazla enerji üreten ve bunu bağlı bulunduğu elektrik şebekesine aktararak ek fayda da sağlayan YEK tabanlı sistemler, konut veya işletmeler tarafından tercih sebebi olmaktadır. Böylelikle, kendi enerjisini üreterek kendi kendine yetebilen, dışa bağımlılığı az, fazla ürettiği enerji ile de ekonomik fayda sağlayabilen; bireyler, işletmeler ve en nihayetinde ülkeler gerek ekonomik gerekse stratejik açıdan daha güçlü hale gelmektedir.

Bu tez çalışmasında, YEK'lerin kullanılması ile oluşturulan, bir enerji üretim birimi ve bir enerji depolama ve destek birimi ihtiva eden ve sisteme bağlanacak olan yük(ler)e talep ettiği gücü kararlı ve sürekli olarak aktarabilen bir şebekeden bağımsız doğru akım enerji yönetim sisteminin tasarımı, benzetimi ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan enerji yönetim sisteminde, enerji üretimi birimi için YEK ailesi içerisinde kendisine birçok uygulamada yaygın olarak kullanım alanı bulan güneş enerjisi tercih edilmiş ve bu doğrultuda PV paneller kullanılmıştır. Enerji depolama ve destek birimi için ise düşük maliyetleri ve bakım gereksinimleri az olan bataryalar tercih edilmiştir. Gerek bu birimlerin iç denetimleri gerekse bu birimler arasındaki enerji akışı ve yük talebinin kararlı ve sürekli bir şekilde karşılanmasının sağlanabilmesi için güç devreleri ve denetleme algoritmaları geliştirilmiştir. Bu güç devreleri ve denetleyici algoritmalar, enerji üretimi birimi için PV panellerin sürekli olarak maksimum güçte çalışmasını sağlayacak olan MGNT denetimini gerçekleştirirken enerji depolama ve destek birimi için ise şarj veya deşarj durumu denetimini gerçekleştirmektedir. Tüm bu denetimler için bulanık mantık ve bulanık mantık PID denetleyicili olmak üzere iki farklı denetleme algoritması geliştirilmiştir. Birimler arasındaki enerji akışı için kilit rol oynayan bataryaların SoC verisinin belirlenebilmesi için de ayrıca bir algoritma geliştirilmiştir.

Tasarlanan enerji yönetim sistemi için gerekli akım ve gerilim değerlerinin elde edilebilmesi için kullanılan ADC örnekleme frekansı ve denetim için kullanılan DC-DC

dönüştürücülerin anahtarlama frekansı 10 kHz olarak belirlenmiştir. Enerji yönetim sisteminin benzetim çalışmaları için PSIM yazılımı, uygulama çalışmaları için ise Texas Instruments firmasının ürettiği TMS320F28335 sayısal sinyal işlemcisi kullanılmıştır. Ayrıca benzetim yazılımının sunduğu gömülü kod üretimi desteği sayesinde işlemciye yüklenecek kontrol algoritması kodları otomatik olarak üretilmiştir. Böylelikle, farklı durumlar için farklı uygulamalar geliştirip test edebilmek çok daha kısa sürelerde mümkün olabilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen YEK tabanlı enerji yönetim sisteminde, enerji üretimi, enerji depolama ve destek birimleri ve sisteme bağlanacak yük(ler)in farklı durumları için yedi farklı sistem çalışma durumu belirlenmiştir. Geliştirilen denetim algoritmaları sayesinde her bir birimin durumundaki değişimler anlık olarak gözlenmekte ve sistemin genel çalışma durumu belirlenmektedir. Gerek sistemin gereksinimleri doğrultusunda anlık çalışma durumlarının değişimi gerekse ilgili çalışma durumunun gereksinimleri doğrultusunda DC-DC dönüştürücülerin anahtarlama sinyallerinin denetimi geliştirilen denetim algoritmaları tarafından otonom olarak gerçekleştirilmektedir. Ayrıca geliştirilen algoritmalar sayesinde sistemin çalışma durumu değişimleri esnasında daha az kararsızlık ve güç bozulması meydana gelmesi de sağlanmaktadır.

Yapılan literatür taramasında, YEK tabanlı, şebekeden bağımsız, PV panellerden meydana gelen bir enerji üretimi birimi, bataryalardan meydana gelen bir enerji depolama ve destek birimi içeren, PV paneller için MGNT denetiminin bataryalar için şarj veya deşarj denetiminin bulanık mantık ve bulanık mantık PID denetleyicili denetim algoritmaları kullanılarak gerçekleştirildiği, sistem çalışma durumlarının ve bu durumlardaki enerji akışının otonom olarak belirlendiği ve ayrıca batarya şarj durumunun da belirlenebildiği bir enerji yönetim sistemi ihtiva eden bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen YEK tabanlı enerji yönetim sisteminin, sahip olduğu denetim algoritmaları, güç sistemi topolojisi ve bu topolojinin sağladığı avantajlarla literatüre önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Ayrıca sadece DC yüklerle ve şebekeden bağımsız olarak çalışacak şekilde tasarlanan mevcut sistem, gücün de yükseltilmesi ile birlikte, bir evirici vasıtası ile AC yüklerle, bir doğrultucu vasıtası ile de şebeke bağlantılı olarak da çalışabilecektir. Bunun yanı sıra gerçekleştirilen enerji yönetim sistemi, algoritmalarında ve topolojisinde gerçekleştirecek çok küçük değişikliklerle; enerji üretim birimi için farklı güç değerleri veya farklı YEK türleri, enerji depolama ve destek birimi için farklı kapasite ve türde enerji depolama elemanları kullanılacak şekilde uyarlanabilmektedir.

