

**YERSABİT YÖRÜNGE UYDULAR İÇİN YÜKSEK VERİMLİ
GÜNEŞ PANELİ REGÜLATÖRÜ TASARIMI VE
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF HIGH EFFICIENCY
SOLAR ARRAY REGULATOR FOR GEOSYNCHRONOUS
ORBIT SATELLITES**

DOĞACAN YILDIRIM

PROF. DR. UĞUR BAYSAL

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2024

ÖZET

YERSABİT YÖRÜNGE UYDULAR İÇİN YÜKSEK VERİMLİ GÜNEŞ PANELİ REGÜLATÖRÜ TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

DOĞACAN YILDIRIM

Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Danışman: Prof. Dr. Uğur BAYSAL

Mayıs 2024, 116 sayfa

Bu tez çalışmasında, tam regüle bara yapısında sahip uydu elektriksel güç alt sisteminde kullanılmak üzere bir güç dönüştürücü tasarlanmıştır. Tasarlanan dönüştürücüde, geleneksel tam regüle bara sistemlerinde ayrı birimler altında kullanılan pil şarj ve güneş paneli regülasyonu işlevleri tek bir topoloji altında toplanmıştır. Tez çalışması kapsamında tasarlanan güneş paneli regülatörü, literatürde S4R olarak tanımlanan topolojiye sahip olmakla birlikte, tüm operasyonel çalışma modlarını kapsaması ve bu modların kart seviyesindeki uygulamaları açısından literatürdeki benzer çalışmalara göre farklılık göstermektedir. Tasarlanan güneş paneli regülatörünün giriş gerilimi 105-140V, çıkış gerilimi ise, ana barada regüle 100V, pilde ise 60-84V olacak şekilde seçilmiştir. Dönüştürücü, 100V ana bara çıkış gücü 500W, pil şarj çıkış gücü ise 210W olacak şekilde tasarlanmıştır. Güneş paneli regülatörü sabit akım, sabit gerilim ve lineer mod olmak üzere 3 farklı pil şarj moduna sahiptir. Maksimum 1 kHz anahtarlama olacak şekilde devre bileşenleri ve kontrolcü parametreleri belirlenmiştir. Geleneksel bir düşürücü tip pil şarj düzenleyici yaklaşık %92 verime sahipken, tasarlanan güneş paneli regülatörü ile pil şarj verimi %98'lerin üzerine çıkarılmıştır. Güneş paneli regülatörüne farklı yük akımı, şarj akımı ve pil gerilimi altında işlevsel testler uygulanmıştır. Dönüştürücünün çalışma modları

benzetim ortamında ve daha sonra test ortamında doğrulanmıştır. Yapılan çalışmalar ışığında gerçekleştirilen güneş paneli regülatörünün uydu güç alt sistemlerinde kullanımının avantaj ve dezavantajları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uydu Güç Sistemleri, Güneş Paneli Regülatörü, Pil Şarj Düzenleyici, Sabit Akım Şarjı, Sabit Gerilim Şarjı, Güneş Paneli

ABSTRACT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF HIGH EFFICIENCY SOLAR ARRAY REGULATOR FOR GEOSYNCHRONOUS ORBIT SATELLITES

Doğacan YILDIRIM

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Uğur BAYSAL

May 2024, 116 pages

In this thesis, a power converter is designed to be used in a fully regulated bus structure satellite electrical power subsystem. In the designed converter, battery charging and solar array regulation functions, which are used as separate units in conventional fully regulated busbar systems, are combined under a single topology. Although the solar array regulator designed in this thesis has the topology defined as S4R in the literature, it differs from similar studies in the literature in terms of its coverage of all operational operating modes and the board-level applications of these modes. The input voltage of the designed solar array regulator is 105-140V and the output voltage is selected to be 100V regulated at the main bus and 60-84V at the battery. The converter is designed so that the 100V main bus output power is 500W and the battery charging output power is 210W. The solar array regulator has 3 different battery charging modes: constant current, constant voltage and linear mode. The circuit components and controller parameters were determined with a maximum switching rate of 2 kHz. While a conventional buck-type battery charge regulator has an efficiency of about 92%, the battery charge efficiency is increased to over 98% with the designed solar array regulator. Functional tests were performed on the solar array regulator under different

load current, charging current and battery voltage. The operating modes of the converter were verified in the simulation environment and then in the test environment. In the light of the studies, the advantages and disadvantages of using the designed solar array regulator in satellite power subsystems are analyzed.

Keywords: Satellite Electrical Power System, Solar Array Regulator, Battery Charge Regulator, Constant Current Mode Charge, Constant Voltage Mode Charge, Solar Array

TEŞEKKÜR

Lisansüstü tez alışmam boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım sayın Prof. Dr. Uğur BAYSAL'a,

Tez alışmalarım boyunca manevi desteklerini her zaman hissettiğim değerli eşim Gül Yesa YILDIRIM ve canım oğlum Uras YILDIRIM'a,

Gösterdikleri destek ve anlayıştan dolayı Berk İNCE ve Ozan Can İYİER başta olmak üzere TÜBİTAK UZAY'daki tüm ekip arkadaşlarıma,

Teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. UYDULAR VE ALT SİSTEMLERİ.....	5
2.1. Uydu Alt Sistemleri	7
2.1.1. Yörünge ve Yönelim Kontrol Alt Sistemi	7
2.1.2. Telemetri, Telekomut ve Mesafe Ölçüm Alt Sistemi	8
2.1.3. Uydu Yönetim Alt Sistemi	9
2.1.4. Güç Alt Sistemi	10
2.1.5. Isıl Kontrol Alt Sistemi	10
2.1.6. Yapısal Alt Sistemi.....	11
2.1.7. İtki Alt Sistemi	11
3. UYDU ELEKTRİKSEL GÜÇ ALT SİSTEMİ	12
3.1. Güç Üretim - Güneş Paneli.....	14
3.1.1. Uzay Uygulamalarına Yönelik Güneş Hücreleri	15
3.1.2. Güneş Hücresi Eşdeğer Devresi	17
3.1.3. Güneş Hücresi I-V ve P-V karakteristiği	18
3.1.4. Sıcaklık Değişiminin Güneş Hücreleri Üzerindeki Etkisi.....	19
3.1.5. Aydınlanmanın Güneş Hücreleri Üzerindeki Etkisi	20
3.2. Enerji Depolama - Piller	21
3.3. Güç Düzenleme ve Dağıtım.....	25
4. GÜNEŞ PANELİ REGÜLASYON YÖNTEMLERİ.....	27

4.1. Azami Güç Noktası Takibi	28
4.2. Doğrudan Enerji Transferi	29
4.3. Yöntemlerin Karşılaştırılması	33
5. ŞÖNT DÜZENLEYİCİLER	34
5.1. Lineer Şönt Düzenleyici	34
5.2. Sıralı Lineer Şönt Düzenleyici	35
5.3. Anahtarlamalı Şönt Düzenleyici	36
5.4. Parçalı Şönt Düzenleyici	39
5.5. Anahtarlamalı Sıralı Şönt Düzenleyici	40
5.6. Anahtarlamalı Sıralı Şönt Seri Düzenleyici	41
5.7. Şönt Düzenleyicilerin Uzay Endüstrisindeki Uygulamaları	43
6. GÜNEŞ PANELİ DÜZENLEYİCİ TASARIMI	47
6.1. S4R Temelli Güneş Paneli Düzenleyici Çalışma Modları	49
6.2. Tasarım Parametreleri ve Devre Bileşenlerinin Seçilmesi	52
6.2.1. Güneş Paneli Düzenleyici Çalışma Frekansının Belirlenmesi	53
6.2.2. Ana Bara Gerilim Dalgalanması Limitlerinin Belirlenmesi	54
6.2.3. Ana Bara Kapansitans Değerinin Belirlenmesi	55
6.2.4. Anahtarlama Elemanlarının Seçilmesi	55
6.2.5. Çıkış Diyotunun Seçilmesi	56
6.3. Güneş Paneli Düzenleyici Kayıp Analizi	57
6.3.1. Ana Bara Regülasyonu Kayıp Analizi	58
6.3.2. Pil Şarjı Kayıp Analizi	58
6.4. Güneş Paneli Düzenleyici Baskı Devre Kartının Tasarlanması	59
7. BENZETİM BULGULARI	60
7.1. Benzetim Blokları	63
7.1.1. Anahtarlama Bloğu	63
7.1.2. Kontrol Bloğu	65
7.1.3. Sürücü Bloğu	70
8. DONANIM TEST BULGULARI	76
8.1. Test Ortamı ve Kullanılan Cihazlar	76

8.2. Dahili Güç Kaynağı Çıkışlarının Kontrolü	76
8.3. Kapasitör Bankası Ölçümü.....	78
8.4. Sabit Akım ve Sabit Gerilim Referens Değerlerini Üretilmesi.....	78
8.5. Ana Bara Regülasyonu	79
8.6. Pil Şarjı.....	84
9. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 Hücre Teknolojilerinin Karşılaştırılması	24
Çizelge 4.1 DET ve AGNT mimarilerinin avantaj ve dezavantajları [1]	34
Çizelge 6.1 Güneş Paneli Düzenleyici Tasarım Parametreleri	53
Çizelge 6.2 S4R MOSFET Teknik Özellikleri	56
Çizelge 9.1 Benzetim ve Test Sonuçları Karşılaştırılması	93

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1 Elektriksel Güç Alt Sistemi Basitleştirilmiş Blok Diyagramı.....	13
Şekil 3.2 Açılabilir Güneş Paneli Yapısı [2].....	14
Şekil 3.3 3G30 Güneş Hücresi Yapısı [3]	15
Şekil 3.4 4G32 Güneş Hücresi Yapısı [3]	15
Şekil 3.5 3G30 (Kesik çizgili) ve 4G32 (Düz çizgili) güneş hücreleri kuantum verimliliği [3].....	16
Şekil 3.6 Altlık üzerine monte edilmiş güneş hücreleri [2]	16
Şekil 3.7 Güneş Hücresi Eşdeğer Devresi [1]	17
Şekil 3.8 Güneş paneli akım-gerilim eğrisi [4].....	19
Şekil 3.9 Güneş paneli güç-gerilim eğrisi [4]	19
Şekil 3.10 Farklı sıcaklıklarda akım-gerilim eğrisi [4].....	20
Şekil 3.11 Farklı sıcaklıklarda güç-gerilim eğrisi [4]	20
Şekil 3.12 Aydınlanmanın I-V eğrisi üzerindeki etkisi	21
Şekil 3.13 Aydınlanmanın P-V eğrisi üzerindeki etkisi	21
Şekil 3.14 P20 Hücresi Deşarj Karakteristiği [5].....	23
Şekil 3.15 Li-iyon Pil Şarj Operasyonu [6]	23
Şekil 3.16 Hücre Teknolojilerinin Karşılaştırılması [7]	24
Şekil 3.17 Güç Düzenleme Birimi Blok Diyagramı.....	25
Şekil 3.18 Yarı Regüle ve Regüle Olmayan Bara Mimarileri	26
Şekil 4.1 Regüle Olmayan Bara Yapıları için AGNT ve DET Mimarileri	28
Şekil 4.2 Güneş Paneli Azami Güç Noktası.....	29
Şekil 4.3 AGNT Yöntemi Kullanılan Seri Düzenleyici Yapısı [8]	29
Şekil 4.4 DET Mimarisi Basitleştirilmiş Diyagramı	30
Şekil 4.5 Şönt Düzenleyici Operasyon Noktası	31
Şekil 4.6 Şönt Düzenleyici Tarafından Harcanan Güç	31
Şekil 4.7 DET Mimarisi Operasyonel Modları.....	33

Şekil 5.1	Lineer Şönt Düzenleyici	35
Şekil 5.2	Sıralı Lineer Şönt Düzenleyici	36
Şekil 5.3	Anahtarlama Şönt Düzenleyici.....	37
Şekil 5.4	Anahtarlama şönt düzenleyici sınır döngüsü operasyonu	38
Şekil 5.5	Parçalı Şönt Düzenleyici.....	39
Şekil 5.6	S3R Topolojisi.....	40
Şekil 5.7	S4R Blok Diyagramı.....	42
Şekil 5.8	TÜBİTAK UZAY Güç Düzenleme Birimi [9].....	43
Şekil 5.9	AIRBUS Güç Düzenleme Birimi [10]	44
Şekil 5.10	TÜBİTAK UZAY Güneş Paneli Regülatörü [11].....	44
Şekil 5.11	AIRBUS Güç Modülü [10]	45
Şekil 5.12	ASP Equipments GmbH Güneş Paneli Regülatörü	46
Şekil 6.1	Güneş Paneli Düzenleyici Blok Diyagramı	47
Şekil 6.2	Güneş Paneli Düzenleyicisi Şönt Modu (S3R)	50
Şekil 6.3	Güneş Paneli Düzenleyicisi Diyot Modu (S3R)	50
Şekil 6.4	Güneş Paneli Düzenleyicisi Anahtarlama Modu (S3R)	50
Şekil 6.5	Güneş Paneli Düzenleyici Düşük yük şarj modu (S4R).....	51
Şekil 6.6	Güneş Paneli Düzenleyici Azami yük şarj modu (S4R).....	51
Şekil 6.7	Güneş Paneli Düzenleyici Üst Katman.....	61
Şekil 6.8	Güneş Paneli Düzenleyici Alt Katman	61
Şekil 6.9	Güneş Paneli Düzenleyici Üst Katman 3D	62
Şekil 6.10	Güneş Paneli Düzenleyici Alt Katman 3D	62
Şekil 6.11	Güneş Paneli Düzenleyici ve Kapasitör Bloğu	63
Şekil 7.1	Güneş Paneli Düzenleyici Anahtarlama Bloğu	64
Şekil 7.2	Ana Bara Gerilimi (CH1) ve Kapı-Kaynak Gerilimi (CH2) Benzetim Sonucu	65
Şekil 7.3	Ana Bara Gerilimi (CH1) ve Akaç-Kaynak Gerilimi (CH2) Benzetim Sonucu	66
Şekil 7.4	Ana Hata Yükselticisi (MEA)	66
Şekil 7.5	Ana Bara Gerilimi (CH1) ve MEA (CH2) Gerilimi Benzetim Sonucu...	67

Şekil 7.6	Pil Şarj Kontrol Döngüsü (BEA)	68
Şekil 7.7	Pil şarj hata sinyali benzetimi, 0.6A şarj akımı (CH1)	68
Şekil 7.8	Pil şarj hata sinyali benzetimi, 1.1A şarj akımı (CH1)	69
Şekil 7.9	Pil şarj hata sinyali benzetimi, 2.25A şarj akımı (CH1)	69
Şekil 7.10	Histeresis Komparatör ve Sürücü Devresi	70
Şekil 7.11	Sabit akım modu (düşük yük) benzetimi, 0.6A şarj akımı (CH1)	71
Şekil 7.12	Sabit akım modu (düşük yük) benzetimi, 1.1A şarj akımı (CH1)	71
Şekil 7.13	Sabit akım modu (düşük yük) benzetimi, 2.25A şarj akımı (CH1)	72
Şekil 7.14	Sabit akım modu (azami yük) benzetimi, 0.6A şarj akımı (CH1)	72
Şekil 7.15	Sabit akım modu (azami yük) benzetimi, 1.1A şarj akımı (CH1)	73
Şekil 7.16	Sabit akım modu (azami yük) benzetimi, 1.75A şarj akımı (CH1)	73
Şekil 7.17	Lineer bölge şarjı benzetimi, 0.5A şarj akımı (CH1)	74
Şekil 7.18	Lineer bölge şarjı benzetimi, 1A şarj akımı (CH1)	74
Şekil 7.19	Lineer bölge şarjı benzetimi, 2A şarj akımı (CH1)	75
Şekil 7.20	Sabit gerilim modu pil şarjı benzetimi	75
Şekil 8.1	Güneş Paneli Düzenleyici Test Düzeneği	77
Şekil 8.2	$\pm 15V$ ve $5V$ Dahili Gerilim Çıkışları	77
Şekil 8.3	Kapasitör Bankası Ölçümü	78
Şekil 8.4	Sabit akım ve sabit gerilim referans ölçümleri	79
Şekil 8.5	Ana Bara Gerilim Dalgalanması (CH3-Mavi) ve Maksimum Çalışma Frekans (CH1-Sarı)	79
Şekil 8.6	Ana bara gerilimi (CH3-Mavi) ve Akaç-Kaynak Gerilimi (0.4A yük) (CH1-Sarı)	80
Şekil 8.7	Ana bara gerilimi (CH3-Mavi) ve Akaç-Kaynak Gerilimi (2A yük) (CH1-Sarı)	80
Şekil 8.8	Ana bara gerilimi (CH3-Mavi) ve Kapı-Kaynak Gerilimi (0.4A yük) (CH1-Sarı)	81
Şekil 8.9	Ana bara gerilimi (CH3-Mavi) ve Kapı-Kaynak Gerilimi (1.2A yük) (CH1-Sarı)	81

Şekil 8.10 Ana bara gerilimi (CH3-Mavi) ve Kapı-Kaynak Gerilimi(2A yük) (CH1-Sarı).....	81
Şekil 8.11 Ana bara gerilimi (CH3-Mavi) ve MEA Sinyali (CH4-Yeşil)	82
Şekil 8.12 S3R Mosfet Kapanma Gecikmesi (CH3:Ana Bara Gerilimi, CH1:Akaç-Kaynak Gerilimi)	82
Şekil 8.13 S3R Mosfet Açılma Gecikmesi (CH3:Ana Bara Gerilimi, CH1:Akaç-Kaynak Gerilimi)	83
Şekil 8.14 Anahtar Kapı-Kaynak Gerilimi (CH1-Sarı) ve Güneş Paneli Giriş Akımı (CH2-Kırmızı)	83
Şekil 8.15 Sabit akım modu (0.6A Pil Şarjı) (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)	85
Şekil 8.16 Sabit akım modu (1.1A Pil Şarjı) (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)	85
Şekil 8.17 Sabit akım modu (2.25A Pil Şarjı) (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)	85
Şekil 8.18 Pil şarj akımı anahtarlama yükseliş(tr) değeri	86
Şekil 8.19 Pil şarj akımı anahtarlama iniş(tf) değeri.....	86
Şekil 8.20 Pil şarj hata sinyali, 0.6A şarj akımı (CH1:Şarj Akımı, CH3:BEA Gerilimi)	86
Şekil 8.21 Pil şarj hata sinyali, 1.1A şarj akımı (CH1:Şarj Akımı, CH3:BEA Gerilimi)	87
Şekil 8.22 Pil şarj hata sinyali, 2.25A şarj akımı (CH1:Şarj Akımı, CH3:BEA Gerilimi)	87
Şekil 8.23 Sabit akım modu (azami yük), 0.6A pil şarjı (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi).....	87
Şekil 8.24 Sabit akım modu (azami yük), 1.1A pil şarjı (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi).....	88
Şekil 8.25 Sabit akım modu (azami yük), 1.75A pil şarjı (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi).....	88

Şekil 8.26 Lineer bölge şarjı, 0.5A pil şarjı (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)	89
Şekil 8.27 Lineer bölge şarjı, 1A pil şarjı (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)	89
Şekil 8.28 Lineer bölge şarjı, 2A pil şarjı (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)	89
Şekil 8.29 Sabit gerilim modu pil şarjı (Pil:72.4V) (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)	90
Şekil 8.30 Sabit gerilim modu pil şarjı (Pil:72.6V) (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)	90
Şekil 8.31 Sabit gerilim modu pil şarjı (Pil:72.7V) (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)	91
Şekil 8.32 Sabit gerilim modu pil şarjı (Pil:72.8V) (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)	91
Şekil 8.33 Sabit akım modundan sabit gerilim modu pil şarjına geçiş	91

KISALTMALAR

AGNT	:	Azami Güç Noktası Takibi
BEA	:	Pil Hata Yükselticisi
CC	:	Sabit Akım
CV	:	Sabit Gerilim
DA	:	Doğru Akım
DAC	:	Dijital Analog Dönüştürücü
DET	:	Doğrudan Enerji Transferi
EMI	:	Elektromanyetik Girişim
FPGA	:	Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri
GDB	:	Güç Düzenleme Birimi
MEA	:	Ana Hata Yükselticisi
PDD	:	Pil Deşarj Düzenleyici
PŞD	:	Pil Şarj Düzenleyici
S3R	:	Sıralı Anahtarlamalı Şönt Düzenleyici
S4R	:	Sıralı Anahtarlamalı Şönt Seri Düzenleyici

1. GİRİŞ

Uydu iletişim sistemleri, küresel telekomünikasyon altyapısının önemli bir parçası haline gelmiştir. Bu, radyo iletimlerini yeryüzü terminalleri arasında aktarmak için uyduları kullanan bir dizi uygulama ve hizmetin entegrasyonunu içermektedir. Bu hizmetler geleneksel olarak karasal ağlar ve radyo yayınları aracılığıyla sunulmaktaydı. Bilgi teknolojisinin hızla büyümesiyle birlikte, güvenilir bilgi aktarımı sağlayacak geniş bant uydu hizmetlerine yönelik talep de artmaktadır.