Bu tez çalışmasında öne çıkan bazı sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Geliştirilen YEK tabanlı enerji yönetim sisteminde asgari güneşlenme durumunda (gece veya $0W/m^2$) enerji üretimi birimi tarafından güç üretilmemekte, DC bara 20W referans asgari güç değerine yalnızca enerji depolama ve destek birimi tarafından (deşarj durumunda, yükseltilerek) ulaştırılmaktadır. Azami güneşlenme durumunda (gündüz, öğlen veya $1000W/m^2$) ise enerji üretimi birimi tarafından yaklaşık 98W civarında bir güç üretilmekte, DC bara 60W referans azami güç değerine yalnızca enerji üretimi birimi tarafından (yükseltilerek) ulaştırılmaktadır. Bu durumda fazla üretilen güç (yaklaşık 11W) şarj edilmek sureti ile enerji depolama ve destek birimine (şarj durumunda, düşürülerek) aktarılmaktadır. Burada bir miktar güç, anahtarlama ve güç elemanları üzerinde (anahtarlama kayıpları) kaybolmaktadır. Azami ve asgari güneşlenme durumları arasında ise enerji depolama ve destek birimi ve yükün farklı durumlarına göre farklı çalışma durumlarında gerekli birimlere gerekli güç aktarımı sağlanmaktadır.
- Geliştirilen bulanık mantık ve bulanık mantık PID tabanlı denetleme algoritmaları, aynı koşullarda test edilebilmesi için tüm parametreler aynı olacak şekilde, değişen güneşlenme koşullarında, PV panellerin MGNT denetimi için işe koşularak benzetim ve uygulama çalışmaları yapılmıştır. Benzetim çalışmasında, bulanık mantık denetleyicili enerji yönetim algoritmasının MGNT denetiminde hatayı sıfıra yaklaştırma oranı $\approx\%90$ iken bulanık mantık PID denetleyicili enerji yönetim algoritmasında bu oran $\approx\%95$ olarak belirlenmiştir. Uygulama çalışmasında ise, bulanık mantık denetleyicili enerji yönetim algoritmasının MGNT başarımlı oranı $\%98,7$ olarak belirlenirken, bulanık mantık PID denetleyicili enerji yönetim algoritmasının MGNT başarımlı oranı $\%94,01$ olarak belirlenmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar Tablo 8.1’de özet olarak görülmektedir.
- Geliştirilen bulanık mantık ve bulanık mantık PID tabanlı denetleme algoritmaları, aynı koşullarda test edilebilmesi için tüm parametreler aynı olacak şekilde, değişen sistem çalışma durumlarında, DC-DC güç dönüştürücülerin denetimi için işe koşularak benzetim ve uygulama çalışmaları yapılmıştır. Benzetim çalışmasında, belirlenen referans değerlere, bulanık mantık denetleyicili enerji yönetim algoritmasının daha az salınım ile fakat nispeten daha yavaş, bulanık mantık PID denetleyicili enerji yönetim algoritmasının ise daha hızlı fakat daha fazla salınım ile ulaştığı belirlenmiştir. Uygulama çalışmasında ise, benzetim sonuçlarına yakın sonuçlar edilmekle birlikte

aradaki hız farkının uygulama çalışmalarında benzetim çalışmalarına nispetle çok fazla olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca, bulanık mantık PID denetleyicili enerji yönetim algoritmasının oluşan salınımdan dolayı daha agresif ve daha kararsız güç değişimlerine neden olduğu ve bu nedenle de özellikle küçük yük değerlerinde denetim esnasında yetersiz kaldığı görülmüştür. Sistem çalışma durumu değişimleri esnasında iki algoritma da yumuşak ve kararlı geçişler sağlarken yük değişimleri esnasında meydana gelen, spike olarak adlandırılan, anlık akım ve gerilim yükselmelerinin bulanık mantık PID denetleyicili enerji yönetim algoritması uygulamalarında nispeten büyük olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar Tablo 8.1’de özet olarak görülmektedir.

Tablo 8.1. Geliştirilen Bulanık Mantık ve Bulanık Mantık PID Denetleyici Algoritmalarının MGNT Denetimi ve Enerji Sistemi Denetimi İçin İşe Koşulmasından Elde Edilen Sonuçlar

	MGNT Denetimi		Enerji Sistemi Denetimi	
	Benzetim Çalışmaları	Uygulama Çalışmaları	Benzetim Çalışmaları	Uygulama Çalışmaları
Bulanık Mantık Denetleyici Algoritması	≈%90	%98,7	Yavaş Salınım az	<u>Sistem çalışma durumu geçişleri kararlı</u> <u>Anlık akım veya gerilim yükselmeleri küçük</u> <u>Tüm sistem çalışma durumlarında yük talebini karşılamada daha başarılı</u> Yavaş (çok az bir fark ile) Salınım az
Bulanık Mantık PID Denetleyici Algoritması	≈%95	%94,01	Hızlı Salınım fazla	<u>Sistem çalışma durumu geçişleri kararlı</u> Anlık akım veya gerilim yükselmeleri büyük Tüm sistem çalışma durumlarında yük talebini karşılamada (bazı çalışma durumlarında) başarısız <u>Hızlı (çok az bir fark ile)</u> Salınım fazla

- Geliştirilen YEK tabanlı enerji yönetim sisteminin denetimi için kilit rol oynayan enerji depolama ve destek birimini meydana getiren bataryaların SoC verisi, geliştirilen bir algoritma ile belirlenmiştir. İlgili algoritma ile elde edilen SoC verisi benzetim programında batarya modelinden elde edilen SoC verisi ile ≈%100 oranında örtüştüğü belirlenmiştir. Uygulama çalışmalarında ise referans alınarak başarımlar değerlendirilmesi yapılabilecek bir SoC verisi olmadığından yalnızca şarj deşarj durumuna uygun olarak

SoC değerinin değiştiği gözlenebilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar Tablo 8.2’de özet olarak görölmektedir.

Tablo 8.2. Geliştirilen SoC Belirleme Algoritmasından Elde Edilen Sonuçlar

	Benzetim alışmaları	Uygulama alışmaları
SoC Belirleme Algoritması	Benzetim programında batarya modelinden elde edilen SoC verisi ile örtüşme oranı $\approx\%100$	Enerji depolama ve destek birimi şarj/deşarj durumuna uygun değerler

Sonuç olarak, doğrusal olmayan sistem parametrelerine sahip, YEK’ler ve enerji depolama sistemleri içeren enerji yönetim sistemi uygulamalarında yetersiz kalan, klasik denetleme algoritmaları yerine, bulanık mantık veya bulanık mantık PID tabanlı denetleme algoritmalarının her ikisinin de kullanılabilirliği doğrulanmıştır.

Tez kapsamında geliştirilen YEK tabanlı enerji yönetim sistemi, sadece doğru akımda ve şebekeden bağımsız bir sistem olarak tasarlanmıştır. Gelecekteki alışmalar kapsamında, sisteme bir fazlı veya üç fazlı bir invertör topolojisi eklenerek, üretilen enerjinin talep edilenden fazla olduğu 3., 6. ve 7. Çalışma Durumları için, bu fazla enerjinin bağlı bulunulan elektrik şebekesine aktarılması sağlanacak, böylelikle ilk kurulum ve bakım maaliyetleri amorti edilebilir şekilde ek fayda sağlanabilecektir. Bu geliştirme aynı zamanda, tipik bir konut veya endüstri kuruluşu için oldukça gerekli olan AC yüklerle de alışılabilmesinin yolunu açacaktır.

Buna ek olarak sisteme bir doğrultucu topolojisi eklenerek yapılacak olan bir geliştirme sonucunda da enerji üretiminin ve depolama ve destek biriminin yüklerin talebini karşılayamadığı 1. ve 7. Çalışma Durumları için, bu eksik kalan enerjinin bağlı bulunulan elektrik şebekesinden karşılanması sağlanacak, böylelikle yüklerin daha kararlı ve sürekli olarak beslenebildiği bir enerji sistemi elde edilmiş olabilecektir. Ayrıca farklı tipte ve güçte YEK’lerden faydalanmak veya farklı tip ve kapasitede depolama ve destek elemanları kullanmak da sistemi geliştirme adına gerçekleştirilebilecek diğer ileri çalışmalar arasında sayılabilir.

Geliştirilen denetleme algoritmaları ve sistem topolojisinin, modüler yapısı sayesinde çok küçük değişiklikler yapılarak, bahsi geçen geliştirme ve iyileştirme çalışmalarının tamamının gerçekleştirilebilmesini mümkün kılacağı söylenebilir.

KAYNAKÇA

Acaroğlu, M. (2013). *Alternatif Enerji Kaynakları* (3. bs.). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.

Adhikari, S. (2013). *Control of Solar Photovoltaic (PV) Power Generation in Grid-Connected and Isolated Microgrids*. University of Tennessee.

Adhikari, S. & Li, F. (2014). Coordinated V-f and P-Q Control of Solar Photovoltaic Generators With MPPT and Battery Storage in Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(3), 1270–1281.

Alam, M. J. E., Muttaqi, K. M. & Sutanto, D. (2013). Mitigation of Rooftop Solar PV Impacts and Evening Peak Support by Managing Available Capacity of Distributed Energy Storage Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(4), 3874–3884.

Alam, M. J. E., Muttaqi, K. M. & Sutanto, D. (2016). Effective Utilization of Available PEV Battery Capacity for Mitigation of Solar PV Impact and Grid Support With Integrated V2G Functionality. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(3), 1562–1571.

Ali Akcayol, M. (2004). Application of adaptive neuro-fuzzy controller for SRM. *Advances in Engineering Software*, 35(3–4), 129–137.

Ali Khan, M. Y., Liu, H., Yang, Z. & Yuan, X. (2020). A Comprehensive Review on Grid Connected Photovoltaic Inverters, Their Modulation Techniques, and Control Strategies. *Energies*, 13(16), 1–40.

Altas, I. H. & Sharaf, A. M. (2008). A novel maximum power fuzzy logic controller for photovoltaic solar energy systems. *Renewable Energy*, 33(3), 388–399.

An, L. & Lu, D. D.-C. (2015). Design of a Single-Switch DC/DC Converter for a PV-Battery-Powered Pump System With PFM+PWM Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(2), 910–921.

Anderson, K. L., Blankenship, G. L. & Lebow, L. G. (1988). Rule-based adaptive PID controller. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control* (564–569).

Arjyadhara, P. & Chitralkha, J. (2013). Analysis of Solar PV cell Performance with Changing Irradiance and Temperature. *International Journal Of Engineering And Computer Science*, 2(1), 214–220.

Barca, G., Moschetto, A., Sapuppo, C., Tina, G. M., Giusto, R. & Grasso, A. D. (2008). An advanced SOC model for a stand-alone telecommunication system. *2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion* içinde (434–438). IEEE.

Barsali, S. & Ceraolo, M. (2002). Dynamical models of lead-acid batteries: implementation issues. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17(1), 16–23.

Basaran, K., Cetin, N. S. & Borekci, S. (2017). Energy management for on-grid and off-grid wind/PV and battery hybrid systems. *IET Renewable Power Generation*, 11(5), 642–649.

Bastos, R. F., Aguiar, C. R., Goncalves, A. F. Q. & Machado, R. Q. (2014). An Intelligent Control System Used to Improve Energy Production From Alternative Sources With DC/DC Integration. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(5), 2486–2495.

Baykal, N. & Beyan, T. (2004). *Bulanık Mantık, Uzman Sistemler ve Denetleyiciler*. Ankara: Bıçaklar Kitabevi.

Benyahia, N., Denoun, H., Badji, A., Zaouia, M., Rekioua, T., Benamrouche, N. & Rekioua, D. (2014). MPPT controller for an interleaved boost dc-dc converter used in fuel cell electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(27), 15196–15205.