Uydular temel olarak uzayda belirli bir görev için tasarlanmaktadır. Uydunun görevi faydalı yükü, bu faydalı yük de yardımcı alt sistemlerini tanımlar. Bu yardımcı alt sistemler, görev hedeflerine bağlı olarak Yörünge Belirleme ve Yönelim Kontrol Alt Sistemi, Elektrik Güç Alt Sistemi, Haberleşme Alt Sistemi, Uydu Veri Kotarma Alt Sistemi, Yapsal Alt Sistemi, Isıl Kontrol Alt Sistemi ve İtki Alt Sistemlerini içermektedir. Güç alt sistemi açısından bakıldığında, diğer alt sistemler güç alt sistemi kayıplarına ek olarak farklı ortalama ve tepe güç seviyelerine sahip yükler olarak ele alınmaktadır. [12].

Her bir alt sistem belirli bir görevden sorumludur. Yörünge ve yönelim kontrol alt sistemi genellikle uydunun işaretleme ve takla atma operasyonları dahil olmak üzere bunlara ek olarak yörüngedeki herhangi bir andaki yönelimi belirlemek için gereklidir. Haberleşme alt sistemi, yer istasyonları ile iletişim kurmak için farklı frekans aralıklarına sahip verici ve alıcıların kullanıldığı uydu iletişimi için kullanılmaktadır. Uydu veri kotarma alt sistemi olarak da adlandırılan uydu bilgisayar, komutlar göndererek ve sağlık verilerini kaydederek diğer alt sistemleri koordine eden alt sistemdir. Yapısal alt sistem, diğer tüm alt sistemleri fiziksel olarak bir arada tutan ve yörüngede tüm yapıya mekanik destek sağlayan alt sistemdir. Ayrıca, itki sistemleri uzayda belirli bir yörüngeyi ilgili irtifa ve eğim açısıyla korumak için kullanılmaktadır [13].

Elektriksel güç alt sistemi, uydu platform ekipmanlarına ve faydalı yüklerine tüm operasyonel koşullar altında ve tüm görev fazlarında güvenilir gücü sağlamak ve olası hata durumlarında hata yayılımını engellemekten sorumlu alt sistemdir. Kritik uzay

uygulamaları için elektrik güç alt sisteminde kullanılabilir olacak gelişmiş şarj devreleri ve gelişmiş dönüştürücü topolojileri keşfedilmiştir. Temel olarak yeni teknolojiler daha az maliyet, daha küçük boyut, daha düşük kütle ve daha yüksek verim hedeflemektedir.

Elektriksel güç alt sisteminde kullanılan dönüştürücülerde bu parametreleri etkileyen en temel konu güneş paneli regülasyon yöntemidir. Doğrudan enerji transferi (DET) yöntemi ve azami güç noktası takibi (AGNT) yöntemlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu detaylar tez kapsamında incelenmiştir.

Yersabit yörünge uyduların elektriksel güç alt sisteminde, faydalı yüklerden kaynaklı yüksek güç ihtiyacı nedeniyle regüle ana bara yapısı tercih edilmektedir. Bu yapıda güneş paneli düzenleyici, pil şarj dönüştürücü ve pil deşarj dönüştürücü modülleri bulunmaktadır. Toplam kütle, boyut ve maliyeti düşürmek amacıyla bu modüllerdeki işlevleri ortaklamaya ilgili çalışmalar bulunmaktadır.

Bu çalışmalardan birisi ise pil şarj işlevi ile güneş paneli regülasyonu işlevlerini ortaklayan sıralı anahtarlamalı şönt şeri düzenleyici yapısıdır [14]. Bu yapıyla birlikte pil şarj dönüştürücüsü adeti kadar modül azaltılmakta, bu sayede kütle, boyut ve maliyet açısından avantaj sağlanmaktadır. Daha da önemlisi, pil şarj dönüştürücülerinde yaklaşık %92 olan verim değeri, bu topoloji ile birlikte %98'lerin üzerine çıkmaktadır. Bu sayede ekipman ısı yayılımını düşürülerek, ısıdan sisteme uyumluluğu daha rahat hale gelmektedir.

Literatürde sıralı anahtarlamalı şönt şeri düzenleyici yapısının 28V [15] ve 50V [16] regüle ana baraya uygulamasını inceleyen çalışmalar bulunmakla birlikte, 100V ana baraya olan uygulamasıyla ilgili bir yayın bulunmamaktadır.

Bu yapının kontrol döngüsüyle ilgili literatürde yalnızca sabit akım döngüsünü işaret eden çalışmalar bulunmaktadır [15]. S4R yapısına entegre edilmiş sabit gerilim modu ve lineer bölge şarjıyla ilgili bir çalışma literatürde bulunmamaktadır.

Tez kapsamında S4R yapısı baz alınarak bir güneş paneli düzenleyici devresi tasarlanmıştır. Tasarlanan düzenleyicinin fonksiyonel testleri gerçekleştirilmiş ve raporlanmıştır. Tezde yapılan çalışmanın temel hedefleri aşağıda belirtilmiştir;

- Güneş paneli düzenleyici çalışma modlarının incelenmesi,
- Sıralı anahtarlama şönt seri düzenleyici yapısının incelenmesi,
- Sıralı anahtarlama şönt seri düzenleyici yapısının diğer pil şarj dönüştürücü yapılarına göre avantajlarının incelenmesi,
- Doğrudan enerji transferi ile azami güç noktası takibi yöntemleri arasındaki avantaj ve dezavantajların karşılaştırılması,
- 100V ana bara yapısına uyumlu bir sıralı anahtarlama şönt seri düzenleyici geliştirilmesi,
- Güneş paneli düzenleyici devresine sabit akım, sabit gerilim ve lineer bölge pil şarj işlevlerinin entegre edilmesi,
- Tasarlanan devrenin benzetiminin gerçekleştirilmesi,
- Benzetimi gerçekleştirilen tasarımın baskı devre kartı çizilmesi ve üretilmesi
- Tasarlanan düzenleyicinin tüm modlarıyla birlikte fonksiyonel testlerinin gerçekleştirilmesi,
- Analiz sonuçları, benzetim sonuçları ve test sonuçlarının karşılaştırılıp, yorumlanması,
- Test sonuçlarının literatürdeki benzer sonuçlar ile karşılaştırılması,

Tez kapsamında 100V ana bara yapısına uyumlu bir sıralı anahtarlama şönt seri düzenleyici geliştirilmiş, tasarlanmış ve uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Tez kapsamında bir pil şarj dönüştürücüsünde bulunması elzem olan tüm modlar (sabit akım, sabit gerilim ve lineer bölge) çalışmaya dahil edilmiş ve tez kapsamında tasarlanan düzenleyici devresine entegre edilmiştir.

Tez çalışması 9 ana bölümden oluşmaktadır.

1. Bölümde, haberleşme uyduları ve uydu alt sistemleriyle ilgili bilgiler verilmiş olup, elektriksel güç alt sistemi görevlerinden bahsedilmiştir. Alt sistem kapsamında kullanılan dönüştürücüler hakkında bilgiler verilmiş olup, gelecek teknolojik çalışmalarda hangi tasarım parametrelerinin göz önünde bulundurduğu belirtilmiştir. Bölümün son kısmı ise tezin amacı ve içeriği hakkında bilgiler içermektedir.
2. Bölümde, uydu ve uydu alt sistemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir.
3. Bölümde, uydu elektriksel güç alt sistemi yapısı genel hatlarıyla incelenmiş ve temel bileşenleri anlatılmıştır.
4. Bölümde, doğrudan enerji transferi ve azami güç noktası takibi güneş paneli regülasyon yöntemleri incelenmiş ve bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır.
5. Bölümde, uydu elektriksel güç alt sistemi alanında kullanılan şönt yapısına sahip tüm düzenleyici çeşitleri incelenmiştir. Bu yapıların temel çalışma prensipleri açıklanmış olup, her yapı artıları ve eksileriyle birlikte değerlendirilmiştir.
6. Bölümde, tez kapsamında tasarlanan güneş paneli düzenleyici devresinin çalışma prensibi ve çalışma modları anlatılmıştır. Tasarım parametrelerinin seçimi ve hesaplanmasıyla birlikte devre elemanlarının seçimi de bu bölümde anlatılmıştır. Tez kapsamında tasarlanan düzenleyicinin kayıp analizi ve verim hesabı gerçekleştirilmiştir. Son olarak ta baskı devre tasarımıyla ilgili detaylar bu bölümde verilmiştir.
7. Bölümde, tez kapsamında tasarlanan güneş paneli düzenleyici devresinin benzetim blokları verilmiş olup, benzetim sonuçları paylaşılmıştır.
8. Bölümde, tez kapsamında tasarlanan güneş paneli düzenleyici devresinin tüm çalışma modlarını içeren fonksiyonel donanım test sonuçları verilmiştir.
9. Bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalar özetlenmiş olup, yapılan çalışmanın artı ve eksi yönleri anlatılmıştır. Alınan sonuçların literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılması gerçekleştirilmiş ve ilerleyen dönemlerde mevcut tasarımın nasıl geliştirilebileceği ve potansiyel uygulamaları konusunda görüşler verilmiştir.

2. UYDULAR VE ALT SİSTEMLERİ

”Uydu” terimi, insanlar tarafından yapılan ve genellikle Dünya olmak üzere bir gök cisminin yörüngesinde dönen araçları tanımlayan yapay uyduları ifade eder. Şu anda Dünya’nın yörüngesinde yaklaşık 10.000 adet operasyonel uydu olduğu düşünülmektedir.

Uyduların Dünya etrafındaki yörüngeleri yarıçap, yörünge düzlemi eğimi ve dönüş periyodu gibi faktörlere göre belirlenmektedir. Uyduların gönderildiği yörüngeler dairesel ve eliptik olmakla birlikte, yükseklikleri yaklaşık 200 km ile 36000 km arasında değişmektedir. Uyduların yörünge periyodu buldukları yörünge yüksekliğiyle birlikte uzamaktadır. Yörüngeler şu şekilde kategorize edilmektedir;

- Yersabit yörünge; yaklaşık 36.000 km yükseklikte, dönme periyodu Dünya’nınkiyle aynı
- Yüksek eliptik yörünge; enberi (yörünge’nin Dünya’ya en yakın noktası) yüksekliği 1.000 km’nin altında ve enöte (Dünya’dan en uzak nokta) yüksekliği 35.756 km’nin üzerinde olan dış merkezli bir yörünge
- Orta dünya yörüngesi; yörünge yüksekliği 2000km ile 20000km arası
- Alçak dünya yörüngesi; yörünge yüksekliği 200km ile 2000km arası

Tipik olarak, uydular gerçekleştirdikleri görev türüne göre beş ana gruba ayrılır.

- Bilimsel
- Askeri
- Navigasyon
- Yer gözlem
- Haberleşme

Bilimsel uydular sayesinde bilimsel çalışmalar için veriler toplanmaktadır. Dünya’da, yakın gezegenlerde, asteroidlerde, Ay’da, Güneş’te ve evrenin diğer bölgelerinde var olan yapı ve olguları araştırmak için kullanılmaktadır. Yörünge, toplamak istenilen bilimsel veri türüne göre belirlenmektedir.

Uydu geliştirmenin temel motivasyonlarından biri ise askeri uygulamalardır. Bugünlerde uyduların görevleri arasında araçların izlenmesi ve yerlerinin tespit edilmesi, füze fırlatmaları için hedeflerin belirlenmesi ve askeri amaçlarla iletişim kurulması yer almaktadır.

Navigasyon için kullanılan uydular konumlandırma ve yer belirleme için kullanılmaktadır. Navigasyon uyduları ile, seyahat halindeki bir kamyonu izlemek, bir uçak pilotuna yardımcı olmak veya birisinin ormanda kaybolmasını önlemek mümkün olmaktadır.

Yer gözlem uyduları gezegenimizi haritalandırmakta ve gözlemlemektedir. Genellikle alçak yörüngede bulunan bu uydular gezegenin yüzeyinin fotoğraflarını çekmekte ve bu verileri yer istasyonuna iletmektedir. Ulaşılması zor alanların haritalanmasına, mahsul tahminine, yangınların ve ormansızlaşmanın izlenmesine, kırsal ve kentsel mesleklerin gelişiminin izlenmesine, çevresel felaketlerin izlenmesine, maden yataklarının izlenmesine ve kirliliğin etkilerinin belirlenmesine ve analiz edilmesine olanak tanır. Bu uydular arasında alçak yörüngede çalışan ve atmosferik olaylar hakkında görüntü ve veri gönderen meteoroloji uyduları da bulunmaktadır. Bu uydular sivil savunma için erken uyarıların yanı sıra hava ve iklim tahminleri de sağlamaktadır.

Dünya üzerindeki farklı konumlar arasında veri, radyo, televizyon ve telefon sinyallerini yeniden iletmek için telekomünikasyon uyduları tekrarlayıcı olarak kullanılmaktadır. Yersabit yörüngedeyken hem yayın hem de telekomünikasyon hizmetlerini desteklemektedir. Yörüngedeki uydular, diğer izleme sistemlerinin yanı sıra mobil telekomünikasyon ağlarını ve çevresel veri toplama ağlarını destekler.

Faydalı yükler, bir uydunun görevini yerine getirebilmesi için üzerinde bulundurması gereken özel ekipmanlardır. Örnek olarak meteorolojik bir görevde bulut hareketlerini

izlemek için bir optik kamera gerekiyken, bir haberleşme uydusunda ise RF aktarıcı ekipmanlar gerekli olabilmektedir.

2.1. Uydu Alt Sistemleri

Uyduların çalışması için faydalı yükün yanı sıra diğer alt sistemlere de ihtiyaç vardır. Uydularda bulunan en temel alt sistemler şunlardır [1];

- Yörünge ve Yönelim Kontrol Alt Sistemi
- Telemetri, Telekomut ve Mesafe Ölçüm Alt Sistemi
- Uydu Yönetim Alt Sistemi
- Güç Alt Sistemi
- Isıl Kontrol Alt Sistemi
- Yapısal Alt Sistemi
- İtki Alt Sistemi

Sonraki bölümlerde bu alt sistemlerle ilgili özet bilgiler verilmektedir. Güç alt sistemi ise Bölüm 3'te detaylı olarak anlatılmaktadır.

2.1.1. Yörünge ve Yönelim Kontrol Alt Sistemi

Yörünge ve yönelim kontrol alt sistemi, otonom bir şekilde yörünge, yönelim ve açısal hız belirlenmesi ile yönelim ve açısal momentum kontrolü yapılmasından sorumludur. Ayrıca dış tork bozukluklarını göz önünde bulundurarak uydunun yönelimindeki kararlılığının korunması ve yörünge kontrolü bu alt sistem tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu işlevleri sağlayabilmek için uydu içerisinde bazı aktuatör ve sensörler kullanılmaktadır. Bu alt sistemi kapsamında kullanılan ekipmanlar arasında güneş sensörü, dünya sensörü,

jiroskop, yıldızizler, tepki tekeri, manyetik tork çubuğu ve manyetometre gibi ekipmanlar bulunmaktadır [17].

Yörünge ve yönelim kontrol alt sistemi temel görevleri aşağıda verilmiştir;

- Uydu yöneliminin otonom 3 eksenli kontrolü
- Yörünge kontrolü
- Uydu güneş panellerinin otonom kontrolü
- Acil durum koşullarında güneş panellerinin güneşe yönlendirilmesi

2.1.2. Telemetri, Telekomut ve Mesafe Ölçüm Alt Sistemi

Telemetri, Telekomut ve Mesafe Ölçüm Alt Sistemi, uydunun yaşam ömrü boyunca, uydu ile yer kesimi arasındaki haberleşmeyi sağlayan alt sistemdir. Uyduya gelen uzkomutları uydu bilgisayarına aktaran ve uydu bilgisayarında oluşturulan uzölçüm verilerinin yer ortamına iletilmesi görevlerini gerçekleştiren aktif ve pasif haberleşme ekipmanlardan oluşur. Yer istasyonundan alınan mesafe ölçüm sinyalini yer istasyonuna geri göndererek uydunun mesafe ölçüm işlevlerinin gerçekleştirilmesini sağlar. Ayrıca bu alt sistem yer istasyonları tarafından sabit servis alanları içerisinde takip edilebilmesi amacıyla işaret sinyali gönderilmesinden sorumludur. [17].

Telemetri, Telekomut ve Mesafe Ölçüm Alt Sistemi'nin uydu görev süresi boyunca gerçekleştirmesi gereken 4 temel işlevi aşağıda belirtilmiştir;

- Telekomut sinyallerinin alınması
- Telemetri sinyallerinin gönderilmesi
- Mesafe ölçüm sinyallerinin aktarılması
- İşaret sinyallerinin gönderilmesi

2.1.3. Uydu Yönetim Alt Sistemi

Uydu yönetim alt sistemi, uydu veri yollarını kontrol etmektedir. Uzkomut-uzölçüm hatları ile yer istasyonundan gelen komutların işletilmesini, sonuçların ve uzölçümlerin yere indirilmesini sağlar. Uydu ile ilgili tüm yazılım işlevleri bu alt sistem kapsamında gerçekleştirilmektedir. Bu işlevler örnek olarak aşağıda sıralanmıştır;

- Yörünge ve yönelim kontrol
- Uydu sağlık telemetrisi kontrolü
- Yer haberleşmesi
- Platform ve faydalı yük haberleşmesi
- Pil yönetim
- Isıl kontrol
- Hata tespit, ayıklama ve kurtarma

Bu alt sistemin görevleri arasında komutların alınması, doğrulanması, kodlarının çözülmesi ve uydunun diğer sistemlerine dağıtılması yer alır. Ayrıca uydunun dahili durum izlemesinden gelen verileri toplar, işler, biçimlendirir ve bunları yere veya yerleşik bilgisayara gönderir.

Buna ek olarak, gecikmeler üretebilir, bir zaman sağlayabilir, görev süresini sayabilir ve bir zaman referansı oluşturabilir. Bir arıza tespit mekanizması sunmanın yanı sıra, yerleşik bilgisayarın nasıl çalıştığını da izleyebilir. Bir diğer görevi ise güvenilir ve güvenli arayüzler sağlamaktır.

2.1.4. Güç Alt Sistemi

Elektriksel güç alt sistemi, uydu platform ekipmanlarına ve faydalı yüklerine tüm operasyonel koşullarda, tüm görev fazlarında güvenilir gücü sağlamak ve hata yayılımını engellemekten sorumlu alt sistemdir. Güç alt sistemi'nin temel görevleri güç üretim, enerji depolama, güç düzenleme ve güç dağıtımdır.

Elektriksel güç alt sistemi bu işlevlerden sorumlu alt birimlerden meydana gelmektedir. Güneş panelleri uyduların birincil güç kaynağıdır. Enerji depolama birimi olarak ise piller kullanılmaktadır. Güneş paneli ve pilden elde edilen elektriksel gücü uydu ekipmanlarının ihtiyaç duyduğu forma dönüştürmek için güç düzenleme birimleri kullanılmaktadır. Üretilen gücün uydu ekipmanlarına güvenilir bir şekilde dağıtılması ve hata yayılımının engellenmesi ise güç dağıtım birimleri kullanılmaktadır [1].

2.1.5. Isıl Kontrol Alt Sistemi

Isıl kontrol alt sisteminin temel görevi platform ve faydalı yük ekipmanlarının sıcaklıklarını tüm uydu operasyonu boyunca belirlenen sıcaklık aralığında tutmaktır. Temel olarak, ekipmanların zarar görmesini önlemek aşılması gereken iki sıcaklık aralığı vardır. Bunlar ekipmanın aktif durumda olduğu süre boyunca kalması gereken sınır olan operasyonel limitler ve operasyonel olmayan durumlar için tanımlanan hayatta kalma limitleridir. Ekipman özelinde belirlenen bu kalifikasyon sıcaklıklarının sistem seviyesi operasyonlarda aşılması durumunda ekipmanların zarar görme riski oluşmaktadır. Uydunun bu ısıl gereksinimlerinin karşılanması için ise termal kontrol yapılması gerekmektedir. Ayrıca termal kontrol yapılarak uydu içerisindeki ısı dağılımında kontrolü sağlanmaktadır. Bu sayede bölgesel olarak yüksek ısı değişimlerinin sebep olabileceği yapısal bozulmaların önüne geçilmektedir.

Isıl kontrol teknikleri aktif veya pasif olabilir. Kaplamaların ve termal bileşenlerin (çok katmanlı yalıtım battaniyeleri, radyatör, yüzey aynaları) uygulanması pasif tekniklere

örnektir. Isıtıcı, termistör ve termostat gibi aktif bileşenler ise çok daha karmaşık ve maliyetli olan aktif termal kontrolde kullanılmaktadır.

2.1.6. Yapısal Alt Sistemi

Yapısal alt sistemin temel görevi, uydu üzerindeki bütün alt sistemlerin fiziksel olarak bir arada tutulmasını sağlamaktır. Bu nedenle yapısal alt sistem bileşenlerinin yer operasyonları, fırlatma ve yörünge ömrü boyunca ortaya çıkabilecek mekanik yüklere karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Uydu yapısal tasarımı uydunun maruz kalacağı çevresel koşullar dikkate alınarak yapılmakta ve bu koşullar altında gerekli dayanımı göstermesini sağlamaktadır.

Yapısal alt sistem temel işlevleri aşağıda belirtilmiştir;

- Tüm alt sistemleri fiziksel olarak bir arada tutmak
- Alt sistemler ile mekanik arayüz sağlamak
- Fırlatma sistemi ile mekanik arayüz sağlamak
- Mekanik yüklere karşı dayanıklı olmak
- Yer operasyonları için mekanik yer destek ekipmanları ile uyumlu arayüzlere sahip olmak

2.1.7. İtki Alt Sistemi

İtki alt sistemi, uydunun görev yörüngesine transfer, transfer yörüngesinde yönelim kontrol, görev yörüngesinde mevzi koruma, momentum boşaltma ve mezarlık yörüngesine transfer manevralarını gerçekleştirmekten sorumludur. Bazı uydular bir itki sistemine ihtiyaç duymasa da, çoğu uydu bir itki sistemine ihtiyaç duymaktadır.

Uyduda uygulanan itki ile yörünge parametreleri değiştirilir, manevralar gerçekleştirilir, yönelim kontrolü sağlanır ve açıl momentum yönetilir. Popüler olarak iki çeşit itki

sistemi kullanılmaktadır. Bunlar kimyasal itki sistemleri ve elektrikli itki sistemleridir. Uydunun görev profili ve konfigürasyonuna göre hangi itki sisteminin kullanılacağına karar verilmektedir.

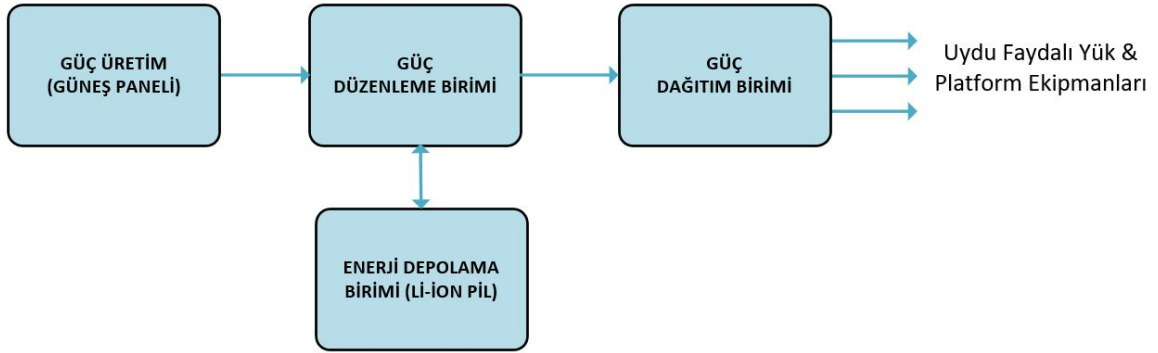
3. UYDU ELEKTRİKSEL GÜÇ ALT SİSTEMİ

Elektriksel güç alt sistemi, uydu faydalı yüklerine ve platform birimlerine tüm öngörülen koşullarda, tüm görev fazlarında güvenilir enerjiyi sağlamak ve hata yayılımını önlemekten sorumlu alt sistemdir. Güç alt sistemi'nin temel işlevleri aşağıda belirtilmiştir;

- Güç Üretim
- Enerji Depolama
- Güç Düzenleme
- Güç Dağıtım

Elektriksel güç alt sistemi bu işlevlerden sorumlu alt birimlerden meydana gelmektedir. Fotovoltaik hücrelerden meydana gelen güneş panelleri yersabit yörünge uyduların birincil güç kaynağıdır. Enerji depolama birimi olarak ise Lityum-iyon piller kullanılmaktadır. Güneş paneli ve pilden elde edilen ham gücün uydu platform ve faydalı yüklerin ihtiyacı duyduğu forma dönüştürmek için güç düzenleme birimleri kullanılmaktadır. Güvenilir enerjinin uydu ekipmanlarına dağıtılması ve hata yayılımının engellenmesi ise güç dağıtım birimi üzerinden gerçekleştirilmektedir. Güç alt sistemi basitleştirilmiş blok diyagramı Şekil 3.1 ile verilmiştir.

Güç düzenleme birimi, güneş panellerinde üretilen veya pilde depolanan enerjinin, uydu faydalı yüklerinin ve platform birimlerinin ihtiyacı olan hale dönüştürülmesinden sorumlu birimdir. Güneş panellerinde üretilen artı güç, pil şarj düzenleyiciler üzerinden pili şarj etmek için kullanılmaktadır. Güneş panellerinde üretilen güç uydu yükleri için yetersiz



Şekil 3.1 Elektriksel Güç Alt Sistemi Basitleştirilmiş Blok Diyagramı

kaldığında, pil deşarj düzenleyiciler ile ana bara regülasyonu sağlanmaktadır. Bu şarj-deşarj geçişleri güç düzenleme birimi tarafından otonom olarak gerçekleştirilmektedir.

Aynı ana baraya bağlı farklı karakteristiğe sahip birden fazla ekipman bulunduğundan, bu ekipmanların korunması ve nasıl çalıştırıldığına kontrolü için bir birime ihtiyaç vardır. Güç dağıtım birimi, bir ekipmanın gücünü açmak veya kapatmak için anahtarlar (röleler veya yarı iletkenler) kullanır. Böylece ekipmanlar arasındaki elektriksel izolasyonu olarak sağlayarak, ekipmanların birinde meydana gelecek kısa devreye veya aşırı yüke karşı ana barayı korur. Bu şekilde bir ekipmandaki sorunların diğerlerini elektriksel olarak etkilemesinin önüne geçilmektedir. Ana bara elektriksel özellikleri uydu ekipmanlarının güç kaynağı ihtiyaçlarını belirlediğinden, ilgili DA-DA dönüştürücüler güç dağıtım birimine dahil edilebilir veya bu işlevi gerçekleştirmek için ekipmanların kendi bünyesine yerleştirilebilmektedir.

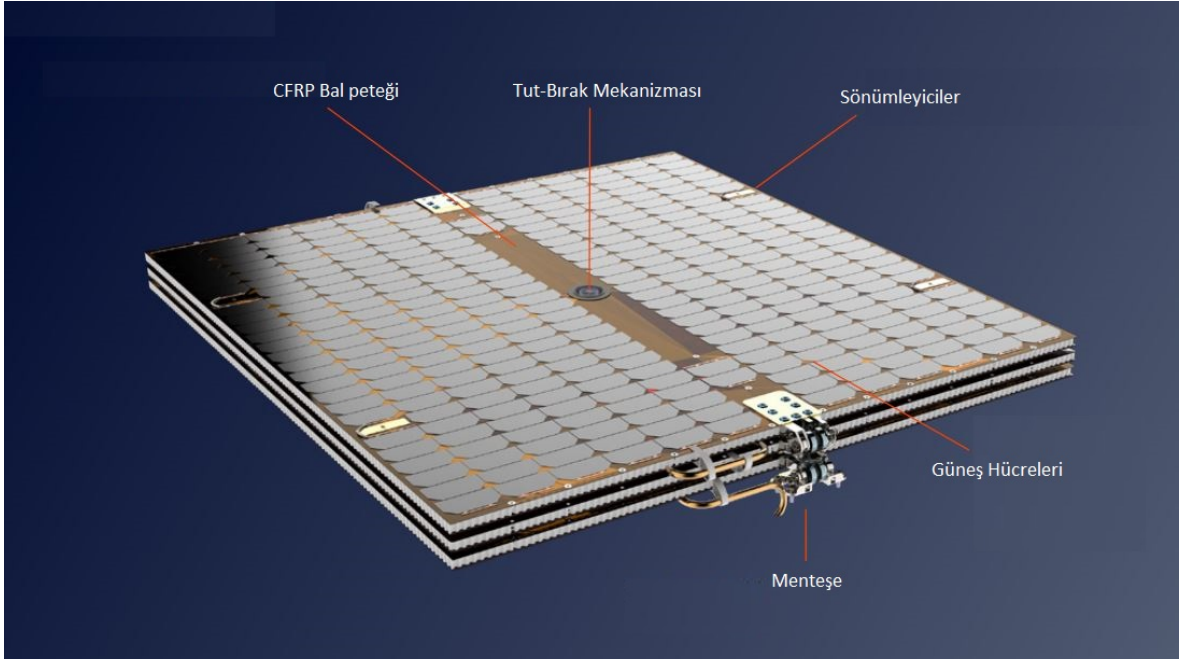
Güneş panelinin güneşi gördüğü dönemlerde ve tutulma sırasında uydu yüklerinin çalışması için gerekli olan ortalama ve tepe güç değerleri, elektriksel güç alt sistemin boyutunu belirlemektedir. Güç alt sistemi boyutlandırılmasında güneş hücreleri ve pillerin kullanım ömürleri boyunca meydana gelen bozunmaları dikkate alınmalıdır. Çünkü güneş panelleri ve piller, ömür başlangıcında, ömür sonuna göre daha fazla enerji sağlayabilmektedir [1, 17].

Güneş panellerinde üretilen gücün uydu güç tüketiminden düşük olduğu durumda, elektriksel güç alt sistemi diğer alt sistemlerin çalışması için gerekli güvenilir enerjiyi sağlamanın yanı sıra, güneş panellerinde elde edilen artık güç ile pil şarj operasyonunu da gerçekleştirmesi

gerekmektedir. Böylece tutulma dönemlerinde ve uydu güç tüketiminin güneş paneli güç üretiminden yüksek olduğu koşullarda uydu güç ihtiyacı piller tarafından karşılanmaktadır.

3.1. Güç Üretim - Güneş Paneli

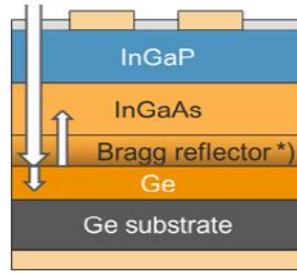
Dünya yörüngesindeki uydularda kullanılan birincil güç kaynakları arasında, maliyet, enerji kullanılabilirliği, hücre ömrü ve güç-kütle oranı (W/kg) gibi hususlar nedeniyle, fotovoltaik dönüşüm yoluyla güneş enerjisi en çok tercih edilen yöntemdir. Temel olarak görevin profili, seçilen yörünge, uydu konfigürasyonu, kütle ve boyut kısıtları kullanılacak güneş paneli tasarımını etkilemektedir. Uydularda kullanılan güneş panelleri bal peteği yapısındaki karbon fiber altlık üzerine seri/paralel konfigürasyonlar ile monte edilmiş fotovoltaik hücrelerden meydana gelmektedir. Güneş hücrelerini seri bağlayarak çıkış gerilimi, paralel bağlayarak ise toplam çıkış akımı artırılmaktadır. Örnek bir açılabilir güneş paneli görseli Şekil 3.2 ile gösterilmiştir.



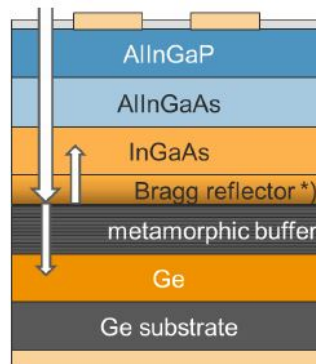
Şekil 3.2 Açılabilir Güneş Paneli Yapısı [2]

3.1.1. Uzay Uygulamalarına Yönelik Güneş Hücreleri

Uzay uygulamalarına yönelik güneş hücreleri yüksek verimli olmalı ve görev profiline göre sıcaklığın -150°C 'den 120°C 'ye kadar değişebildiği yörüngede binlerce termal döngüye dayanabilmelidir. Kozmik radyasyonlar ve mor ötesi ışınlar nedeniyle zaman içinde sınırlı bir bozunma göstermelidir. Fırlatma ve yörünge manevraları sırasında mekanik yüklerle, itki sırasında oluşacak ivmelenmelere ve titreşimlere karşı dayanıklı olmalıdırlar. Bu kısıtlamalar nedeniyle uzay hücreleri karasal uygulamalar için olanlardan daha küçüktür. Yüksek verimliliğe ulaşabilmek için, uzay uygulamalarına yönelik güneş hücreleri mono-kristal malzemelerden geliştirilmektedir. Geçmişte en çok kullanılan silikon ile ulaşılabilen toplam verimlilik en fazla %14 olmaktaydı. GaAs bazlı güneş hücrelerinin 20. yüzyılın son on yılında ortaya çıkması verimliliği %19'a kadar çıkarmıştır ve günümüzde üç ve dört eklemlili güneş hücrelerinin %30'dan yüksek verimi bulunmaktadır [18]. Üç eklemlili güneş hücresinin hücresinin basitleştirilmiş yapısını Şekil 3.3 ile dört eklemlili güneş hücresinin hücresinin basitleştirilmiş yapısı ise Şekil 3.4 ile gösterilmektedir [3].

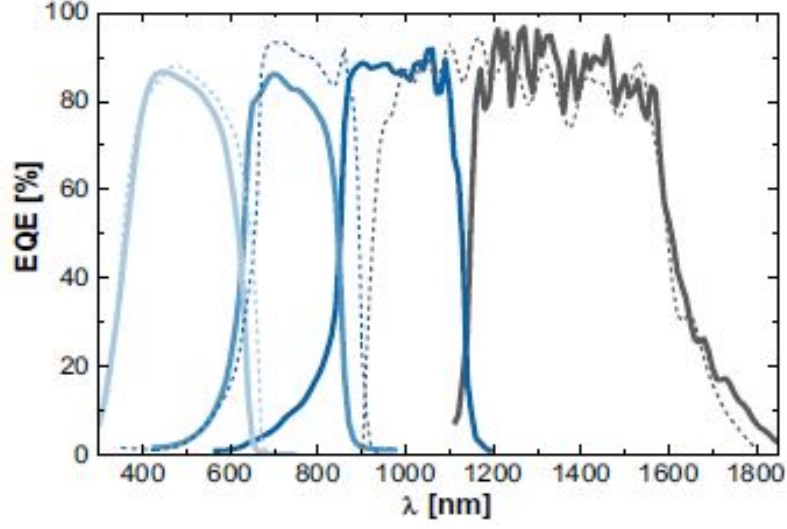


Şekil 3.3 3G30 Güneş Hücresi Yapısı [3]



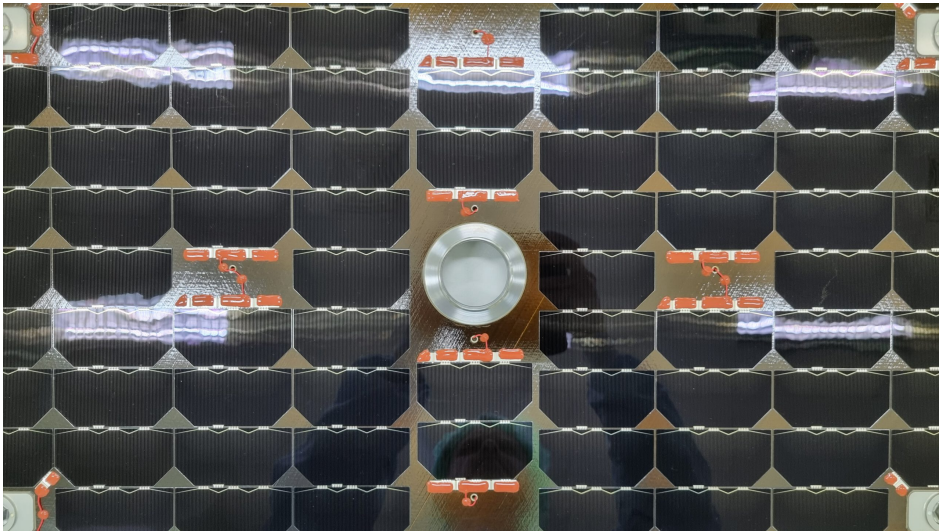
Şekil 3.4 4G32 Güneş Hücresi Yapısı [3]

Şekil 3.5’de her bir eklem için kuantum verimliliği gösterilmekte ve artan verimliliğin, soğurulan radyasyonun daha geniş dalga boyuna sahip olmasından kaynaklandığı açıkça görülebilmektedir.



Şekil 3.5 3G30 (Kesik çizgili) ve 4G32 (Düz çizgili) güneş hücreleri kuantum verimliliği [3]

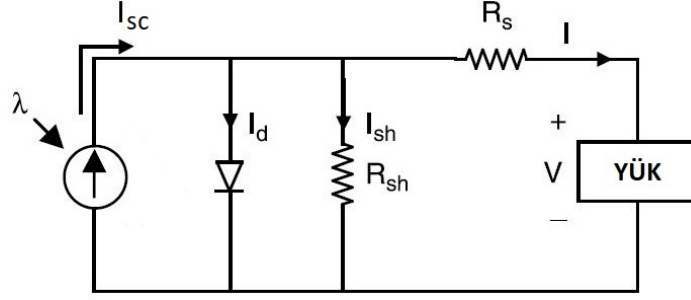
Üzerinde üç eklemler bulunan bir güneş paneli altlığı örnek olarak Şekil 3.6 ile gösterilmektedir. Altlığın merkezinde, tut-burak mekanizmasının takılacağı bir delik bulunmaktadır. Ayrıca güneş hücrelerin birbiriyle olan bağlantıları ve atlama diyodu uygulaması da görselde görülebilmektedir.



Şekil 3.6 Altlık üzerine monte edilmiş güneş hücreleri [2]

3.1.2. Güneş Hücresi Eşdeğer Devresi

Bir güneş hücresinin elektriksel eş değer devresi Şekil 3.7 ile verilmiştir.



Şekil 3.7 Güneş Hücresi Eşdeğer Devresi [1]

Güneş hücreleri ideal bir diyot ile paralellenmiş bir akım kaynağı olarak davranmaktadırlar. R_s parametresi güneş hücresinin yapısındaki malzemedeki kaynaklanan iç direnci, R_{sh} direnci ise eklemler üzerinden akan kaçak akımı temsil etmektedir. İdeal bir güneş hücresinde R_s iç direnci ihmal edilmekte, R_{sh} ise sonsuz alınmakta yani herhangi bir kaçak akım olmadığı varsayılmaktadır. Fakat yüksek kaliteli 2.5cm x 2.5cm boyutundaki bir silikon güneş hücresinde bu değerlerin yaklaşık olarak $R_s = 50-100$ mOhm, $R_{sh} = 200-300$ Ohm aralığında olduğu görülmektedir [1]. Güneş hücreleri verimi R_s 'deki küçük değişimlere oldukça duyarlı, ancak R_{sh} 'deki değişimlerden fazla etkilenmemektedir. R_s iç direncindeki küçük bir artış güneşhücresi çıkış gücünü önemli ölçüde azaltabilmektedir. Diyot akımının büyüklüğü ile R_s ve R_{sh} dirençleri sıcaklıkla değiştiğinden, güneş hücresi çıkış gücü ve verimliliği artan sıcaklıkla birlikte azalır [1].

Eş değer devreden görüldüğü üzere yüke giden toplam akım, kaynak akımından şönt akımı ve diyot akımının çıkarılmasıyla elde edilmektedir. Yük akımı 0 olduğu durumda ise açık devre gerilimi V_{oc} elde edilmektedir.

$$I = 0 \rightarrow V_{oc} = V + IR_s \quad (1)$$

Diyot akımı ise klasik diyot denkleminde aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$I_d = I_o \left[e^{\frac{qV_{oc}}{AKT}} - 1 \right] \quad (2)$$

I_o = diyot doyum akımı

q = elektron yükü = 0.1592×10^{-18} C

A = Eğri düzeltme sabiti

K = Boltzmann sabiti (1.38×10^{-18} J/K)

T = mutlak sıcaklık (K)

Bu denklemler kullanılarak yük akımı aşağıdaki şekilde elde edilmektedir.

$$I_d = I_s - I_o \left[e^{\frac{qV_{oc}}{AKT}} - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (3)$$

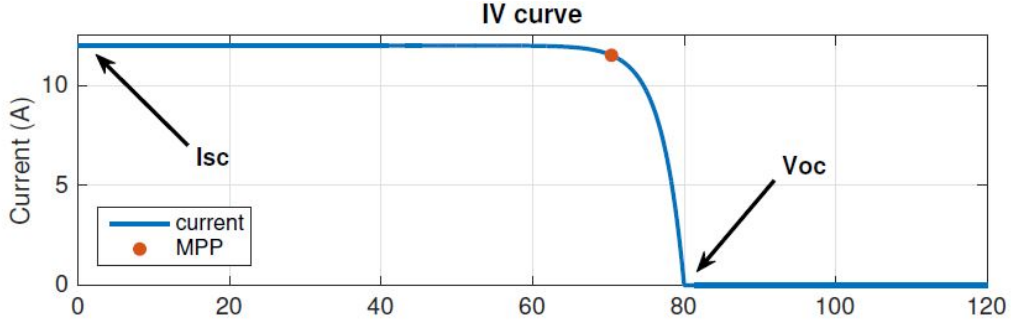
3.1.3. Güneş Hücresi I-V ve P-V karakteristiği

Bir güneş hücresi (ve buna bağlı olarak bir güneş dizisi) genellikle "I-V" ve "P-V" eğrileriyle temsil edilir. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 ile gösterilen bu eğriler, belirli koşullar altında (ışığa ve sıcaklık) olası çalışma noktalarını göstermektedir. Eğer güneş panelinin çalışma gerilimi, maksimum güç noktası geriliminden küçük ise güneş paneli bir akım kaynağı ($I_{sa} = I_{sc}$) olarak değerlendirilmektedir. Ancak çalışma gerilimi artmaya devam ederse panel akımı sıfıra doğru önemli ölçüde düşmektedir. Açık devre koşulunda ise çıkış akımı $I_{sa} = 0$ olmaktadır [4].