Besli, N., Aktacir, M. A. & Yesilata, B. (2010). Fotovoltaik panellerin gerçek arazi koşullarında test ve karakterizasyonu. *Engineer and The Machinery Magazine*, 51(601), 21–28.

- Biswas, S., Huang, L., Vaidya, V., Ravichandran, K., Mohan, N. & Dhople, S. V.** (2016). Universal Current-Mode Control Schemes to Charge Li-Ion Batteries Under DC/PV Source. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 63(9), 1531–1542.
- Blumensaat, M.** (2016). *Control Strategies for Battery Energy Storage System Services Project Nordhavn*. Technical University of Denmark.
- Bodur, H.** (2017). *Güç Elektroniği* (5. bs.). Birsen Yayınevi.
- Cai, H., Xiang, J., Wei, W. & Chen, M. Z. Q.** (2018). Droop Control for PV Sources in DC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(9), 7708–7720.
- Çalışkan, E.** (2011). *Fotovoltaik Sistemler İçin DSP Temelli Güneş Çeviricisi Tasarımı ve Uygulaması*. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Chen, M.-C.** (2012). *An Intelligent Lead Acid Battery Management System for Solar and Off-Peak Energy Storage*. The University of Toledo.
- Chiang, S. J., Hsin-Jang Shieh & Ming-Chieh Chen.** (2009). Modeling and Control of PV Charger System With SEPIC Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(11), 4344–4353.
- Costabeber, A., Carraro, M. & Zigliotto, M.** (2015). Convergence Analysis and Tuning of a Sliding-Mode Ripple-Correlation MPPT. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(2), 696–706.
- Dali, M., Belhadj, J. & Roboam, X.** (2010). Hybrid solar-wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: Control and energy management - Experimental investigation. *Energy*, 35(6), 2587–2595.

Das, M. & Agarwal, V. (2015). Novel High-Performance Stand-Alone Solar PV System With High-Gain High-Efficiency DC–DC Converter Power Stages. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(6), 4718–4728.

Delbeke, J., Runge-Metzger, A., Slingenberg, Y. & Werksman, J. (2019). The Paris Agreement. *Towards a Climate-Neutral Europe* içinde (24–45). London: Routledge.

Delghavi, M. B., Shoja-Majidabad, S. & Yazdani, A. (2016). Fractional-Order Sliding-Mode Control of Islanded Distributed Energy Resource Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(4), 1482–1491.

Deveci, O. & Kasnaoğlu, C. (2016). Performance improvement of a photovoltaic system using a controller redesign based on numerical modeling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(29), 12634–12649.

Deutsches Institut für Normung E.V. (DIN). (1997). *DIN EN 60896-2*. [Erişim: 05.11.2022]

Dong, W. (2016). *Control Strategy for Grid-Connected Photovoltaic (PV) Battery System*. George Washington University.

Dunlop, J. P. & Farhi, B. N. (2001). Recommendations for Maximizing Battery Life in Photovoltaic Systems: A Review of Lessons Learned. *Solar Engineering 2001: (FORUM 2001: Solar Energy — The Power to Choose)* içinde (275–280). American Society of Mechanical Engineers.

Energy Statistics Data Browser, IEA. (2022). *International Energy Agency, IEA*. [Erişim: 5.11.2022, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser>]

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2021 Yılı Faaliyet Raporu. (2022). [Erişim: 11.03.2022, https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/SGB/tr/Faaliyet_Raporlari/2021/ETKB2021FR.pdf]

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Bilgi Merkezi. (2023). [Erişim: 10.02.2023, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>]

Esram, T. & Chapman, P. L. (2007). Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439–449.

Faranda, R., Leva, S., Milano, P. & Leonardo, P. (2008). Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems Department of Energy, 3(6), 446–455.

Fouad, M. M., Shihata, L. A. & Morgan, E. I. (2017). An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1499–1511.

Freris, L. & Infield, D. (2008). *Renewable Energy in Power Systems*. Wiley.

Garcia-Trivino, P., Torreglosa, J. P., Fernandez-Ramirez, L. M. & Jurado, F. (2018). Decentralized Fuzzy Logic Control of Microgrid for Electric Vehicle Charging Station. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6(2), 726–737.

Garcia, P., Garcia, C. A., Fernandez, L. M., Llorens, F. & Jurado, F. (2014). ANFIS-Based Control of a Grid-Connected Hybrid System Integrating Renewable Energies, Hydrogen and Batteries. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(2), 1107–1117.

Gavriluta, C., Member, S. & Candela, I. (2015). Adaptive Droop for Control of Multi-Terminal DC-bus Integrating Energy Storage. *{...} on Power Delivery*, 30(1), 16–24.

Gawthrop, P. J. (1990). Automatic tuning of commercial PID controllers. *Computer Control of Real-Time Processes* içinde (34–42). Institution of Engineering and Technology.

Ge, B., Liu, Y., Abu-Rub, H. & Peng, F. Z. (2018). State-of-Charge Balancing Control for a Battery-Energy-Stored Quasi-Z-Source Cascaded-Multilevel-Inverter-Based Photovoltaic Power System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(3), 2268–2279.