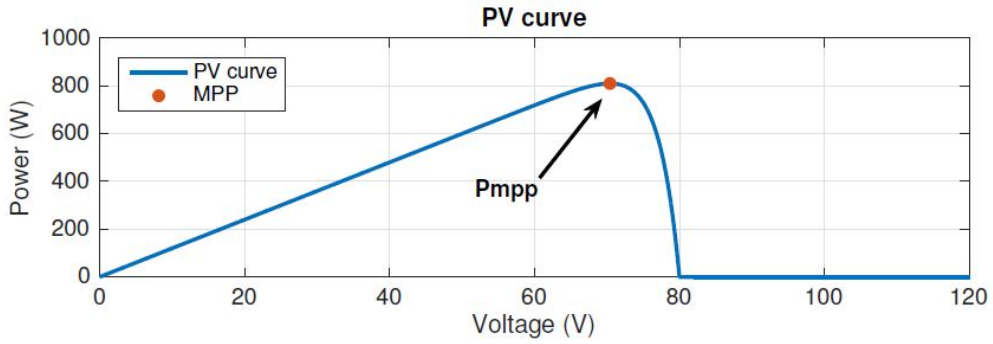
Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da görüldüğü üzere, güneş paneli tarafından üretilen güç, güneş panellerine bağlı güç düzenleme birimi tarafından tanımlanan çalışma gerilimine büyük ölçüde bağlıdır. Bu nedenle, güneş dizisini maksimum güç noktasında çalışmaya zorlamak ve ardından mümkün olduğu kadar fazla güç üretmek için "azami güç noktası takibi" (AGNT) algoritmaları adı verilen algoritmalar geliştirilmiştir. Regülasyon yöntemi olarak doğrudan enerji transferini kullanan sistemlerde ise çalışma gerilimi maksimum güç noktası geriliminden düşük olmaktadır. Bu yöntemde herhangi bir algoritma işletme gerekliliği

bulunmamakla birlikte operasyon geriliminin güç düzenleme birimi içerisinde belirlenen seviyede tutulması yeterlidir.

Örnek olarak alınan bir güneş panelinin I-V ve P-V eğrisi aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.8 Güneş paneli akım-gerilim eğrisi [4]



Şekil 3.9 Güneş paneli güç-gerilim eğrisi [4]

3.1.4. Sıcaklık Değişiminin Güneş Hücreleri Üzerindeki Etkisi

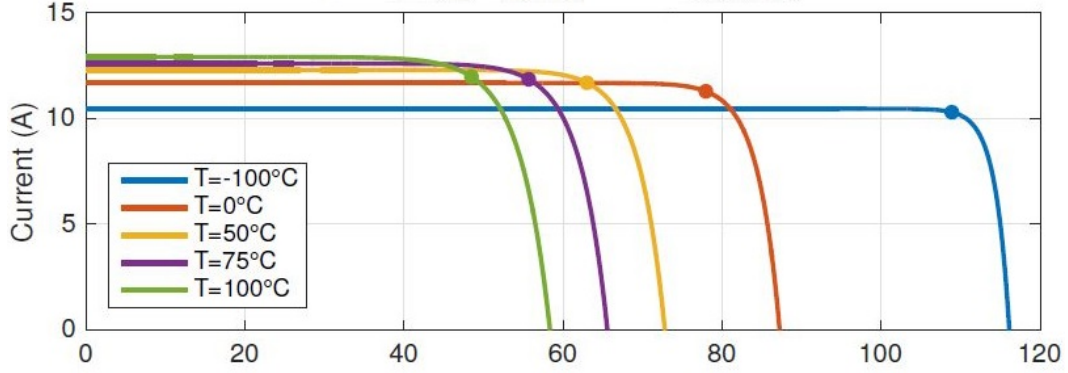
Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, güneş paneli karakteristik eğrileri çevre koşullarına göre değişiklik göstermektedir. Önemli bir faktör, tipik olarak -150°C ile 120°C arasında değişen P-N eklem sıcaklığıdır. Güneş panelinin sıcaklığa bağlı değişiklikleri aşağıdaki şekilde incelenebilir.

a ve b parametreleri güneş hücresi yapısına bağlı olarak değişen A/°C birimli katsayılardır. Bu katsayılar güneş hücresi üreticisi tarafından sağlanan veri sayfalarında bulunabilmektedir.

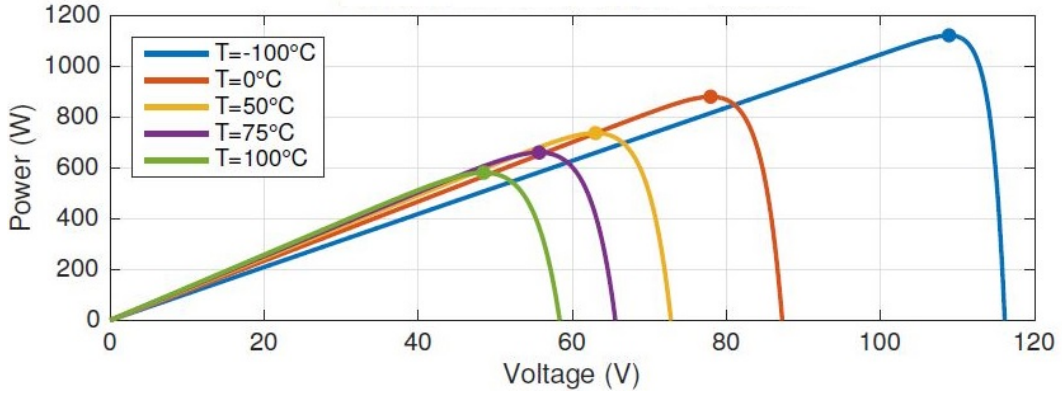
- Kısa devre akımı $I_{sc}(T_1) = I_{sc}(25^\circ\text{C}) \times (1+a \times (T_1-25))$

- Açık devre gerilimi $V_{oc}(T_1) = V_{oc}(25^\circ\text{C}) \times (1+b \times (T_1-25))$

Örnek olarak alınan, -100°C ile 120°C arasında değişen bir güneş panelinin I-V ve P-V eğrileri Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 ile gösterilmektedir.



Şekil 3.10 Farklı sıcaklıklarda akım-gerilim eğrisi [4]



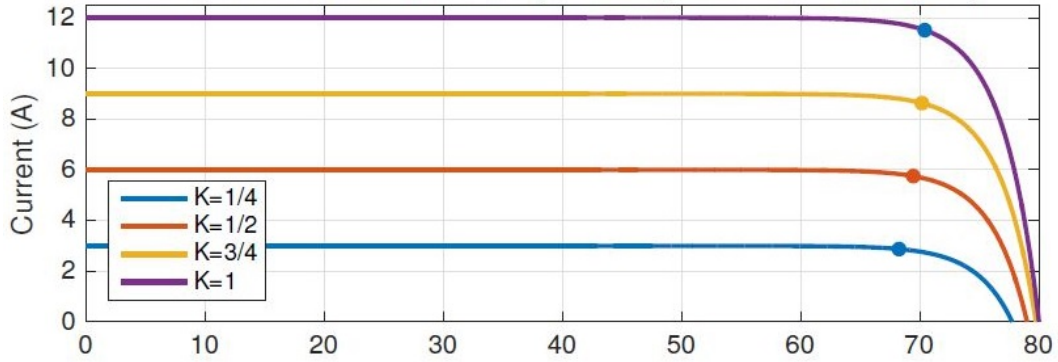
Şekil 3.11 Farklı sıcaklıklarda güç-gerilim eğrisi [4]

3.1.5. Aydınlanmanın Güneş Hücreleri Üzerindeki Etkisi

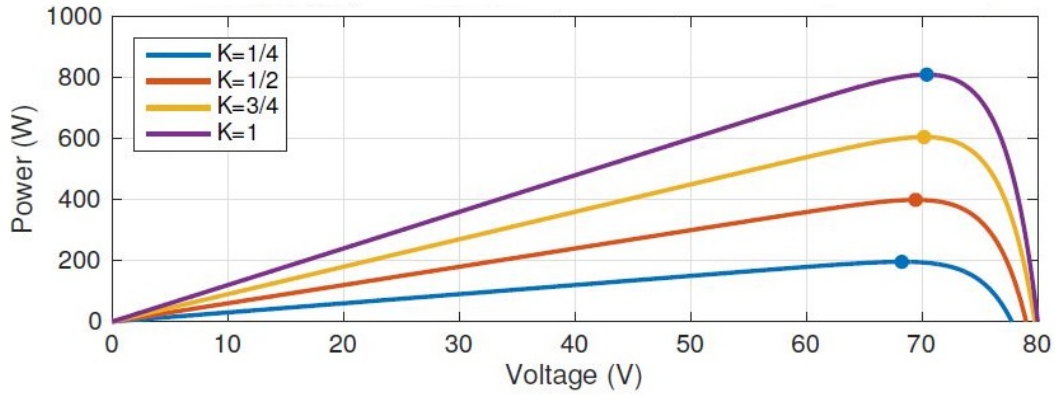
Güneş panelini aydınlatan güneş akısı, panelin üretebileceği elektriksel gücü değiştirmektedir. Pratik olarak, güneş ışığı yoğunluğu güneş hücresi verimliliğini etkilememektedir. Fotovoltaik etki ile oluşturulan akım I_{ph} ile güneş panelinin maruz kaldığı güneş ışığı yoğunluğu $P_{aydınlanma}$ arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir [4].

$$I_{ph} = K(T) * n(T) * P_{aydınlanma} \quad (4)$$

K sıcaklığa bağılı bir katsayıdır. Belirli bir sıcaklık için güneş hücresi tarafından üretilen akımın, panele gelen güneş ışığı yoğunluğu ile doğru orantılı olduğunu varsayabiliriz.



Şekil 3.12 Aydınlanmanın I-V eğrisi üzerindeki etkisi



Şekil 3.13 Aydınlanmanın P-V eğrisi üzerindeki etkisi

3.2. Enerji Depolama - Piller

Piller geleneksel olarak birincil (şarj edilemeyenler) ve ikincil (şarj edilebilir olanlar) olarak ikiye ayrılır. Birincil güç kaynağı olarak güneş enerjisini fotovoltaiik dönüşüm yoluyla kullanan uydularda, tutulma dönemleri ve anlık yüksek güç tüketimlerinin karşılanabilmesi için enerji depolamak gerekmektedir. Bu nedenle güneş panelinin güç ürettiği süre boyunca pillerin şarj edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Aksi takdirde piller boşaldığında ve güneş panelleri güç üretmediğinde uydunun güç kaynağı kalmayacaktır.

Uzay uygulamaları için geliştirilen şarj edilebilir pil teknolojileri, nikel-kadmiyum (NiCd), nikel-hidrojen (NiH₂) ve lityum-iyon (Li-Ion) pillerdir. Bu teknolojilerle üretilen pil

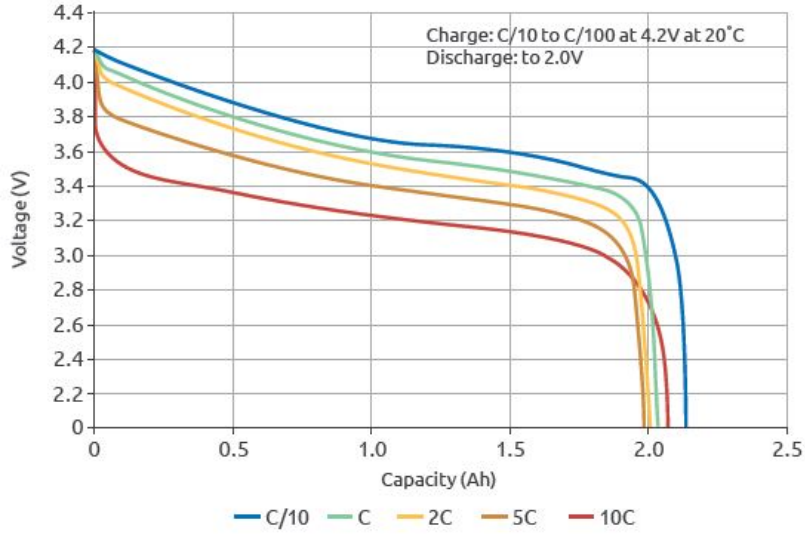
hücreleri kullanılarak farklı paralel-seri konfigürasyonlara sahip kalifiye edilmiş birçok pil bloğu varyasyonları bulunmaktadır.

Bu türler arasında enerji yoğunluğu en düşük olmasına rağmen NiCd piller geçmiş dönemlerde en çok kullanılan pillerden biridir. Bu nedenle geçmiş dönemlerden gelen büyük bir operasyonel tarihçesi bulunmaktadır. Bu pillerin en büyük dezavantajı, pilin tam deşarj dışında benzer derinliklerdeki deşarjlarda şarj kapasitesini kaybetmesi ile karakterize edilen “hafıza etkisi”dir. Örneğin pil birkaç kez kapasitesinin %30’una kadar boşaltılırsa, daha fazla şarj gerektiğinde onu besleyemeyecek ve gerilimi hızla düşecektir. Bu sorunu en aza indirmek için periyodik olarak tam deşarj ve şarjların yapılması gerekmektedir. Güç düzenleme birimi tasarımında bu detaylar dikkate alınmaktadır.

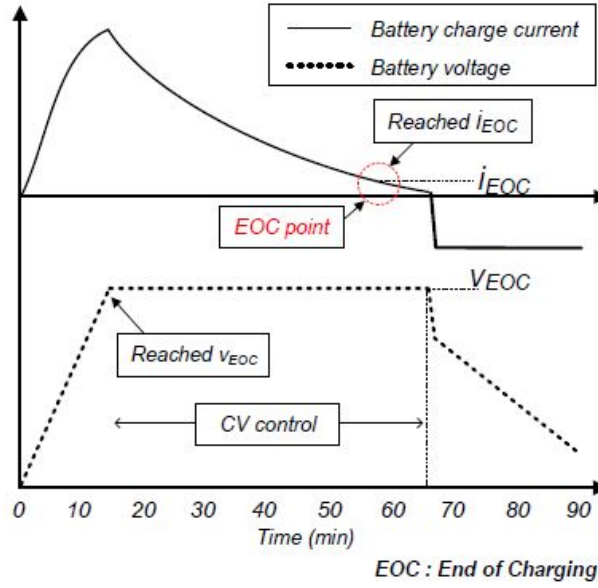
Geçmiş dönemlerde en çok kullanılan pillerden biri ise NiH_2 pillerdir. Avantaj olarak, NiCd pillerle karşılaştırıldığında daha yüksek özgül enerjiye sahip olmaları, daha düşük iç dirence sahip olmaları ve daha çok sayıda şarj-deşarj döngüsüne sahip olmaları gösterilebilir. Fakat son dönemlerde uydularda tercih edilen piller Li-iyon pillerdir. Li-iyon pillerin diğerlerine göre temel avantajları arasında çok daha yüksek enerji yoğunluğu ve düşük sıcaklıklarda daha iyi performans göstermesidir. Şekil 3.14’de uzay alanındaki kullanımlar için ABSL tarafından üretilen bir P20 tipi lityum iyon pilin tipik deşarj eğrisini göstermektedir. Tam şarj durumundan deşarj durumuna geçerken voltajının yaklaşık 4.2V ila 2.5V arasında değiştiği görülmektedir.

Şekil 3.15 ile Li-iyon pillerin şarj karakteristiği gösterilmektedir [6]. Bu şekilde sabit akım ve sabit gerilim şarj bölgeleriyle birlikte gerilim, akım ve kapasite eğrisi de gösterilmektedir.

İlgili uygulamada kullanılacak pilin seçiminde, hacim, kütle, çalışma sıcaklığı, enerji yoğunluğu, gerilim, kapasite, çalışma oranı, ömür döngüsü limiti, maksimum deşarj derinliği ve şarj olma süresi gibi parametreler dikkate alınmaktadır. Bunlara ek olarak maliyet, erişilebilirlik ve güvenilirlik gibi parametrelerde pil seçiminde önemli olan diğer özelliklerdir.



Şekil 3.14 P20 Hücresi Deşarj Karakteristiği [5]



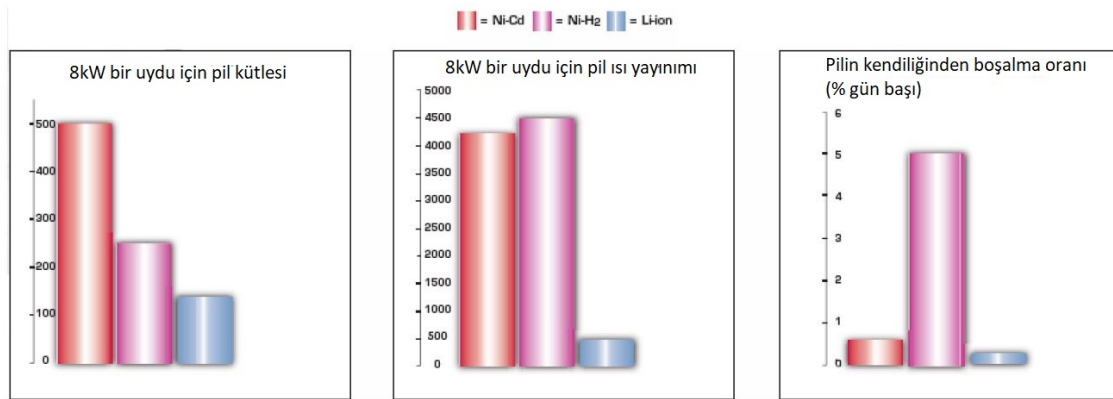
Şekil 3.15 Li-iyon Pil Şarj Operasyonu [6]

Pil teknolojileri arasındaki karşılaştırmaya Çizelge 3.1 ile verilmiştir [1]. Çizelgedeki değerler farklı kaynaklarda değişiklik gösterebilmektedir. Bunun nedeni değerleri paylaşan kaynak tarafından gerçekleştirilen testlerde kullanılan kriterlerin aynı olmaması ve bu değerlerin genellikle üreticiler tarafından sağlanan ve yalnızca ürünlerinin özelliklerini yansıtan bilgilere dayanmasıdır.

Çizelge 3.1 Hücre Teknolojilerinin Karşılaştırılması

	NiCd	NiH ₂	Li-iyon
Enerji (Wh/kg)	40-50	45-65	90-150
Enerji Yoğunluğu (Wh/l)	50-100	35-50	150-250
Hücre Gerilimi (V)	1,2	1,2	3,6
Ömür döngüsü	1000-2000	2000-4000	500-1000
Kullanılabilir Süre (Yıl)	10-15	10-15	-
Aşırı Yüklenme Toleransı	Orta	Yüksek	Çok düşük
Çalışma Sıcaklığı (°C)	-20 +50	-10 +50	+10 +45
Fiyat (\$/kWh)	1500	1500	3000

Şekil 3.16’de, Saft üreticisinin uzay kullanımına yönelik Li-iyon pil kataloğunda bulunan NiCd, NiH₂ ve Li-ion piller arasındaki kütle, termal yayılım ve kendi kendine deşarj miktarı karşılaştırılmaktadır. Li-iyon pillerin çok daha düşük kütle ve termal yayılımla üç ögede de avantajlı olduğu görülmektedir. Pilleri tanımlamak için çok önemli olan ilk iki madde 8 kW’lık bir uydu dikkate alınarak analiz edilmiştir. Kendi kendine deşarj miktarı, uydunun montaj, test, entegrasyon ve fırlatılma sürecinde sorun yaratmaktadır. Eğer bu miktar fazla olursa uydu fırlatılmadan önce pil tekrar şarj edilmesi gerekmektedir. fırlatılmadan önce yeniden şarj edilmesini gerektirir. Ayrıca nominal operasyon sırasında da bu kaçığı dengeleyecek şekilde şarj için daha fazla güç ihtiyacı gerekecektir.

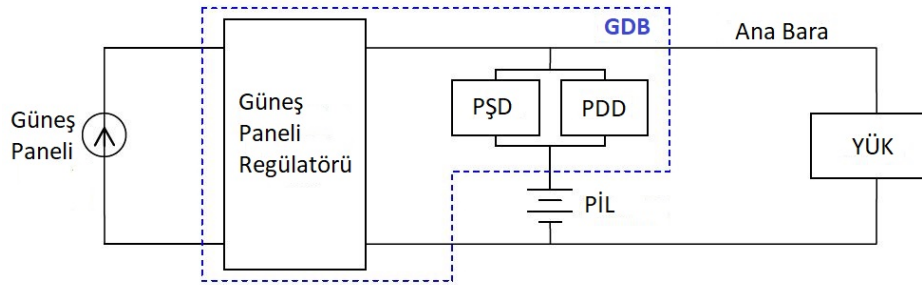


Şekil 3.16 Hücre Teknolojilerinin Karşılaştırılması [7]

3.3. Güç Düzenleme ve Dağıtım

Tez kapsamında tasarlanan güneş paneli düzenleyicisi, güç düzenleme birimi(GDB) ekipmanının temel parçalarından biridir. GDB, pil şarjı ve ana bara regülasyonunu gerçekleştiren düzenleyici yapısı ve kontrolcü devreleri dışında, pil deşarj kontrolü, telemetri-telekomut devreleri, FPGA yapısı ve analog ölçüm devreleri içermektedir. Ekipman içerisinde bulunan FPGA, uydu ana veri yolu ile iletişim kurmakta ve ekipman içi komut ve analog ölçümleri yönetmektedir. Kontrol devrelerinde veya sağlık bilgisi olarak kullanılan sinyaller, analog ölçüm devreleri ile elde edilmektedir.