- Glavin, M. E., Chan, P. K. W., Armstrong, S. & Hurley, W. G.** (2008). A stand-alone photovoltaic supercapacitor battery hybrid energy storage system. *2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference* içinde (1688–1695). IEEE.
- Goli, P. & Shireen, W.** (2014). PV Integrated Smart Charging of PHEVs Based on DC Link Voltage Sensing. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(3), 1421–1428.
- Golsorkhi, M. S., Shafiee, Q., Lu, D. D.-C. & Guerrero, J. M.** (2017). A Distributed Control Framework for Integrated Photovoltaic-Battery-Based Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(6), 2837–2848.
- González, I., Ramiro, A., Calderón, M., Calderón, A. J. & González, J. F.** (2012). Estimation of the state-of-charge of gel lead-acid batteries and application to the control of a stand-alone wind-solar test-bed with hydrogen support. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(15), 11090–11103.
- Goswami, D. Y.** (2022). *Principles of Solar Engineering* (4th bs.). Boca Raton: CRC Press.
- Gules, R., De Pellegrin Pacheco, J., Hey, H. L. & Imhoff, J.** (2008). A Maximum Power Point Tracking System With Parallel Connection for PV Stand-Alone Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(7), 2674–2683.
- Haj-Ali, A. & Ying, H.** (2002). Structure analysis of Mamdani fuzzy PID controllers with nonlinear input fuzzy sets. *Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society - NAFIPS, 2002-Janua*, 19–21.
- Hang, C. C., Astrom, K. J. & Ho, W. K.** (1991). Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula. *IEE Proceedings D: Control Theory and Applications*, 138(2), 111–118.
- Hua, C. & Lin, J.** (2003). An on-line MPPT algorithm for rapidly changing illuminations of solar arrays. *Renewable Energy*, 28(7), 1129–1142.

- Huet, F.** (1998). A review of impedance measurements for determination of the state-of-charge or state-of-health of secondary batteries. *Journal of Power Sources*, 70(1), 59–69.
- Hund, T.** (1999). Capacity loss in PV batteries and recovery procedures. ... *PV Web site*, <http://www.sandia.gov/pv/bos/batteries>. ..., 1–12.
- Husnayain, F.** (2017). *Profile of 12-V Voltage-Regulated Lead-Acid Battery*. [Erişim: 05.11.2022, https://www.research.manchester.ac.uk/portal/files/61846817/full_text.pdf]
- I.E.A. - International Energy Agency.** (2022). *World Energy Outlook- WEO2022*. 2022. [Erişim: 5.11.2022, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>]
- Illindala, M. S., Piagi, P., Zhang, H., Venkataramanan, G. & Lasseter, R. H.** (2004). *Hardware Development of a Laboratory-Scale Microgrid Phase 2 : Operation and Control of a Two-Inverter Microgrid* [Erişim:11.02.2023]
- Indu Rani, B., Saravana Ilango, G. & Nagamani, C.** (2013). Control Strategy for Power Flow Management in a PV System Supplying DC Loads. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(8), 3185–3194.
- Islam, M. N., Rahman, M. Z. & Mominuzzaman, S. M.** (2014). The effect of irradiation on different parameters of monocrystalline photovoltaic solar cell. *2014 3rd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET)* (1–6).
- Iwasaki, T. & Morita, A.** (1990). Fuzzy auto-tuning for PID controller with model classification. *Proc. NAFIPS '90*, 90–93.
- Jackey, R. A.** (2007). A Simple, Effective Lead-Acid Battery Modeling Process for Electrical System Component Selection. *SAE Technical Papers* içinde (219–227).

Jain, C. & Singh, B. (2017). Solar Energy Used for Grid Connection: A Detailed Assessment Including Frequency Response and Algorithm Comparisons for an Energy Conversion System. *IEEE Industry Applications Magazine*, 23(2), 37–50.

Jang, J.-S. R., Sun, C.-T. & Mizutani, E. (1997). *Neuro-Fuzzy and Soft Computing A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence* (US Ed.). Pearson College Div.

Jha, R. R., Srivastava, S. C. & Kumar, M. (2017). Development of control schemes for a cluster of PV-integrated houses in islanded mode. *IET Renewable Power Generation*, 11(7), 903–911.

Kai Sun, Li Zhang, Yan Xing & Guerrero, J. M. (2011). A Distributed Control Strategy Based on DC Bus Signaling for Modular Photovoltaic Generation Systems With Battery Energy Storage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(10), 3032–3045.

Kaltschmitt, M., Streicher, W. & Wiese, A. (2007). *Renewable Energy*. (M. Kaltschmitt, W. Streicher ve A. Wiese, Ed.) *Renewable Energy: Technology, and Environment Economics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Kant, K., Jain, C. & Singh, B. (2017). A Hybrid Diesel-Wind-PV-Based Energy Generation System With Brushless Generators. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(4), 1714–1722.

Karafil, A. (2016). Temperature and Solar Radiation Effects on Photovoltaic Panel Power, 48–58.

Karimi, Y., Oraee, H., Guerrero, J. M., Vasquez, J. C. & Savaghebi, M. (2016). Method for load sharing and power management in a hybrid PV/battery source islanded microgrid. *2016 7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC)* içinde (C. 32, 652–657). IEEE.

- Karthikeyan, V. & Gupta, R.** (2017). Varying phase angle control in isolated bidirectional DC–DC converter for integrating battery storage and solar PV system in standalone mode. *IET Power Electronics*, 10(4), 471–479.
- Kazmierczuk, M. K.** (2015). *Pulse-width modulated DC-DC power converters. Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters.*
- Ke, B.-R., Ku, T., Ke, Y., Chuang, C.-Y. & Chen, H.-Z.** (2015). Sizing the Battery Energy Storage System on a University Campus with Prediction of Load and Photovoltaic Generation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(2), 1136–1147.
- Kewat, S., Singh, B. & Hussain, I.** (2018). Power management in PV-battery-hydro based standalone microgrid. *IET Renewable Power Generation*, 12(4), 391–398.
- Khajesalehi, J., Afjei, E., Hamzeh, M. & Sheshyekani, K.** (2015). High-performance hybrid photovoltaic -battery system based on quasi-Z-source inverter: application in microgrids. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 9(10), 895–902.
- Khorsandi, A., Ashourloo, M. & Mokhtari, H.** (2014). A Decentralized Control Method for a Low-Voltage DC Microgrid. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29(4), 793–801.
- Killi, M. & Samanta, S.** (2015). An Adaptive Voltage-Sensor-Based MPPT for Photovoltaic Systems With SEPIC Converter Including Steady-State and Drift Analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(12), 7609–7619.
- Kitamori, T.** (1979). A Method of Control System Design Based upon Partial Knowledge about Controlled Processes. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, 15(4), 549–555.
- Kocaman, B.** (2003). *Elektrik Enerjisi Üretim Santralleri.* Van: Birsen Yayınevi.

- Kollimalla, S. K., Mishra, M. K. & Narasamma, N. L.** (2014). Design and Analysis of Novel Control Strategy for Battery and Supercapacitor Storage System. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(4), 1137–1144.
- Kotra, S. & Mishra, M. K.** (2017). A Supervisory Power Management System for a Hybrid Microgrid With HESS. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(5), 3640–3649.
- Koutroulis, E., Kalaitzakis, K. & Voulgaris, N. C.** (2001). Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 16(1), 46–54.
- Krishan, R., Sood, Y. R. & Uday Kumar, B.** (2013). The simulation and design for analysis of photovoltaic system based on MATLAB. *2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability* içinde (647–651). IEEE.
- Kubalik, P., Misak, S., Stuchly, J., Vramba, J. & Uher, M.** (2014). Suitable energy storage in Off-Grid systems. *2014 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEEIC 2014 - Conference Proceedings* içinde (345–349).
- Kulaksiz, A. A.** (2007). *Maksimum Güç Noktası İzleyicili ve UVM İnverterli Fotovoltaik Sistemin Yapay Sinir Ağları ile Kontrolü*.
- Kumar, N., Hussain, I., Singh, B. & Panigrahi, B. K.** (2017). Single sensor based MPPT for partially shaded solar photovoltaic by using human psychology optimisation algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(10), 2562–2574.
- Küpelı, A. Ö.** (2005). *Güneş Pilleri ve Verimleri*. Osmangazi Üniversitesi.
- Lee, J., Zhang, P., Gan, L. K., Howey, D. A., Osborne, M. A., Tosi, A. & Duncan, S.** (2018). Optimal Operation of an Energy Management System Using Model Predictive Control and Gaussian Process Time-Series Modeling. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6(4), 1783–1795.

- Li, J., Wu, Z., Zhou, S., Fu, H. & Zhang, X.-P.** (2015). Aggregator service for PV and battery energy storage systems of residential building. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, *1*(4), 3–11.
- Li, X., Hui, D. & Lai, X.** (2013). Battery Energy Storage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *4*(2), 464–473.
- Lin, X., Wang, Y., Chang, N. & Pedram, M.** (2016). Concurrent Task Scheduling and Dynamic Voltage and Frequency Scaling in a Real-Time Embedded System With Energy Harvesting. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, *35*(11), 1890–1902.
- Lopez-Lapena, O.** (2018). Time-Division Multiplexing Control of Multi-Input Converters for Low-Power Solar Energy Harvesters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *65*(12), 9668–9676.
- Luque, A. & Hegedus, S. (Ed.).** (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Madaci, B., Chenni, R., Kurt, E. & Hemsas, K. E.** (2015). Design and control of a stand-alone hybrid power system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1–12.
- Maheswari, L., Srinivasa Rao, P., Sivakumaran, N., Saravana Ilango, G. & Nagamani, C.** (2017). A control strategy to enhance the life time of the battery in a stand-alone PV system with DC loads. *IET Power Electronics*, *10*(9), 1087–1094.
- Mahmood, H. & Jiang, J.** (2018). Autonomous Coordination of Multiple PV/Battery Hybrid Units in Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *9*(6), 6359–6368.

- Mahmood, H. & Jiang, J.** (2019). Decentralized Power Management of Multiple PV, Battery, and Droop Units in an Islanded Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(2), 1898–1906.
- Mahmud, N., Zahedi, A. & Mahmud, A.** (2017). A Cooperative Operation of Novel PV Inverter Control Scheme and Storage Energy Management System Based on ANFIS for Voltage Regulation of Grid-Tied PV System. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(5), 2657–2668.
- Mahmuddin, F., Yusran, A. M. & Klara, S.** (2017). On the use of an Arduino-based controller to control the charging process of a wind turbine. *AIP Conference Proceedings* içinde (C. 1814, 1–10).
- Mamdani, E. H. & Assilian, S.** (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1–13.
- Mao, M., Jin, P., Chang, L. & Xu, H.** (2014). Economic Analysis and Optimal Design on Microgrids With SS-PVs for Industries. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(4), 1328–1336.
- Marra, F., Yang, G., Traeholt, C., Ostergaard, J. & Larsen, E.** (2014). A Decentralized Storage Strategy for Residential Feeders With Photovoltaics. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2), 974–981.
- Masoum, M. A. S., Dehbonei, H. & Fuchs, E. F.** (2002). Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17(4), 514–522.
- McEvoy, A. J. (Augustin J., Markvart, T. & Castañer, L.** (2012). *Practical handbook of photovoltaics : fundamentals and applications*. Academic Press.
- Messenger, R. A. & Abtahi, A.** (2020). *Photovoltaic Systems Engineering* (4. bs.). CRC Press.

Mishra, P. P. & Fathy, H. K. (2019). Achieving Self-Balancing by Design in Photovoltaic Energy Storage Systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 27(3), 1151–1164.

Mohan, N., Undelandand, T. M. & Robbins, W. P. (1995). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd Edition* (2nd bs.). England: John Wiley & Sons Inc.

Nakir, İ. (2012). *Ulaşım Araçlarında Fotovoltaik Yapılar İçin Uygun Bir Maksimum Güç Takip Algoritması ile Verimliliğin Artırılması*. Yıldız Teknik Üniversitesi.

Natsheh, A. R., Natsheh, E. M. & Albarbar, A. (2013). Intelligent controller for managing power flow within standalone hybrid power systems. *IET Science, Measurement & Technology*, 7(4), 191–200.