GDB, Şekil 3.17 ile basitleştirilmiş diyagramda gösterildiği gibi güneş paneli düzenleyicisi, Pil Şarj Dönüştürücü (PŞD) ve Pil Deşarj Dönüştürücü (PDD) modüllerinden oluşmaktadır. Güneş panelleri güneş paneli düzenleyicilerine bağlanmaktadır. Pil ise pil şarj dönüştürücü ve pil deşarj dönüştürücü üzerinden ana baraya bağlanmaktadır. Bu dönüştürücüler ile ana bara regülasyonu sağlamakta olup, regüle bara dağıtımleri aracılığıyla yüklere aktarılmaktadır.



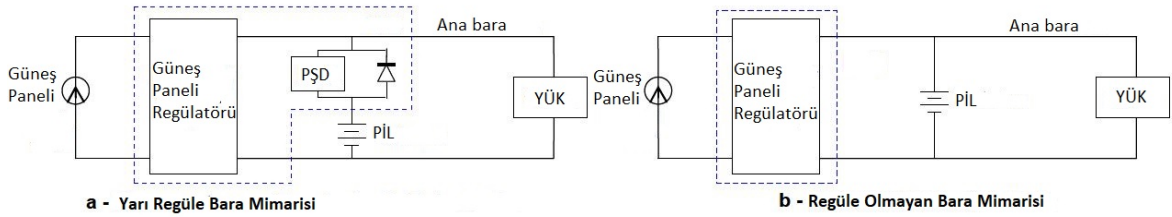
Şekil 3.17 Güç Düzenleme Birimi Blok Diyagramı

Bazı GDB topolojilerinde pil şarj ve pil deşarj dönüştürücüler çift yönlü olarak tek birim altında kullanılabilir. Bu da GDB’de büyük bir basitleştirmeye olanak tanımaktadır. Geleneksel olarak, uydu ana bara mimarileri tam regüle, yarı regüle ve regüle olmayan bara olarak sınıflandırılmaktadır [17, 19]. Tam regüle barada Şekil 3.17 ile gösterildiği üzere pili şarj ve deşarj etmek için ayrı

düzenleyicilere ihtiyaç bulunmaktadır. Tam regüle baralarda ana bara gerilimi dar bir aralıkta salınmaktadır. Bunun temel avantajı ise sistemde kullanılacak güneş panelinin çok daha rahat optimize edilebilmesidir.

Şekil 3.18 ile gösterilen yarı regüle bara yapısına sahip GDB’de pil deşarj dönüştürücüsü kullanılmamakta, onun yerine diyot aracılığıyla ana baraya bağlanmaktadır. Böylece güneş paneli uydu yüklerini ve pil şarjını karşılabilecek gücü üretebildiği durumda ana bara regüle durumda kalmaktadır. Fakat uydu tutulma dönemine girdiğinde uydu yükleri gücünü pilden karşılayacak olup, ana bara gerilim pil gerilimine düşecektir. Bu konfigürasyonda diyot sebebiyle nominal çalışma operasyonu için maksimum pil gerilimi ana bara voltajından yüksek olamaz.

Şekil 3.18 ile regüle olmayan baraya sahip GDB yapısı gösterilmektedir. Bu mimaride pil doğrudan ana baraya bağlıdır. Bu sebeple pilin şarj deşarj döngüsü sebebiyle gerçekleşen pil gerilimindeki değişiklik ana baraya ve yüklerimize yansımaktadır. Bu mimaride sadece güneş paneli düzenleyicileri bulunmakta olup, pil şarjını bu dönüştürücüler gerçekleştirilmektedir. Uydu yükleri de regüle olmayan ana baradan dağıtım üniteleri aracılığıyla beslenmektedir.



Şekil 3.18 Yarı Regüle ve Regüle Olmayan Bara Mimarileri

Regüle olmaya bara mimarisinin kullanımı, yüklerde veya dağıtım biriminde daha karmaşık ve genellikle daha büyük dönüştürücülere ihtiyaç oluşturmaktadır. Bunun yanında, en yüksek akım için hesaplanması gereken korumaların aşırı boyutlandırılmasına sebep olmaktadır. Regüle olmayan bara mimarileri, alt sistemde kullanılacak pilin konfigürasyonunu doğrudan etkilemektedir.

GDB gereksinimlerini daha iyi oluşturabilmek için güneş paneli ve pilin teknik özelliklerini anlamak önemlidir. Sonuçta GDB'nin amacı bu iki güç kaynağı tarafından sağlanan gücü

kontrol etmektir. Kullanılacak dönüştürücülerin gereksinimleri ise güneş paneli ve pillerin özelliklerine bağlı olmaktadır.

4. GÜNEŞ PANELİ REGÜLASYON YÖNTEMLERİ

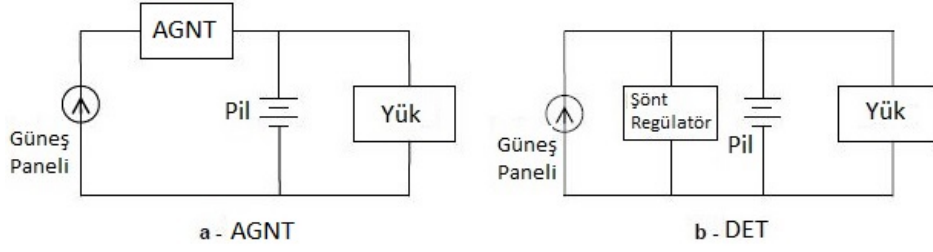
Güneş paneli ve pil içeren güç alt sistemi mimarilerinin güneş paneli regülasyonu için iki temel teknik yöntem bulunmaktadır;

- Azami Güç Noktası Takibi (AGNT) [4]
- Doğrudan Enerji Transferi (DET) [1, 17]

Bu yöntemlerden birinin seçimi, uydunun görev karakteristikleri, özellikleri ve elektriksel gereksinimleri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmektedir.

DET mimarisine sahip sistemlerde, güneş panelinde üretilen güç uydu yüklerine herhangi bir seri düzenleyici ihtiyacı olmadan doğrudan iletilmektedir. Güneş panelinde üretilen fazla güç ise güneş paneli kesimlerine bağlı paralel anahtarlar aracılığıyla kontrol edilmektedir. AGNT mimarisinde ise güneş paneli ile ana bara arasında seri düzenleyici kullanılarak güneş panellerinden, uydu yükleri ve pilin ihtiyaç duyduğu kadar güç temin edilmektedir.

Doğrudan ana baraya bağlı pil yapısına sahip iki farklı regüle olmayan ana bara mimarisi Şekil 4.1 ile verilmiştir. Şekil 4.1a'da azami güç noktası takibi yapan bir seri düzenleyiciye sahip AGNT mimarisi gösterilmektedir. Şekil 4.1b'de ise güneş paneli kesimlerine paralel bağlı anahtarlara sahip şönt düzenleyici yapısı verilmektedir. Bu yapıda güneş paneli uydu yüklerine diyot aracılığıyla doğrudan bağlanmaktadır. Her iki mimari için de avantajlarından yararlanmayı ve dezavantajları ortadan kaldırmayı veya en aza indirmeyi amaçlayan çeşitli varyasyonları bulunmaktadır.



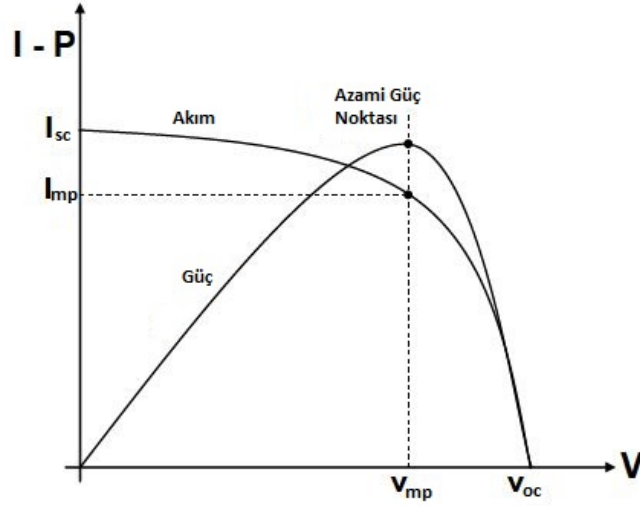
Şekil 4.1 Regüle Olmayan Bara Yapıları için AGNT ve DET Mimarileri

4.1. Azami Güç Noktası Takibi

Azami güç noktası takibi operasyonunda güneş paneline bağlı seri düzenleyici, güneş paneli çalışma noktasını değiştirerek, güneş panelinde üretilen maksimum gücü kullanabilmekte ve bu gücü yüklere ve pile transfer edebilmektedir.

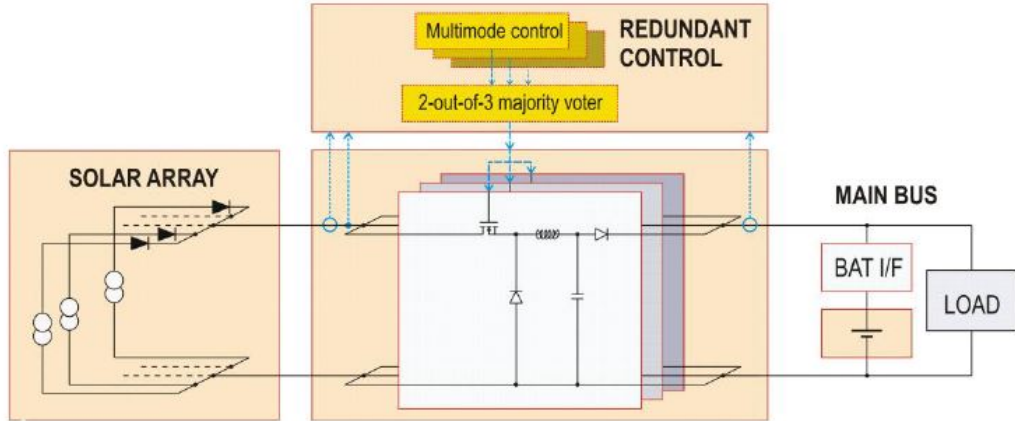
AGNT mimarisindeki seri düzenleyici, güneş panelinden yalnızca yükün ve pilin ihtiyaç duyduğu kadar gücü baraya transfer etmektedir. Uydu yükleri ve pil şarjı için güneş panelinin ürettiği maksimum güç değerinden daha fazla veya ona eşit bir güç gerektiğinde, AGNT etkinleştirilmekte ve azami gücün takibi gerçekleştirilmektedir. Aksi takdirde AGNT devre dışı kalmakta ve üretilen fazla güç güneş hücrelerinde kalarak sıcaklıklarının artmasına neden olmaktadır. AGNT takibi devre dışı bırakıldığında, AGNT tarafından kullanılan dönüştürücü, artık panelin maksimum güç noktasını izlemeyen, ancak yük ve pil tüketimindeki değişikliklere göre çalışma noktasını değiştiren sıradan bir düzenleyici haline gelmektedir.

Güneş hücreleri, ömür başlangıcında, tutulma çıkışı soğuk oldukları durumda daha yüksek gerilimdeyken daha fazla güç üretmektedirler [1]. Şekil 4.2’de, bir güneş panelinin voltaj-akım (V-I) ve voltaj-güç (V-P) eğrileri azami güç noktasıyla birlikte gösterilmektedir. Güneş paneli azami gücünü kullanabilmek için AGNT’nin (V_{mp} , I_{mp}) noktasında çalışması gerekmektedir. V-I eğrisi zamanla değiştiği için bu noktanın sürekli takip edilmesi gerekmektedir. I_{sc} ve V_{oc} noktaları güneş paneli kısa devre akımı ve açık devre gerilimini göstermektedir.



Şekil 4.2 Güneş Paneli Azami Güç Noktası

Güneş panelleri, regülasyon veya azami güç noktası takibi (AGNT) modlarında çalışabilen bir seri anahtarlı DA-DA dönüştürücü aracılığıyla ana güç barasını beslemektedir. Örnek dönüştürücü yapısı Şekil 4.3 ile gösterilmiştir.

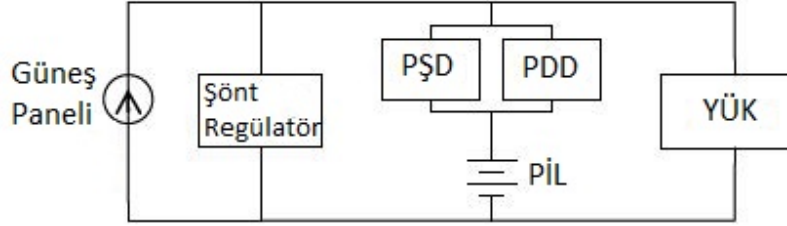


Şekil 4.3 AGNT Yöntemi Kullanılan Seri Düzenleyici Yapısı [8]

4.2. Doğrudan Enerji Transferi

DET mimarisine sahip bir sistemde güneş panelinde üretilen güç, herhangi bir seri dönüştürücü olmaksızın doğrudan ana baraya aktarılmakta ve daha sonra güç dağıtım üniteleri aracılığıyla yüklere iletilmektedir.

Şekil 4.4, tam regüle ana bara yapısındaki tipik bir DET mimarisine sahip bir güç düzenleme birimini göstermektedir [8]. Bu çizimde şönt düzenleyicinin sisteme paralel bağlandığı ve dolayısıyla güneş panelinin yüke doğrudan bağlandığı görülmektedir.

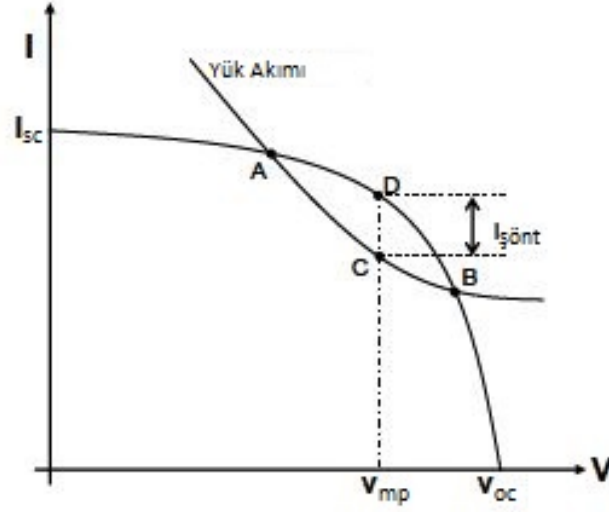


Şekil 4.4 DET Mimarisi Basitleştirilmiş Diyagramı

Şönt düzenleyicinin temel amacı güneş paneli üretilen fazla gücün ana baraya aktarılmasını engelleyerek ana bara regülasyonunu sağlamaktır. Paralel bağlı şönt düzenleyiciler üretilen fazla gücü güneş paneline yönlendirerek güneş paneli üzerinde harcamaktadır.

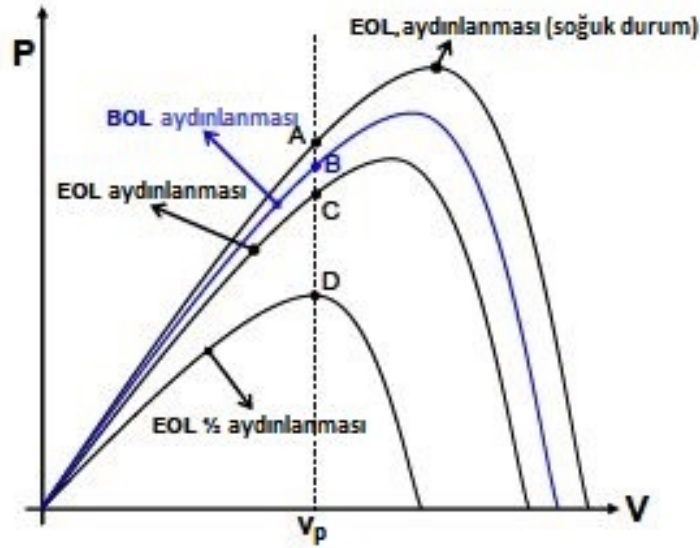
Şönt düzenleyici operasyon noktaları Şekil 4.5 ile verilmiştir. Bu grafikte yük akımı ve pil şarj akımına karşılık gelen yük akımı eğrisi ile güneş paneli gerilim-akım eğrisinin kesişimi dikkate alınmalıdır. Başlangıçta sistem, iki eğrinin kesişim noktası olan A ve B noktalarında çalışabilir, ancak A noktası doğası gereği kararsızdır. Bu nedenle sistem bir şönt düzenleyicisine sahip olmasaydı B noktasında çalışacaktı [3]. Fakat gerilimi düzenli tutmak için bir şönt düzenleyici kullanıldığından, sistem C noktasında çalışmaya zorlanmaktadır. Güneş paneli tarafından sağlanan akım (D noktası) ile yükün ihtiyaç duyduğu (C noktası) arasındaki fark olan fazla akım ($I_{şönt}$) şönt düzenleyici tarafından yönlendirilerek güneş paneli üzerinde harcanır.

Şekil 4.6'te, şönt düzenleyici kullanımının panel tarafından sağlanan gücün bir kısmının boşa harcanmasına neden olduğu gösterilmektedir. Grafikten görüleceği üzere panel çalışma gerilimi (V_p), ana bara gerilimine bağlıdır. Şekil 4.6'te A, B ve C çalışma noktaları maksimum güç noktaları değildir, dolayısıyla bu noktalar ile ilgili eğrilerdeki maksimum noktalar arasındaki güç farkı, şönt düzenleyici tarafından yönlendirilerek boşa harcanır. Bu şekilde panel yalnızca yarım aydınlatma ile çalışırken ve kullanım ömrünün sonundayken enerji israfı yapmadan en yüksek güç noktasında çalışacaktır.



Şekil 4.5 Şönt Düzenleyici Operasyon Noktası

Şüphesiz DET mimarisinin en büyük dezavantajı sistem maksimum güce ihtiyaç duysa bile güneş panelinin maksimum güç noktasında çalışmamasıdır. Bu da yükün ve pil şarjı için gereken gücü karşılayabilmek için güneş panelinin daha büyük boyutlu olması gerektiği anlamına gelmektedir.



Şekil 4.6 Şönt Düzenleyici Tarafından Harcanan Güç

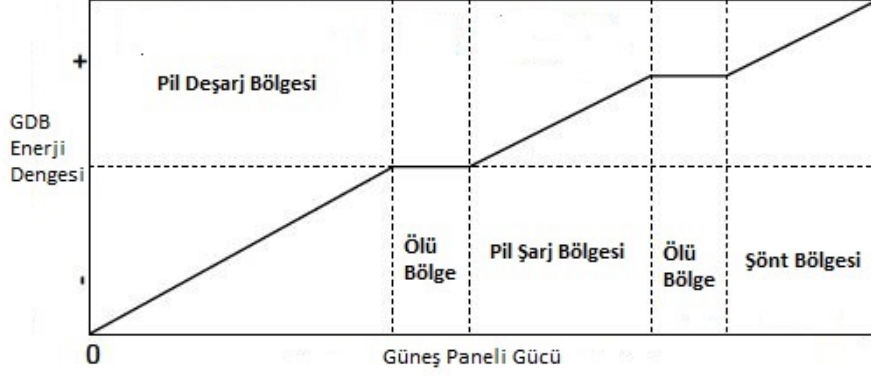
Öte yandan şönt düzenleyiciler, içerisinde DA-DA dönüştürücülerin kullanılmamasından

dolayı AGNT'den daha yüksek bir performansa sahiptir. Bu ve başka diğer sebeplerden dolayı AGNT yöntemi uydular için her zaman en iyi yöntem değildir.

Ana bara gerilimini düzenlemek için DET mimarisinin üç dönüştürücüsünün çalışmasını kontrol etmesi gerekir; Şönt düzenleyici, pil şarj dönüştürücüsü ve pil deşarj dönüştürücüsü. Ana bara geriliminden alınan hata sinyali ve güneş panelinden sağlanan güce göre hangi dönüştürücünün devreye gireceği belirlenmektedir. Bu çalışma yöntemi, üç bölgeli kontrol olarak bilinmekte ve her bölge, ana bara gerilimini kontrol eden dönüştürücülerden birini temsil etmektedir [14, 19].

Üç bölgeli kontrolün çalışma prensibi basit fakat kontrol algoritması oldukça karmaşıktır. Güneş panelinin aydınlatıldığı ve pillerin ve yükün ihtiyaç duyduğu gücün üzerinde güç sağladığı durumlarda, pillerin şarj edilmesi için gereken tüm enerjiyi sağlayan pil şarj dönüştürücü ve şönt bölgesinde çalışarak ana bara regülasyonunu sağlayan şönt düzenleyiciler bulunmaktadır. Bununla birlikte, yük ihtiyacı artarsa veya panel gücü, şönt düzenleyicilerin panelin tüm gücünü ana baraya ileterek anahtarlamayı durduracağı noktaya kadar düşerse, bu durumda pil şarj dönüştürücü, pillere iletilen gücü azaltarak ana bara gerilimini düzenlemesi gerekecektir. Bu durumda, şönt düzenleyiciler devre dışı bırakılır ve pil şarj dönüştürücüler, artık şönt düzenleyici alanında değil, pil şarj bölgesinde çalışarak ana bara gerilimini kontrol eder. Yük tüketimini daha da artırılırsa panel, sağlanan gücü veya bunların bir kombinasyonunu, yüke ve pillere artık yeterli gücün olmadığı noktaya kadar azaltır ve ardından pil şarj dönüştürücü devre dışı kalır ve piller sisteme güç sağlamaya başlar. Yükün güç ihtiyacının sağlanmasına yardımcı olmak için pil deşarj dönüştürücü, ana bara regülasyonu sağlamak ve dolayısıyla kontrolcü pil deşarj bölgesinde çalışır.