Nejabatkhah, F., Danyali, S., Hosseini, S. H., Sabahi, M. & Niapour, S. M. (2012). Modeling and Control of a New Three-Input DC–DC Boost Converter for Hybrid PV/FC/Battery Power System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(5), 2309–2324.

Nor, N. M., Ali, A., Ibrahim, T. & Romlie, M. F. (2018). Battery Storage for the Utility-Scale Distributed Photovoltaic Generations. *IEEE Access*, 6, 1137–1154.

Olteanu, D. (2016). *Voltage Control of Hybrid Photovoltaic / Battery Power System for Low Voltage DC Micro grid*. Aalborg University.

Oncu, S. & Nacar, S. (2016). Soft switching maximum power point tracker with resonant switch in PV system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(29), 12477–12484.

Özden, T. (2014). *Şebeke Bağlantısız Fotovoltaik Sistemler İçin Çok Ajanlı Akıllı Güç Yönetimi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Öztürk, H. (2008). *Güneş Enerjisi ve Uygulamaları*. İstanbul: Birsen Yayınevi.

- Pascoe, P. E. & Anbuky, A. H.** (2000). VRLA battery capacity estimation using soft computing analysis of the coup de fouet region. *INTELEC. Twenty-Second International Telecommunications Energy Conference (Cat. No.00CH37131)* içinde (589–596). IEEE.
- Peter, P. K. & Agarwal, V.** (2012). On the Input Resistance of a Reconfigurable Switched Capacitor DC–DC Converter-Based Maximum Power Point Tracker of a Photovoltaic Source. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(12), 4880–4893.
- Piller, S., Perrin, M. & Jossen, A.** (2001). Methods for state-of-charge determination and their applications. *Journal of Power Sources*, 96(1), 113–120.
- Rahrah, K., Rekioua, D., Rekioua, T. & Bacha, S.** (2015). Photovoltaic pumping system in Bejaia climate with battery storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(39), 13665–13675.
- Renewable energy / Energy / OECD iLibrary.* (2022). [Erişim: 07.02.2023]
- Reverter, F. & Gasulla, M.** (2017). Optimal Inductor Current in Boost DC/DC Converters Regulating the Input Voltage Applied to Low-Power Photovoltaic Modules. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(8), 6188–6196.
- Rezkallah, M., Hamadi, A., Chandra, A. & Singh, B.** (2015). Real-Time HIL Implementation of Sliding Mode Control for Standalone System Based on PV Array Without Using Dumpload. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(4), 1389–1398.
- Rusch, W. & Stahlkopf, I.** (2009). Reliable Power Supply for Remote Telecom Facilities. *4th International Telecommunication - Energy special conference* içinde (1–6).
- Salve, R.** (2014). *PV Based Converter With Integrated Battery Charger for DC Microgrid Applications.*

- Santos, J. L., Antunes, F., Chehab, A. & Cruz, C.** (2006). A maximum power point tracker for PV systems using a high performance boost converter. *Solar Energy*, 80(7), 772–778.
- Sauer, D. U., Bopp, G., Jossen, A., Garche, J., Rothert, M. & Wollny, M.** (1999). State of charge - What do we really speak about? *The 21st International Telecommunications Energy Conference*, (February 2016), 1–6.
- Saxena, N., Hussain, I., Singh, B. & Vyas, A. L.** (2018). Implementation of a Grid-Integrated PV-Battery System for Residential and Electrical Vehicle Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(8), 6592–6601.
- Sayema Shahiidul.** (2011). *A Generalized Model of Grid Connected Photovoltaic System with Maximum Power Point Tracking Control*. Yıldız Technical University.
- Schlemmer, W., Selinger, J., Hobisch, M. A. & Spirk, S.** (2021). Polysaccharides for sustainable energy storage – A review. *Carbohydrate Polymers*, 265, 1–16.
- Sechilariu, M., Wang, B. & Locment, F.** (2013). Building Integrated Photovoltaic System With Energy Storage and Smart Grid Communication. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(4), 1607–1618.
- Sekhar, P. C. & Mishra, S.** (2016). Storage Free Smart Energy Management for Frequency Control in a Diesel-PV-Fuel Cell-Based Hybrid AC Microgrid. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 27(8), 1657–1671.
- Serban, E. & Serban, H.** (2010). A Control Strategy for a Distributed Power Generation Microgrid Application With Voltage- and Current-Controlled Source Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(12), 2981–2992.
- Seul-Ki Kim, Jin-Hong Jeon, Chang-Hee Cho, Jong-Bo Ahn & Sae-Hyuk Kwon.** (2008). Dynamic Modeling and Control of a Grid-Connected Hybrid Generation System With Versatile Power Transfer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(4), 1677–1688.

- Sharma, R. K. & Mishra, S.** (2018). Dynamic Power Management and Control of a PV PEM Fuel-Cell-Based Standalone ac/dc Microgrid Using Hybrid Energy Storage. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(1), 526–538.
- Shaw, P.** (2015). *Modeling and Control of a Battery Connected Standalone Photovoltaic System*. National Institute of Technology Rourkela.
- Sota, E., Ojo, O. & Khayamy, M.** (2014). Non-linear controller approach for an autonomous battery-assisted photovoltaic system feeding an AC load with a non-linear component. *IET Renewable Power Generation*, 8(8), 838–848.
- Stimoniaris, D., Tsiamitros, D. & Dialynas, E.** (2016). Improved Energy Storage Management and PV-Active Power Control Infrastructure and Strategies for Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(1), 813–820.
- Sugeno, M.** (1993). FUZZY MEASURES AND FUZZY INTEGRALS—A SURVEY. *Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems* içinde (251–257). Elsevier.
- Sugeno, M. & Kang, G.** (1988). Structure identification of fuzzy model. *Fuzzy Sets and Systems*, 28(1), 15–33.
- Sun, X., Liu, B., Cai, Y., Zhang, H., Zhu, Y. & Wang, B.** (2016). Frequency-based power management for photovoltaic/battery/fuel cell-electrolyser stand-alone microgrid. *IET Power Electronics*, 9(13), 2602–2610.
- Tavlaşoğlu, Y.** (2015). *Evsel Uygulamalar İçin Bir Çift Girişli İzolesiz DC -DC Dönüştürücü ile PV - Batarya Hibrit Sisteminin Tasarımı ve Uygulanması*. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Teleke, S., Baran, M. E., Bhattacharya, S. & Huang, A. Q.** (2010). Rule-Based Control of Battery Energy Storage for Dispatching Intermittent Renewable Sources. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 1(3), 117–124.

- Thang, T. V, Ahmed, A., Kim, C. & Park, J.** (2015). Flexible System Architecture of Stand-Alone PV Power Generation With Energy Storage Device. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(4), 1386–1396.
- Thirugnanam, K., Kerk, S. K., Yuen, C., Liu, N. & Zhang, M.** (2018). Energy Management for Renewable Microgrid in Reducing Diesel Generators Usage With Multiple Types of Battery. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(8), 6772–6786.
- TMS320F2833x , TMS320F2823x Real-Time Microcontrollers Datasheet.** (2022). [Erişim: 05.01.2023, <https://www.ti.com/lit/gpn/tms320f28335>]
- Türk Standartları Enstitüsü (TSE).** (2006). *TS 1352-3 EN 60896-22*. [Erişim: 07.11.2022]
- Vácha, M., Kodymová, J. & Lapčík, V.** (2021). Life-cycle assessment of a photovoltaic panel: Assessment of energy intensity of production and environmental impacts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1209(1), 1–8.
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R. & Filho, E. R.** (2009). Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), 1198–1208.
- Wang, L., Bai, F., Yan, R. & Saha, T. K.** (2018). Real-Time Coordinated Voltage Control of PV Inverters and Energy Storage for Weak Networks With High PV Penetration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(3), 3383–3395.
- Wang, Y., Liu, Y., Wang, C., Li, Z., Sheng, X., Lee, H. G., ... Yang, H.** (2016). Storage-Less and Converter-Less Photovoltaic Energy Harvesting With Maximum Power Point Tracking for Internet of Things. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 35(2), 173–186.

Wenhua Zhu, Shanshui Yang, Li Wang & Linglu Luo. (2011). Modeling and analysis of output features of the solar cells based on MATLAB/Simulink. *2011 International Conference on Materials for Renewable Energy & Environment* içinde (730–734). IEEE.

Wijewardana, S. M. (2016). *Mathematical Modelling and Control of Renewable Energy Systems and Battery Storage Systems*. Queen Mary, University of London.

Xie, M., Ruan, J., Bai, W., Qiao, Q., Bai, L., Zhang, J., ... Fu, H. (2018). Pollutant payback time and environmental impact of Chinese multi-crystalline photovoltaic production based on life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 184, 648–659.

Xiong Liu, Peng Wang & Poh Chiang Loh. (2011). A Hybrid AC/DC Microgrid and Its Coordination Control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(2), 278–286.

Yang, Y., Ye, Q., Tung, L. J., Greenleaf, M. & Li, H. (2018). Integrated Size and Energy Management Design of Battery Storage to Enhance Grid Integration of Large-Scale PV Power Plants. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(1), 394–402.

Ye Zhang, Hong Jie Jia & Li Guo. (2012). Energy management strategy of islanded microgrid based on power flow control. *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)* içinde (1–8). IEEE.

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM). (2014). [Erişim: 7.04.2014, <http://www.eie.gov.tr/>]

Yıldız, G., Çalış, B., Gürel, A. E. & Ceylan, İ. (2020). Investigation of life cycle CO₂ emissions of the polycrystalline and cadmium telluride PV panels. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 14, 1–11.

Zadeh, L.A. (1996). Fuzzy logic = computing with words. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 4(2), 103–111.

Zadeh, Lotfi A. (1994). Fuzzy logic, neural networks, and soft computing. *Communications of the ACM*, 37(3), 77–84.

Zeddini, M. A., Pusca, R., Sakly, A. & Mimouni, M. F. (2016). PSO-based MPPT control of wind-driven Self-Excited Induction Generator for pumping system. *Renewable Energy*, 95, 162–177.

Zekai, Ş. (2008). *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques* (1. bs.). London: Springer London.

Zeng, J., Qiao, W. & Qu, L. (2015). An Isolated Three-Port Bidirectional DC–DC Converter for Photovoltaic Systems With Energy Storage. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(4), 3493–3503.

Zeraati, M., Hamedani Golshan, M. E. & Guerrero, J. M. (2018). Distributed Control of Battery Energy Storage Systems for Voltage Regulation in Distribution Networks With High PV Penetration. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(4), 3582–3593.

Zhang, G., Tang, X. & Qi, Z. (2010). Research on Battery Supercapacitor Hybrid Storage and its application in MicroGrid. *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference* içinde (1–4). IEEE.

Zhao, J., Iu, H. H. C. & Fernando, T. (2017). A Design of Single-Switch Two-Stage DC-DC Converters With PWM And PFM for Off-Grid Solar Power System, 3(3), 44–51.

Zhao, Z. Y., Tomizuka, M. & Isaka, S. (1992). Fuzzy gain scheduling of PID controllers. *Proceedings of the 1st IEEE Conference on Control Applications, CCA 1992* içinde (698–703). IEEE.

Zhu, H., Zhang, D., Athab, H., Wu, B. & Gu, Y. (2014). PV Isolated Three-Port Converter and Energy Balancing Control Method for PV-Battery Power Supply Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(6), 3595–3606.

Ziegler, J. G. & Nichols, N. B. (1993). Optimum settings for automatic controllers. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 115(2B), 220–222.

Zimmermann, H.-J. (2001). *Fuzzy Set Theory—and Its Applications. Fuzzy Set Theory—and Its Applications*. Dordrecht: Springer Netherlands.