Şekil 4.7 ile DET mimarisinin dönüştürücülerinin çalışma bölgeleri gösterilmiştir. Ana bara hata sinyali ile güneş panelinden üretilen güce göre çalışma bölgesinin değiştiği gösterilmektedir. Ölü bölgeler, çalışma bölgeleri arasındaki geçişleri yavaşlatarak, ana barada oluşabilecek kararsızlıkları veya yüksek dalgalanmaları engellemektedir.



Şekil 4.7 DET Mimarisi Operasyonel Modları

4.3. Yöntemlerin Karşılaştırılması

Uydu için en doğru güç alt sistemi mimarisini belirlemek uydunun elektriksel gereksinimlerine bağlıdır. Ancak hangi yöntemin en iyi seçenek olduğu her zaman açık değildir çünkü bazı durumlarda bir mimarinin diğerlerine göre önemli avantajları bulunmamaktadır [20]. Böyle durumlarda belirli bir mimarideki olumlu bir deneyim ve tarihçe seçimi belirlemektedir.

Genel olarak mimari seçiminde en çok ağırlık verilen kriterler kütle, verimlilik, güvenilirlik ve maliyettir. Fakat bu mimarilerin dünya çapındaki kullanım geçmişine dayanarak bir analiz yapıldığında, AGNT'nin geleneksel olarak alçak yörüngedeki uydularda ve 500 W'a kadar güçlerde kullanıldığı görülmektedir. Bunun sebebi, bu uyduların alçak yörüngede olduklarından dolayı güneş ışığını kısıtlı bir süre görmesi ve bu nedenle pillerini mümkün olduğu kadar çabuk şarj etmeleri gerekmesidir. AGNT yöntemi ile de güneş panelinin maksimum gücünün kullanılması mümkün olmaktadır. Daha yüksek güçler için verimlilik, termal yayılım ve kütle artışı ile ilgili sorunların daha kritik hale gelmekte ve güneş panelinin maksimum güç noktasında çalışma avantajı ortadan kalkmaktadır. Güneş panellerinin sıcaklık, aydınlanma, güneş ışığı geliş açısı ve güneşe uzaklık parametrelerinde büyük farklılıklar gösteren görevler için AGNT kullanımı avantajlı olmaktadır.

Çizelge 4.1 ile bu iki yöntemin temel avantaj ve dezavantajları verilmektedir.

Çizelge 4.1 DET ve AGNT mimarilerinin avantaj ve dezavantajları [1]

	DET	AGNT
Avantajlar	Yüksek Verim	Güneş panelini gücünden maksimum faydalanma
	Sade tasarım ve düşük kütle	Daha hızlı pil şarjı
	Modülerlik	Daha küçük güneş paneli
Dezavantajlar	Daha büyük güneş paneli	Düşük verim
	Fazla düzenleyici sayısı	Fazla kütle
		Daha yüksek termal yayılım

5. ŞÖNT DÜZENLEYİCİLER

Şönt düzenleyiciler DET mimarisinin en önemli bileşenidir. Şönt düzenleyiciler, güneş panelleri, yükler ve pil şarjı için yeterli güç üretimi sağladığı sürece ana bara regülasyonunu garanti etmektedir. Şekil 4.4’de görüldüğü üzere fotovoltaik hücrelerin ürettiği fazla güç, şönt düzenleyici tarafından yönlendirilerek regülasyon sağlanmaktadır.

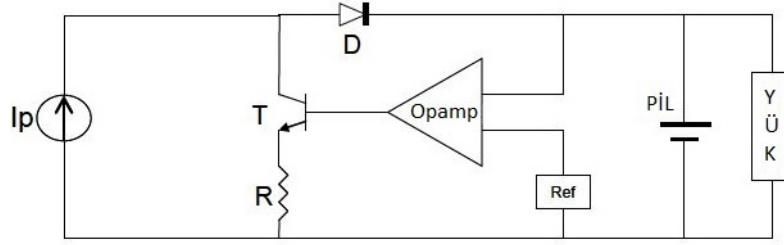
Ana bara regülasyonunu gerçekleştirebilen şönt düzenleyicilerin farklı konfigürasyonları bulunmaktadır. Bunların bazıları pil şarj işlevini de yerine getirebilmektedir. Uydularda en çok kullanılan düzenleme tekniği olarak şönt düzenleyiciler ile ilgili olarak birçok araştırma yapılmış olup, çeşitli teknikler geliştirilmiştir.

5.1. Lineer Şönt Düzenleyici

Lineer şönt düzenleyici, aynı zamanda güç tüketen şönt düzenleyicisi olarak da adlandırılmakta olup, Şekil 5.1 [1] ile gösterilmektedir.

Bu bölümün amacı şönt düzenleyici çeşitlerinin çalışma prensiplerinin anlatılması olduğundan, diyagramları ve operasyon anlatımını daha basitleştirebilmek için pil şarj ve deşarj işlevleri bu bölümde belirtilmemektedir.

Lineer şönt düzenleyici’nin çalışma prensibi oldukça basittir. Ana baradan alınan gerilim sinyali bir referansla karşılaştırılarak bir hata sinyali oluşturulmaktadır. Bu hata sinyali T transistörünü ilettime geçirerek fazla gücü R direnci üzerinde harcamaktadır. Transistör



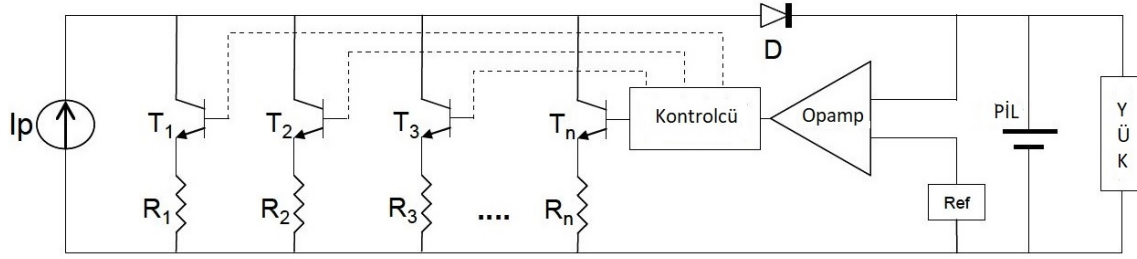
Şekil 5.1 Lineer Şönt Düzenleyici

aktif veya saturasyon bölgesinde çalışabileceğinden, yönlendirilen akım sıfırdan R tarafından sınırlanan maksimum değere kadar doğrusal olarak değişir. D diyotunun işlevi, akımın ana baradan I_p akım kaynağı ile temsil edilen güneş paneline geri dönüşünü önlemektir. Blok diyagramda operasyon için elzem olan parçalar belirtilmekte olup, sürücü, koruma ve kompanzasyon devreleri gösterilmemektedir.

Bu topolojinin iki temel sorunu bulunmaktadır. Bunlardan birisi yüksek termal yayılım, diğeri ise kullanılacak direncin büyüklüğüdür. Birkaç watt'lık bir güç düzenleme birimi maliyetinde bu sorunlar çok büyük boyutlara ulaşmamakta fakat yüksek güçlü güç düzenleme birimi maliyetlerinde bunun mümkün olmayacağı anlaşılmaktadır Bunun nedeni, direnç boyutunun büyümesi ve termal yayılımın ekipmanın gücüyle birlikte artmasıdır. Örnek olarak, 200 W'lık bir güneş paneline sahip ve belirli bir zaman aralığında yalnızca 50 W tüketen küçük bir uyduda, lineer şönt düzenleyici'nin 150 W'lık bir termal yayılım yapması gerekmektedir. Böyle bir termal yayılımın yönetilmesi ise oldukça zor olmaktadır.

5.2. Sıralı Lineer Şönt Düzenleyici

R direnci ve T transistörü üzerine düşen termal yayılımı azaltmanın bir yolu sıralı lineer şönt düzenleyici kullanmaktır. Sıralı lineer şönt düzenleyici blok diyagramı Şekil 5.2 ile verilmiştir.



Şekil 5.2 Sıralı Lineer Şönt Düzenleyici

Bu durumda, üretilen fazla güç birden fazla direnç üzerinde (R_1, R_2, \dots, R_n) sırayla dağıtılır. Lineer şönt düzenleyicilerden farklı olarak, ana baradan alınan hata sinyalini kullanarak kontrolcü transistörleri sırasıyla devreye alarak ana bara regülasyonunu gerçekleştirmektedir.

Hata sinyali sıfır olduğunda tüm transistörler iletimden çıkmakta ve panel gücü yönlendirilmeden ana barya aktarılır. Artan hata sinyaliyle, yani uydu tarafından kullanılmayan gücün artmasıyla, ilk transistör T_1 iletime geçer, böylece akımın bir kısmı onun üzerinden yönlendirilir ve fazla güç R_1 'de dağılır. T_1 satürasyona ulaştığında bu durumda tutulur ve kontrolcü T_2 'yi iletime geçirir ve akım T_1 ve T_2 tarafından yönlendirilir. T_2 'nin satürasyona girmesiyle T_3 iletime geçer ve bu durum dizideki son transistörün (T_n) durumu değişene kadar devam eder.

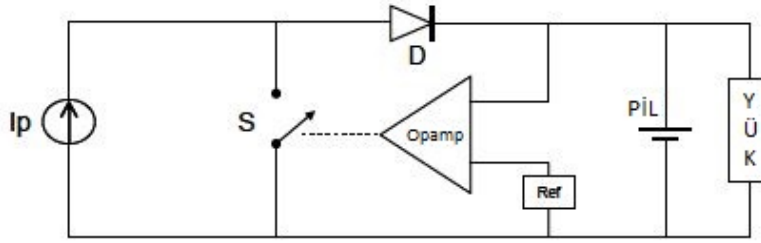
Hata sinyalinin azalmasıyla ise de tam tersi bir süreç işlemektedir. Ana baradan çekilen yük arttığında panelden dirençlere yönlendirilen fazla güç transistörlerin iletiminin sırasıyla kesilmesiyle ana baraya aktarılmaktadır.

Bu topolojiyle termal yayılım, kütle ve hacim sorunları çözülmemekte fakat harcanacak güç birden fazla direnç ve transistöre dağıtılmaktadır.

5.3. Anahtarlamalı Şönt Düzenleyici

Anahtarlamalı şönt düzenleyici ile lineer şönt düzenleyicilerde fazla gücün direnç üzerinde harcanması ile yaşanan termal problemlerin önüne geçilmektedir. Bu yapıda herhangi bir direnç kullanmadan güneş panellerinde üretilen fazla güç, şönt anahtarı iletime geçirilerek güneş paneline geri gönderilmesiyle yönetilmektedir.

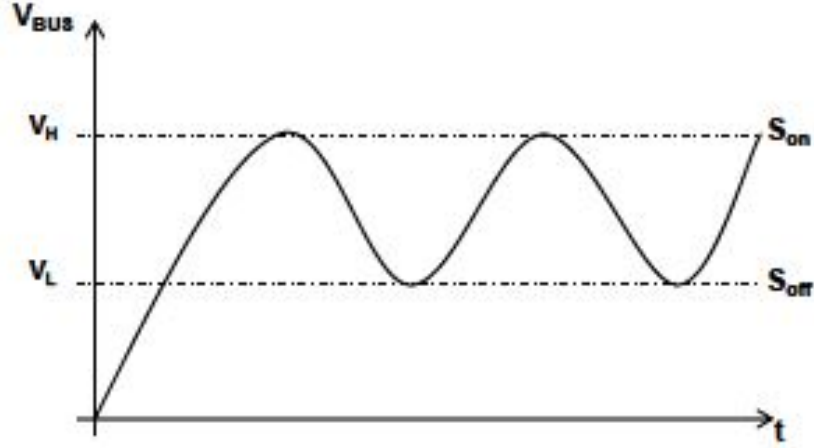
Şekil 5.3'te anahtarlama şönt düzenleyici basitleştirilmiş diyagramı verilmiştir. BU yapıda temel bileşenler şönt anahtarı, ana bara diyodu ve kontrolcü devresidir. Güneş panelinde üretilen akım, ana baradan alınan gerilim bilgisi doğrultusunda üretilen kontrol sinyali ile iletme geçirilen şönt anahtarı ile kontrol edilmektedir. Yük ihtiyacı güneş panelinden üretilen güçten fazla olduğu durumda şönt anahtarı iletimden çıkmakta ve tüm güç doğrudan baraya aktarılmaktadır. Fakat yük ihtiyacı güneş panelinde üretilen güçten düşük olduğunda ise şönt anahtarı aç/kapa yapılarak yük ihtiyacı kadar olan akımı ana baraya aktarmaktadır. Ana bara diyodu, şönt anahtarı iletime geçirildiği durumda ana baranın kısa devre olmasını engellemektedir. Bu yapıda ana bara gerilim dalgalanmasını azaltmak için ana baraya bağlı kapasitör bankası kullanılabilir [21].



Şekil 5.3 Anahtarlama Şönt Düzenleyici

Şekil 5.4 ile anahtarlama şönt düzenleyicinin sınır döngüsü grafiği verilmiştir. Ana bara gerilimi yükselip üst sınıra (V_H) ulaştığında, komparatör, ana bara geriliminin referans gerilimin (Ref) üzerinde olduğunu tespit edip, çıkışının seviyesini yüksek olarak değiştirerek şönt anahtarını iletime geçirir ve güneş paneli akımını şöntler. Bu sayede güneş paneli akımı ana baraya gitmek yerine güneş panelinin kendisine yönlendirilmektedir. Bu durumdayken doğal olarak ana bara gerilimi düşmeye başlar ve alt sınıra (V_L) ulaşana kadar düşmeye devam eder. Ana bara gerilimi referans gerilimin altına düştüğünde ise şönt anahtarı iletimden çıkarılarak tüm güneş paneli akımının ana baraya aktarılmasını sağlamaktadır. Ana bara regülasyonu bu döngüyle birlikte sürekli devam etmektedir.

Anahtarlama şönt düzenleyici çalışma frekansı ana bara kapasitansı, güneş paneli kesim akımı, yük akımı ve sınır döngüsü limit değerleri arasındaki farka bağlı olarak değişmektedir. Çalışma frekansı denklemi 7 ile gösterilmektedir. Yük akımı, güneş panelinin tam yarısı



Şekil 5.4 Anahtarlama şönt düzenleyici sınır döngüsü operasyonu

olduğu durumda ise sistem maksimum çalışma frekansında çalışmaktadır. Maksimum çalışma frekansı denklemi 10 ile gösterilmiştir [15].

$$F_{sw} = \frac{(I_P - I_L)I_L}{4C(V_H - V_L)} \quad (5)$$

$$F_{Maksimum} = \frac{I_P}{4C(V_H - V_L)} \quad (6)$$

Anahtarlama şönt düzenleyici, uydudaki termal yayılım sorununu, fazla gücün güneş hücreleri üzerinde harcanmasını sağlayarak çözmektedir. Fakat devre anahtarlamasından dolayı radyasyon ve iletim yoluyla elektromanyetik girişim (Elektromanyetik Girişim – EMI) oluşmaktadır. Anahtarlama şönt düzenleyici'nin ürettiği EMI seviyelerine bağlı olarak uydunun kendi işleyişine ve diğer alt sistemlere olan etkilerini önlemek için özel filtrelerin kullanılması gerekmektedir.

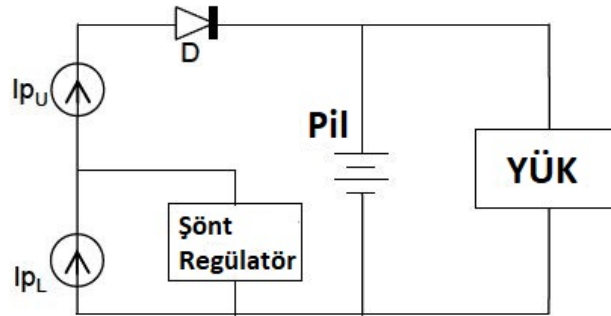
Devre nin çalışma frekansı, güneş panelinden kaynaklı frekans limitlerinin geçmemelidir. Bu limit, güneş hücrelerinin kendi iç parazitik kapasitanslarından kaynaklanmalıdır. Güneş paneli kesimlerinin bağlı anahtar iletime geçirildiğinde, bu parazitik kapasitansların anlık olarak anahtar üzerinden akmaktadır. Anahtarın sağlığını korumak amacıyla hat üstüne bu

parazitik etkilerden kaynaklı yüksek akım sıçramalarını sönmölemek için pasif veya aktif akım limitleyiciler kullanılması gerekmektedir [22].

5.4. Parçalı Şönt Düzenleyici

Anahtarlamalı şönt düzenleyicilerin temel zorluklarından biri ana bara gerilim dalgalanma seviyesinin düşürölmesidir. Yüksek güçlerde bu dalgalanmayı düşürebilmek için ana bara kapasitansına yükseltmek gerekmektedir. Fakat bu toplam kütleyle oldukça olumsuz etki etmektedir. Bir diğör yöntem ise anahtarlama frekansını yükseltmektir. Bunun dezavantajları ise şönt anahtarında yaşanacak yüksek termal yayınım ve EMI problemleridir. Parçalı şönt düzenleyici yapısı kullanılarak aynı güç seviyesi için ana bara gerilim dalgalanması elde edilebilmektedir [23].

Örnek bir parçalı şönt düzenleyici yapısı Şekil 5.5 ile verilmiştir.

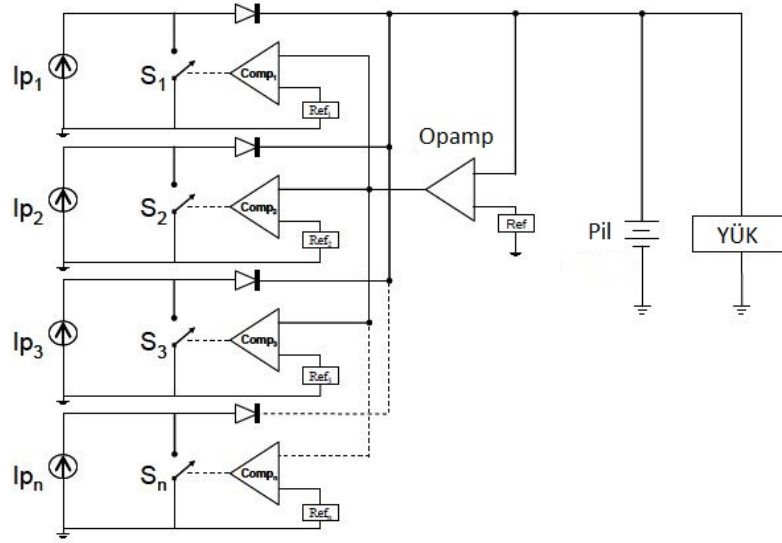


Şekil 5.5 Parçalı Şönt Düzenleyici

Parçalı şönt düzenleyici operasyonu anahtarlamalı şönt düzenleyiciler ile oldukça benzerdir. Sadece güneş paneli kesimlerinin bir kısmı ana bara doğrudan bağlanmaktadır. Ana baraya doğrudan bağlanacak kesimlerin toplam güç miktarı oldukça önemlidir. Tasarım yapılırken bu kesimlerin toplam gücünün uydunun minimum güç tüketiminden fazla olmadığı garanti edilmelidir. Aksi takdirde güneş paneli maksimum güç ürettiği koşulda bu kesimlerde şönt operasyonu yapılamayacağı için ana barada aşırı gerilim koşulları oluşabilir veya pil aşırı şarj edilebilir. Şönt anahtarlarına sahip kesimlerin çalışma prensibi anahtarlamalı şönt düzenleyiciler ile aynıdır.

5.5. Anahtarlamalı Sıralı Şönt Düzenleyici

Anahtarlamalı sıralı şönt düzenleyicileri, birden fazla anahtarlamalı şönt düzenleyicinin bir arada çalışması prensibine dayanmaktadır. Güneş panelinde bulunan kesimleri tek bir düzenleyiciye bağlamak yerine her bir kesime ait şönt düzenleyiciye bağlayarak, bu kesimler sıralı bir şekilde iletme geçirilebilmektedir. Bu yapıda her bir anahtarlamalı şönt düzenleyici kendi sınır döngüsü limitlerine sahip olmakla birlikte, aynı anda iletme geçmemeleri için bu limit değerleri iç içe geçmeyecek şekilde ayarlanmaktadır. Bu yapı ana bara gerilim dalgasını artırmadan daha düşük ana bara kapasitansı kullanmayı ve daha düşük frekansta anahtarlama yapmayı elverişli kılmaktadır. Şekil 5.6 ile anahtarlamalı sıralı şönt düzenleyici yapısına bir örnek verilmiştir.



Şekil 5.6 S3R Topolojisi

Ana baradan alınan gerilim bilgisi bir referans değerle karşılaştırılarak hata sinyali oluşturulmaktadır. Bu ortalama hata sinyali her bir düzenleyici kesimine ait komparatörlere ayrı ayrı iletilmektedir. Bu hata sinyali ile kesimlerin sınır döngüsü referans değerleri karşılaştırılarak ilgili şönt anahtarının iletme girip girmeyeceği belirlenmektedir. Yük ihtiyacı güneş panelinde üretilen güçten fazla olduğu durumda hata sinyali düşeceği için anahtarlar iletimden çıkarak tüm güneş paneli akımlarını ($I_{p1}, I_{p2}, I_{p3}, \dots, I_{pn}$) ana baraya aktarmaktadır. Güneş panelinin ürettiği güç arttığında ise en düşük referansa sahip kesimden

başlayarak şönt anahtarları ilettime girmeye başlayacaktır. Güneş panelinde üretilen gücün yük ihtiyacından fazla olduğu durumda şönt operasyonu yapılarak fazla gücün güneş paneli üzerinde harcanması sağlanmaktadır.

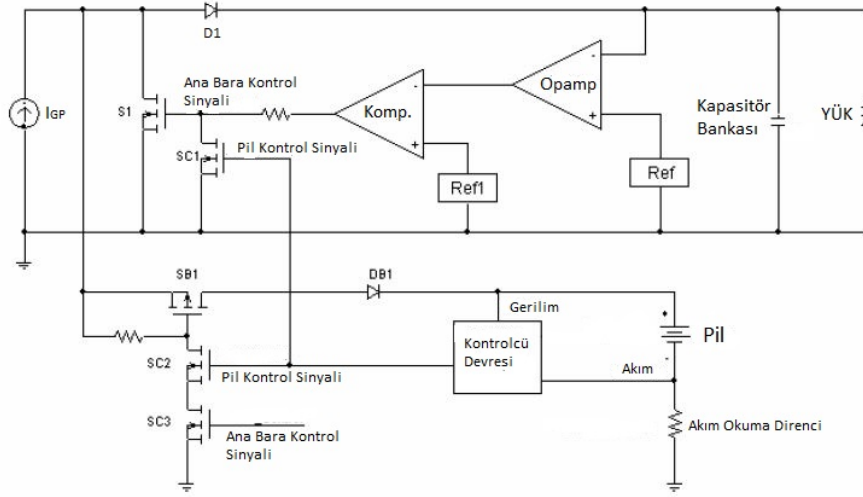
S3R yapısı ana bara gerilimini azaltmak amaçlı kullanılan yüksek bara kapasitansı ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Kesim sayısı artırılarak toplam dalgalanma azaltılabilmekte ve daha küçük kesim akımları anahtarlayarak EMI etkisi azaltılabilmektedir. Bu yapının dezavantajı ise kesim sayısını artırdıkça şönt anahtarı, ana bara diyodu, komparatör devresi ve sürücü devresi sayısında aynı şekilde artmasıdır. Bu nedenle kesim sayısını çok fazla artırmadan sistem ihtiyaçlarını karşılayabilecek seviyede bir S3R tasarımı yapılması boyut, kütle ve maliyet açısından gereklidir.

5.6. Anahtarlamalı Sıralı Şönt Seri Düzenleyici

Anahtarlamalı sıralı şönt seri düzenleyici (S4R) yapısı, pil şarjı için kullanılan dönüştürücüleri ortadan kaldırmak hedefiyle S3R topolojisinden türetilmiştir. Yüksek güçlü uyduların geliştirilmesi daha büyük pillerin kullanımını gerektirmektedir. Bununla beraber pil şarj ve deşarjı için kullanılan dönüştürücülerin kütle, hacim ve termal kayıpları da artmaktadır.

Şekil 5.7 ile görüldüğü üzere S4R yapısı S3R yapısıyla oldukça benzerdir [15]. S3R yapısından farklı olarak pil şarj operasyonu için pile seri bağlı anahtar ve diyot bulunmaktadır. Pil gerilimi ve pil akımı bilgileri kullanılarak oluşturulan hata sinyali ile bu seri bağlı anahtar kontrol edilerek pil şarjı gerçekleştirilmektedir. Bu yapıda herhangi bir endüktör kullanılmadığından dolayı pil şarj akımı kare dalga şeklinde olmaktadır. Pil şarjı için gerekli olan sabit akım ve sabit gerilim kontrol döngüleri pil şarj kontrolcüsü içerisinde bulunmaktadır.

S4R topolojisi ile güneş paneli kesimlerinin kontrolü daha karmaşık hale gelmektedir. Artık bir güneş paneli düzenleyici kesimi, yüke, pile veya her ikisine de güç sağlayabilir veya şönt operasyonu gerçekleştirebilir. Öncelik uydu yüklerinin ihtiyacını karşılamak olduğundan, gerekli güce göre ve ana bara gerilimini regüle edilecek şekilde kesimlerden biri, bir



Şekil 5.7 S4R Blok Diyagramı

kısmı veya tamamı ana baraya bağlanabilir. Bu kesimlerin çalışması, S3R topolojisi ile tamamen aynıdır. Tüm kesimler birbirinden bağımsızdır ve kendi sınır döngüsü limitlerine sahiptir. Pil şarjı için yerleştirilen seri anahtar ise iletme girmeyerek sistemin çalışmasını etkilememektedir.

Düzenleyici kesimlerinin bir kısmı veya uydu yükleri tarafından kullanılmayanların tamamı, pilin gerekli güce göre şarj edilmesi için kullanılmaktadır. Bu kesimlerin pil şarjı için kullanılabilmesi için seribağlı anahtarın iletme geçmesi gerekmektedir. Pil gerilimi ana bara geriliminden düşük olduğundan anahtar iletme geçtiğinde kesim akımı pile iletilmektedir. Bir kesimde toplam akımın yalnızca bir kısmına ihtiyaç duyuluyorsa, şönt anahtarı, pil şarj kontrolcü sinyali kullanılarak pil şarj anahtarı kontrol edilir. Görüldüğü üzere aynı anda kontrol edilen iki kesim olabilmektedir. Fakat bu kesimlerin biri yüke, diğeri pile bağlanabilmektedir. Uydu yükleri veya pil şarj için kullanılacak güneş paneli kesim akımları şönt anahtarı aracılığıyla kısa devre yapılır[16].

Daha önce de dikkat çekildiği üzere, S4R topolojisinin en büyük avantajı, regüle bara yapısına sahip güç düzenleme birimleri içerisinde kullanılan pil şarj dönüştürücülerin ortadan kalkmasıdır. S4R yapısı ile toplam kütle ve hacim azalmakta, yüksek veriminden dolayı ekipman ısı yayılımları düşmektedir. Bir diğer avantajı ise S4R yapısının modüler ve yüksek güvenilirliğe sahip olmasıdır. Pil şarj kapasitesi artırılmak istendiğinde paralel S4R kesimleri

sisteme eklenerek basit bir şekilde ekipman şarj kapasite artırılabilir. S4R yapısının pil şarj dönüştürücülere göre güvenilirliği yüksek olduğundan, uzun görev ömrüne sahip uydularda kullanım için çok uygun bir topoloji haline gelmektedir.

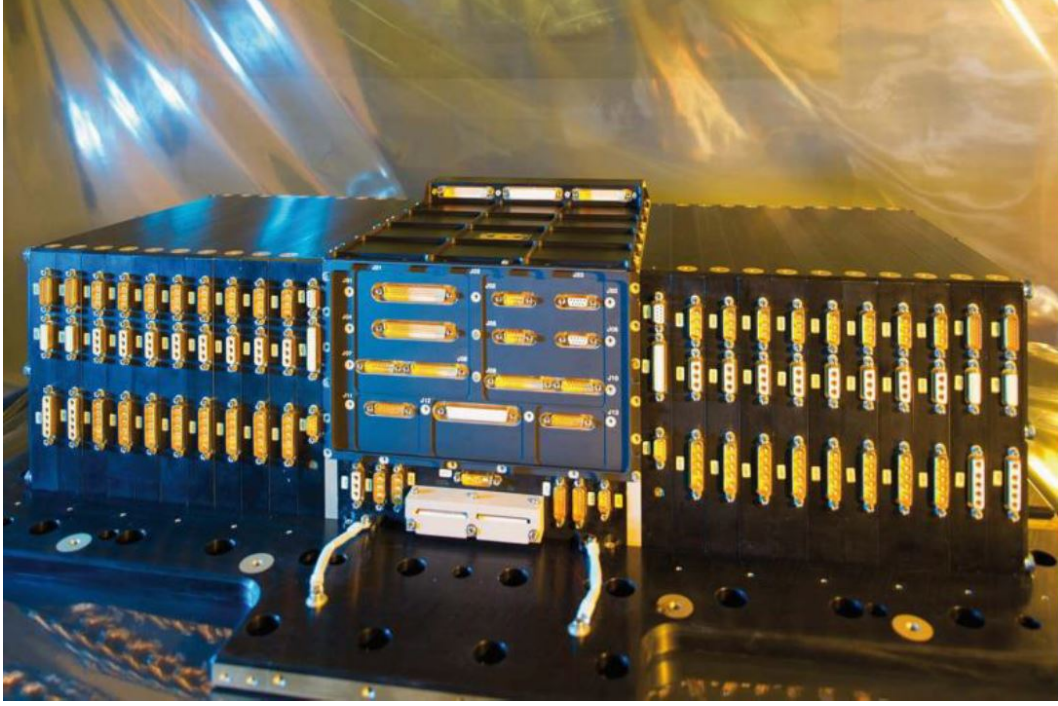
5.7. Şönt Düzenleyicilerin Uzay Endüstrisindeki Uygulamaları

Şönt düzenleyiciler, uydu elektriksel güç alt sistemi ekipmanlarından olan güç düzenleme birimleri içerisinde kullanılmaktadır. Kullanılan şönt düzenleyici tipi, uydunun görev yükü, yörüngesi ve güç seviyesinde göre değişiklik göstermektedir.

Tam regüle bara yapısını sahip uydular ihtiyaç duydukları yüksek güç seviyesinden dolayı çoğunlukla 50V ve 100V bara gerilimine sahiptir. Bu uydularda kullanılan güç düzenleme birimleri birçok farklı işleve sahip modullerden meydana gelmektedir. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 ile 100V ana baraya sahip bazı güç düzenleme birimi örnekleri gösterilmiştir.

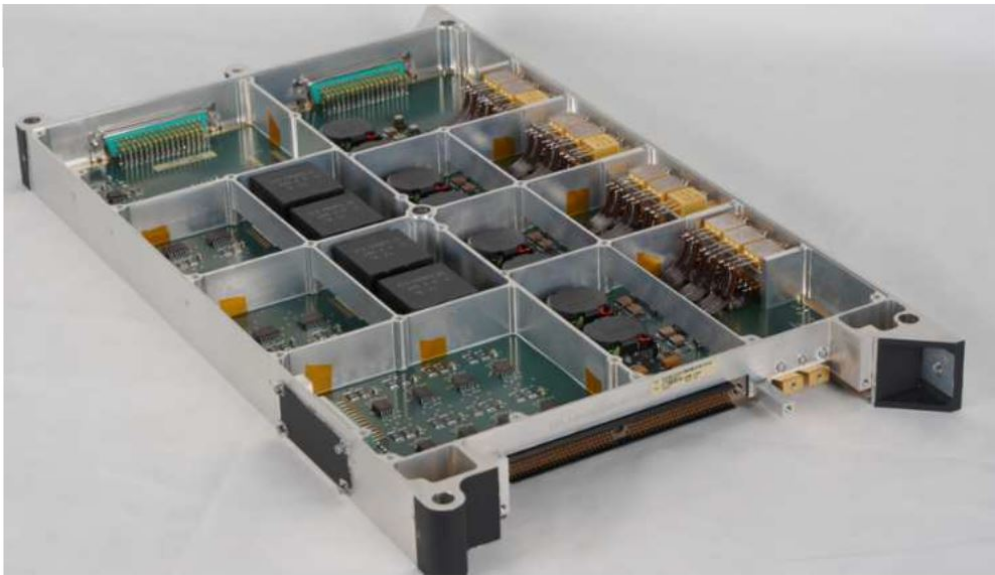


Şekil 5.8 TÜBİTAK UZAY Güç Düzenleme Birimi [9]



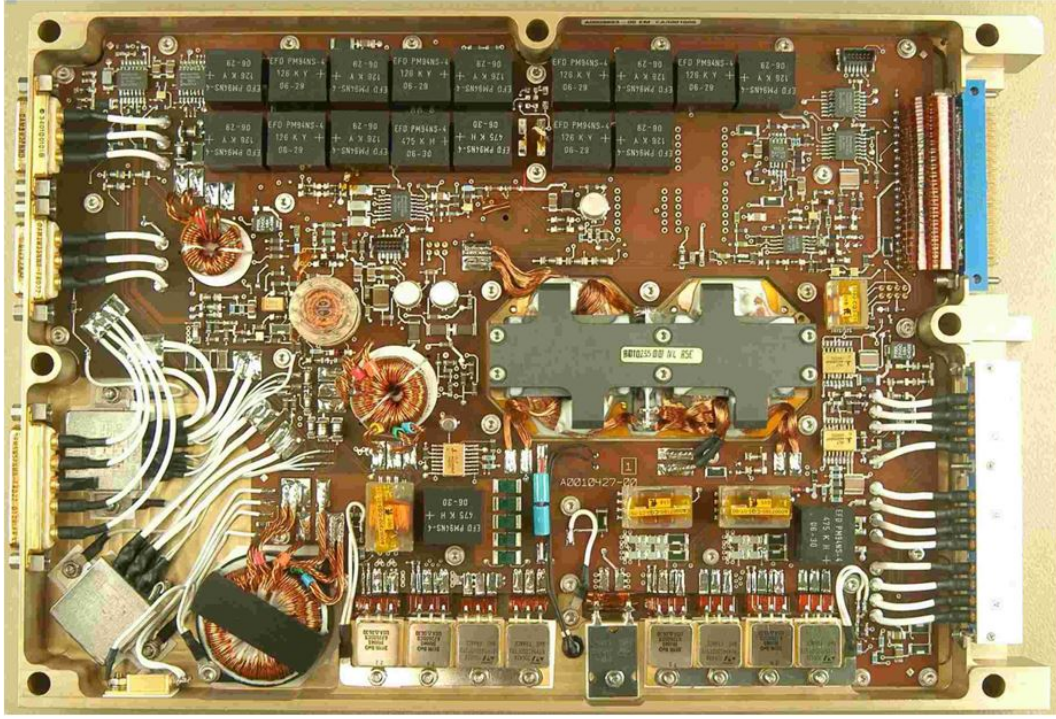
Şekil 5.9 AIRBUS Güç Düzenleme Birimi [10]

Şekil 5.8 ile gösterilen güç düzenleme biriminde toplamda 12kW güneş paneli gücünü yönetebilmek için 6 S3R modülü Şekil 5.10 kullanılmıştır. Yaklaşık 800W gücünde bir pil şarj işlevi için ise bu modüllere ek olarak 2 adet pil şarj modülü kullanılmıştır. Bu modüller, 380mm x 240mm x 32mm boyutlarında olup, yaklaşık 2kg ağırlığa sahiptir.



Şekil 5.10 TÜBİTAK UZAY Güneş Paneli Regülatörü [11]

Şekil 5.9 ile gösterilen güç düzenleme biriminde toplamda 12kW güneş paneli gücünü yönetebilmek için 6 S3R modülü Şekil 5.11 kullanılmıştır. Yaklaşık 800W gücünde bir pil şarj işlevi için ise bu modüllere ek olarak 1 adet pil şarj modülü kullanılmıştır. Bu modüller, 323mm x 220mm x 26mm boyutlarında olup, yaklaşık 2.4kg ağırlığa sahiptir.



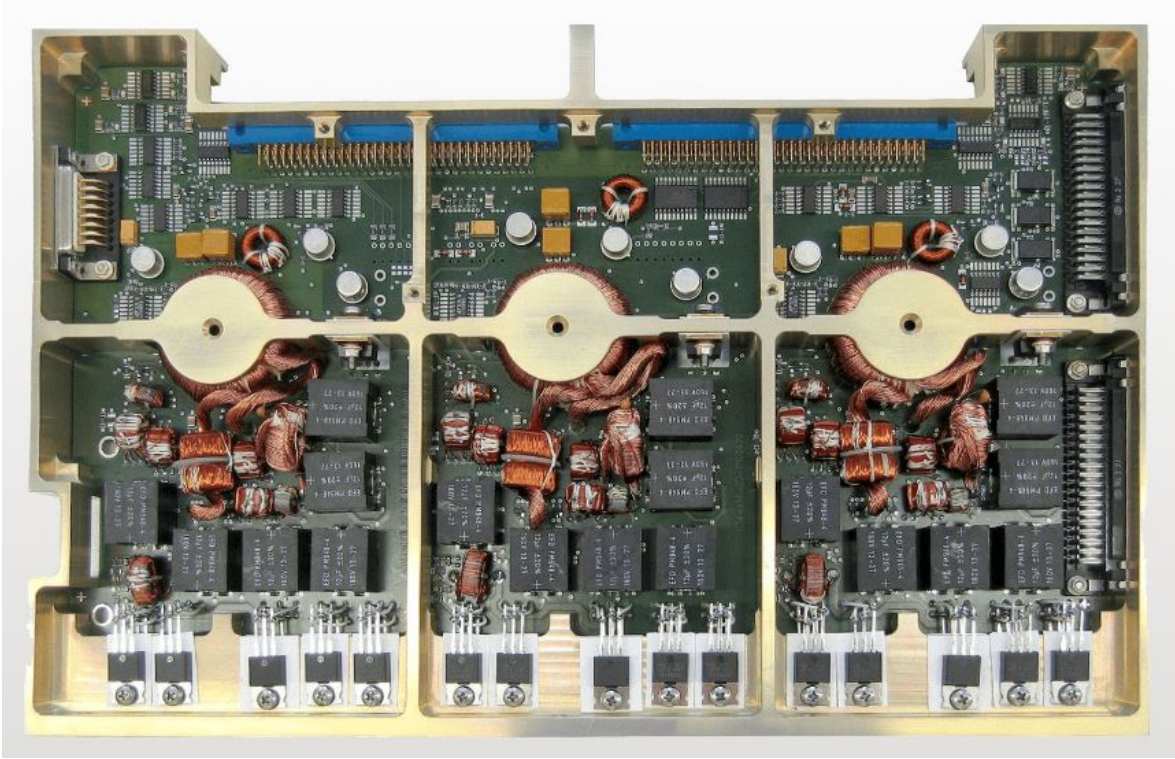
Şekil 5.11 AIRBUS Güç Modülü [10]

Bu örneklerden görüldüğü üzere S3R temelli tasarlanan GDB'lerde pil şarj işlevi için ekstra modül ihtiyacı doğmaktadır. Bu nedenle boyut, kütle ve ısıl açıdan daha kullanışlı olan S4R yapıları üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Literatür araştırması kapsamında S4R yapısıyla ilgili olarak [24] ve [16] çalışmaları incelenmiştir. Fakat her iki çalışmada 50V regüle bara yapısına uygun bir S4R düzenleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. 100V tam regüle yapısına uyumlu detaylı bir S4R çalışması literatürde bulunmamaktadır.

[24] makalesinde 193mm x 150mm x 24mm boyutlarında yaklaşık 472 gram ağırlığında bir S4R modülü anlatılmaktadır. Bu modül 50V tam regüle ana bara yapısına uyumlu olup, 3A'lık toplam 4 kesime sahiptir. Verimi ise yaklaşık 97.8% olarak belirtilmiştir.

[16] makalesinde ise prototip seviyesinde bir çalışma yapılmış olup, 50V baraya uyumlu 1.5A'lık toplam 4 kesime sahip bir S4R tasarımı anlatılmaktadır.



Şekil 5.12 ASP Equipments Gmbh Güneş Paneli Regülatörü

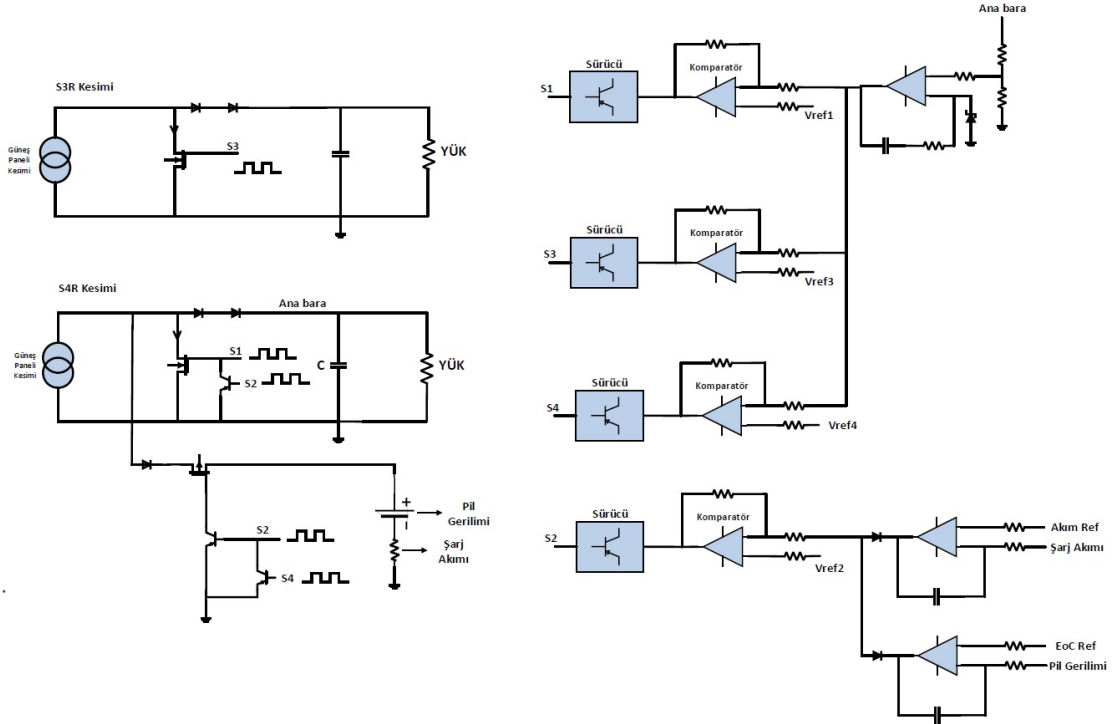
Tez kapsamında gerçekleştirilen S4R tasarımı 2.5A'lık toplam 2 kesime sahiptir. 100V uyumlu olarak tasarlanan bu yapıda bir kesimde 250W'a kadar güneş paneli gücü kontrol edilebilmektedir. Mevcut tasarımda kesim sayısı artırılarak bir haberleşme uydusunun ihtiyacının güneş paneli gücü ve pil şarj gücünü karşılayabilecek bir düzenleyici tasarımı yapılabilmektedir. 380mm x 240mm x 32mm boyutlarında, yaklaşık 2kg ağırlığa bir modülde yaklaşık 2.5A'lık toplam 8 adet S4R kesimi yerleştirilebileceği öngörülmektedir. Bu sayede mudail uydularda pil şarjı için kullanılan modüllerden tasarruf edilebilmektedir. Ayrıca yüksek verimi nedeniyle pil şarj düzenleyicisine sahip yapılara göre ısı açısından oldukça avantajlı hale gelmektedir. Geleneksel pil şarj düzenleyicilerde yaklaşık %92 olan dönüştürücü verimi, doğrudan enerji transferi yöntemi sayesinde S4R yapısında %98 üzerine çıkmaktadır.

6. GÜNEŞ PANELİ DÜZENLEYİCİ TASARIMI

Tez kapsamında tasarlanan güneş paneli düzenleyici aşağıda belirtilen tasarım bloklarını içermektedir.

- S3R ve S4R güç dönüştürücü blokları
- Ana bara ve pil hata yükseltici
- Sürücü devreleri
- DAC ve referans gerilim entegreleri
- Kapasitör bloğu
- DA/DA dönüştürücü

Tasarlanan güneş paneli düzenleyicisini blok diyagramı Şekil 6.1 ile verilmiştir.



Şekil 6.1 Güneş Paneli Düzenleyici Blok Diyagramı

S3R ve S4R yapısı ve genel çalışma mantığı Bölüm 5.5. ve Bölüm 5.6. ile verilmiştir. S3R ve S4R kesimlerinde bulunan şönt anahtarı ana bara gerilim hata sinyali doğrultusunda yük aktarılan gücü kontrol etmektedir. Ana bara gerilim hata sinyali, ana bara hata yükselticisi tarafından oluşturulmaktadır. Tasarımda PI tipi kontrolcü tercih edilmiş olup, böylece yük giriş çıkışlarında DC hata elimine edilmektedir.

Pil şarj kontrolü için ise pil hata yükselticisi devresi tasarlanmıştır. Bu kontrolcü sabit akım ve sabit gerilim olmak üzere 2 farklı kontrol döngüsü içermektedir. Bu döngüleride I tipi kontrolcü tercih edilmiştir.

Sabit akım döngüsünde, pilim dönüş hattında bulunan akım ölçme dirençlerinden alınan sinyal opamp ile yükseltilerek, DAC ile oluşturulan akım referansı işe karşılaştırılmaktadır. Gönderilen referans gerilime göre şarj akımı artıp, azaltılabilmektedir.

Sabit gerilim döngüsünde ise pilin polariteleri arasından alınan gerilim bilgisi, DAC ile oluşturulan şarj sonu referansı değeri ile karşılaştırılmaktadır. Eğer pil gerilimi, şarj sonu gerilimine yaklaşırsa sabit gerilim döngüsü devreye girmekte ve akımı adım adım kesmektedir. Belirli bir süre sonrada pil şarj akımı tamamen sonlandırılmaktadır. Bu yöntem ile pilin iç direncinden kaynaklı sorunlardan kurtularak pil şarjı sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

Bu kontrolcülerden alınan hata sinyali komparatör devrelerine iletilerek ilgili kesimler için aç/kapa sinyali üretilmektedir. MOSFET kapısını sürebilmek için akım basabilen bir sürücü devresi tasarlanmıştır. Geleneksel totem-pole yapısı kullanılarak bir sürücü devresi tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Ana bara filtrelemesini sağlamak için bir kapasitör bloğu tasarlanmıştır. Bu kapasitör bloğu testler sırasında güneş paneli düzenleyicisine harici olarak çift bükümlü kablolar ile elektriksel olarak bağlanmaktadır.

Test düzeneğini sadeleştirmek amacıyla dahili gerilimlerin üretilmesi için hazır DA/DA dönüştürücü kullanılmıştır. 80V-120V giriş gerilimi ile çalışan dönüştürücü $\pm 15V$ çıkış

gerilimlerini üretmektedir. Daha sonra +15V hattından ise RHF1009 entegresi kullanılarak DAC için gerekli olan 5V beslemesi elde edilmiştir.

6.1. S4R Temelli Güneş Paneli Düzenleyici Çalışma Modları

Bu bölümde güneş paneli düzenleyicisinin çalışma modları anlatılmaktadır. Pil şarj seviyesi, şarj akımı ve yük akımına bağlı olarak tasarım farklı modlarda çalışmaktadır. S3R yapısındaki kesimin 3 farklı çalışma modu bulunmaktadır.

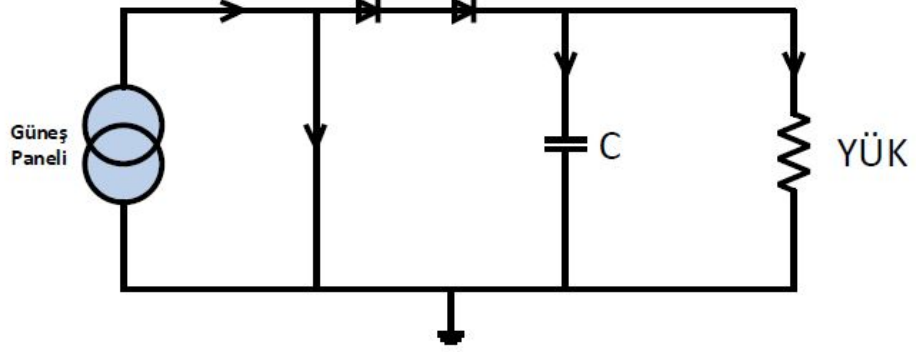
- Şönt Modu
- Diyot Modu
- Anahtarlama Modu

Yük ihtiyacı, güneş panelinin ürettiği güçten düşük olduğu ve başka bir düzenleyici kesiminin regülasyonu sağladığı durumda düzenleyici şönt modunda (Şekil 6.2) çalışmaktadır. Yük ihtiyacı, güneş paneli kesiminin ürettiği güçten fazla ise düzenleyici tüm gücü doğrudan baraya aktarmaktadır. Bu mod ise diyot modu (Şekil 6.3) olarak adlandırılmaktadır. Regülasyonun bu düzenleyici kesimi ile sağlanması durumunda ise düzenleyici anahtarlama modunda (Şekil 6.4) çalışmaktadır [16, 24]. S4R temelli güneş paneli düzenleyicisinde de S3R yapısına ek olarak 2 farklı çalışma modu bulunmaktadır.

- Düşük yük şarj modu
- Azami yük şarj modu

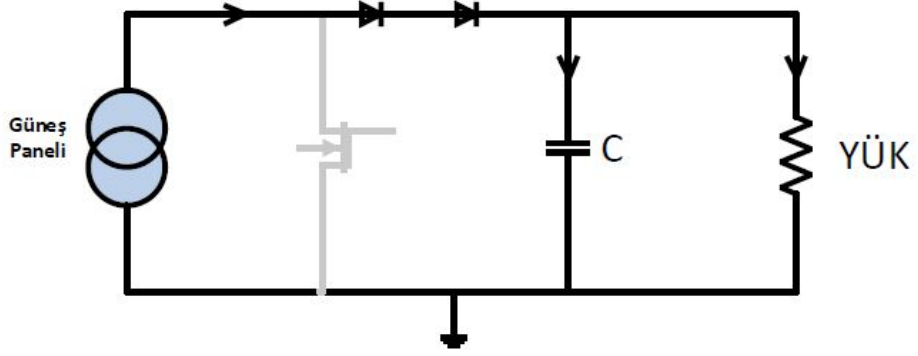
Düşük yük şarj modunda (Şekil 6.5), ana baranın ihtiyaç duyduğu yük S3R kesimi tarafından, pil şarj işlevi ise S4R kesimi tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu modda iki kesim birbirinden bağımsız olarak ana bara regülasyonu ve pil şarj işlevini gerçekleştirmektedir. Azami yük şarj modunda (Şekil 6.6) ise ana bara yük ihtiyacı S3R kesiminin sağlayabileceği yükten fazla olduğundan, S4R kesimi hem ana bara regülasyonunu hem de pil şarjını

S3R Kesimi (Şönt Modu)



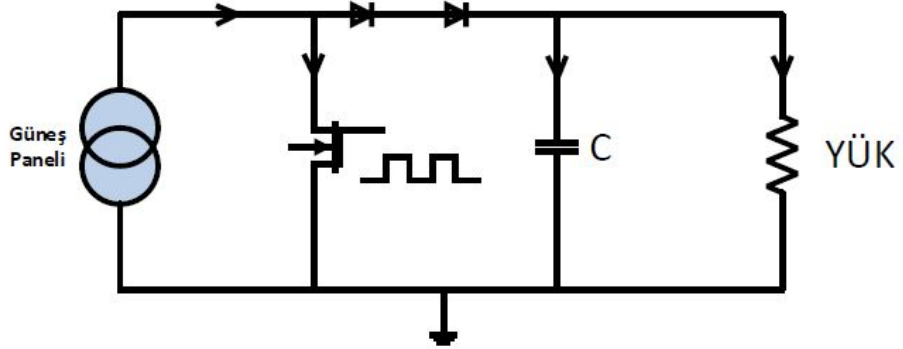
Şekil 6.2 Güneş Paneli Düzenleyicisi Şönt Modu (S3R)

S3R Kesimi (Diyot Modu)



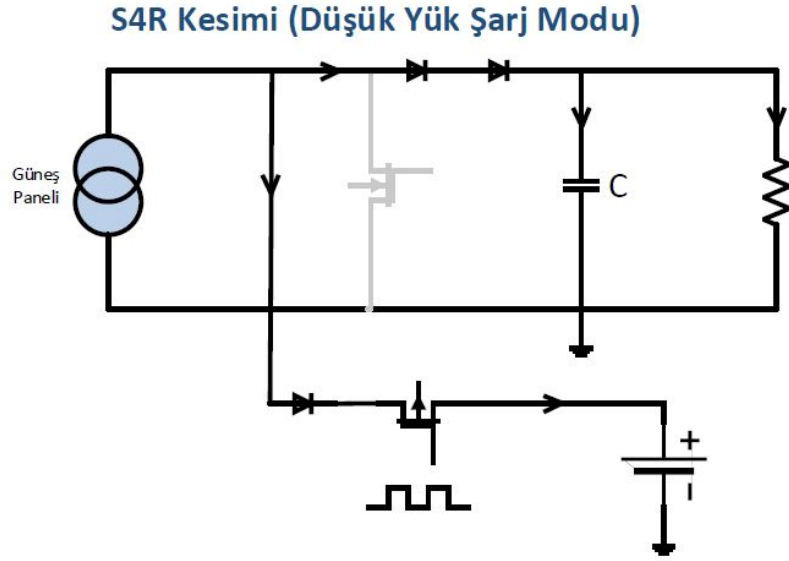
Şekil 6.3 Güneş Paneli Düzenleyicisi Diyot Modu (S3R)

S3R Kesimi (Anahtarlama Modu)

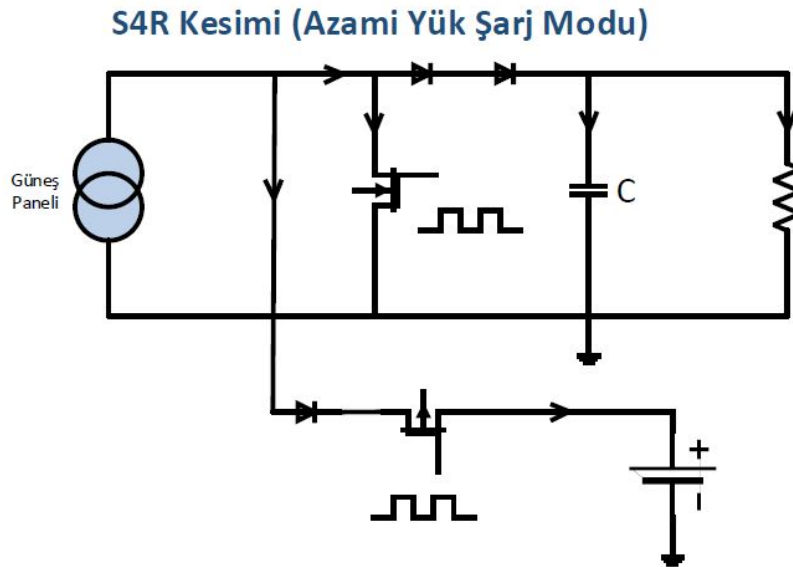


Şekil 6.4 Güneş Paneli Düzenleyicisi Anahtarlama Modu (S3R)

yönetmektedir. Bu modda ana bara kontrolcü ve pil şarj kontrolcü devreleri bir arada aynı düzenleyici kesimini kontrol etmektedir.



Şekil 6.5 Güneş Paneli Düzenleyici Düşük yük şarj modu (S4R)



Şekil 6.6 Güneş Paneli Düzenleyici Azami yük şarj modu (S4R)

Düzenleyicinin çalışma modlarına ek olarak, pil şarjının da 3 farklı modu bulunmaktadır.

- Sabit akım modu(CC)

- Sabit gerilim modu(CV)
- Lineer mod

Sabit akım modunda pil gerilimi, şarj sonu seviyesinin altındayken, belirlenmiş olan şarj akımı ile pil şarjını gerçekleştirmektedir. Sabit akım şarjı sonunda pil gerilimi, şarj sonu seviyesine geldiğinde pil şarj akımı yavaşça kısılarak pil şarjı sonlandırılmaktadır. Bu işleve sabit gerilim modu pil şarjı denilmektedir. Güneş panelinde üretilen güç, yük ile pil şarjı için belirlenen sabit akım şarj seviyesini birlikte karşılayamayacak seviyede olduğunda ise düzenleyici, sistemin yük ihtiyacını karşılar ve arta kalan gücü pil şarjına aktarır. Bu moda ise lineer mod denilmektedir.

6.2. Tasarım Parametreleri ve Devre Bileşenlerinin Seçilmesi

Tez kapsamında tasarlanan güneş paneli regülatörünün temel görevi, uydu ana bara yük ihtiyacını karşılarken, aynı zamanda güneş panelinde üretilen fazla güç ile pil şarjını gerçekleştirmektir. Ana bara regülasyon işlevi şönt düzenleyici yapısı ile sağlanırken, pil şarj işlevi ise güneş paneli kesimi ile pil arasına yerleştirilen seri anahtar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Tasarlanan güneş paneli düzenleyici tasarım kriterleri Çizelge 6.1 ile verilmektedir.

Güneş paneli düzenleyici kartı 1 adet S3R kesimi ve 1 adet S4R kesiminden oluşmaktadır. Anahtarlama bloğu elemanları sonraki bölümde detaylı anlatılmaktadır.

Kontrol bloğu 2 farklı kontrol döngüsü içermektedir. Devre, ana bara regülasyonunu sağlayan MEA ve pil şarj kontrolünü sağlayan BEA kontrolcülerini içermektedir. MEA kontrolcüsü PI yapısında, BEA ise integratör olarak seçilmiştir. MEA referans olarak aldığı sabit 6.4V gerilimini, ana bara gerilim bilgisiyle karşılaştırarak hata sinyali oluşturmaktadır. BEA ise pil şarj akımı ve pil gerilim ölçüm bilgilerini 8 bit DAC [25] kullanılarak oluşturulan şarj akım ve şarj sonu gerilim referanslarıyla karşılaştırarak bir hata sinyali oluşturmaktadır.

Kontrolcülerde oluşturulan hata sinyalleri sürücü devrelerine iletilmektedir. Sürücü bloğu, histeresis komparatör ve totem-pole sürücü devrelerinden oluşmaktadır. Histeresis yapısında

LM139 [26] komparatörü kullanılmış ve 1V histeresis gerilim aralığı ayarlanmıştır. Komparatör çıkışı MOSFET'leri sürebilecek kadar akım sağlayamayacağından dolayı totem-pole yapısında sürücü devreleri kullanılmıştır. 15V beslemeden gücünü alan bu yapı, komparatörden gelen sinyal doğrultusunda anahtarlama elemanlarını sürmektedir. Sürücü devresinde 2n2222 [27] ve 2n2907 [28] BJT bileşenleri tercih edilmiştir.

Tasarımda kontrolcü ve akım, gerilim ölçüm yapılarında düşük gürültülü yüksek doğruluk oranına sahip OP27 opamp bileşeni [29] tercih edilmiştir.

Şönt operasyonu sırasında güneş panelinden kaynaklanacak akım zıplamalarını minimize etmek amacıyla şönt MOSFET hatlarına pasif limitleyici devreler [30] yerleştirilmiştir. Bu sayede kısa devre akımı 2.5A olan güneş paneli kesimlerinin şönt operasyonu sırasında oluşan akım zıplamaları yaklaşık 5A'e limitlenmektedir.

Çizelge 6.1 Güneş Paneli Düzenleyici Tasarım Parametreleri

Kriter	Değer
Giriş Gerilimi	105-140V
Ana Bara Çıkış Gerilimi	100V
Ana Bara Gerilim Dalgalanması	380mV
Pil Gerilimi	60-84V
Pil Şarj Akımı	0-2.5A
Maksimum Anahtarlama Frekansı	1kHz
Çıkış Gücü (Ana bara)	<500W
Çıkış Gücü (Pil şarj)	<210W
Verim (Ana bara regülasyonu)	>98%
Verim (Pil şarjı)	>98%

6.2.1. Güneş Paneli Düzenleyici Çalışma Frekansının Belirlenmesi

S3R yapısında maksimum çalışma frekansı, güneş paneli kesim akımı, yük akımı, kapasitör bloğu değeri ve ana bara dalgalanma seviyesinde göre değişmektedir. S3R çalışma frekansı

aşağıdaki denklemlere göre hesaplanmaktadır.

I_P : Güneş paneli kesim akımı

I_L : Yük akımı

C : Kapasitör bankası kapasitansı

$(V_H - V_L)$: Ana bara gerilim dalgalanması

F_{SW} : Anahtarlama frekansı

$F_{Maksimum}$: Maksimum anahtarlama frekansı

$$F_{SW} = \frac{(I_P - I_L) \times I_L}{I_P \times C \times (V_H - V_L)} \quad (7)$$

$$F_{Maksimum} = \frac{I_P}{4 \times C \times (V_H - V_L)} \quad (8)$$

Tasarımda güneş paneli kesim akımı maksimum 2.5A olarak alınmıştır. Bunun yanında kapasitör bankası olarak 1.6mF kullanılmıştır. Ana bara gerilim dalgalanması ise 380mV olarak belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak maksimum çalışma frekansı aşağıdaki şekilde bulunmaktadır.

$$F_{Maksimum} = \frac{2.5}{4 \times (1.6 \times 10^{-3}) \times 0.38} \quad (9)$$

$$F_{Maksimum} = 1027Hz \quad (10)$$

6.2.2. Ana Bara Gerilim Dalgalanması Limitlerinin Belirlenmesi

Ana bara gerilim dalgalanması limitleri aşağıdaki denkleme göre belirlenmektedir.

$V_{hysteresis}$: Histeresis gerilim aralığı

K : Ana bara gerilim bölücü kazancı

A : MEA kontrolcü kazancı

$$V_{p-p} = \frac{V_{hysteresis}}{K \times A} \quad (11)$$

Tasarımda histeresis gerilim aralığı 0.9V, K değeri 0.064 ve A kazancı 36.6 olarak belirlenmiştir. Bu değerler ışığında ana bara gerilim dalgalanması;

$$V_{p-p} = \frac{0.9}{0.064 \times 36.6} = 0.384V \quad (12)$$

6.2.3. Ana Bara Kapasitans Değerinin Belirlenmesi

Hedeflenen maksimum anahtarlama frekansını elde edebilmek için 1.6mF değerinde bir kapasitör bankası kullanılmıştır. 40 adet 250V 40uF değerinde MKP tipi metalize film kapasitörler paralel bağlanmıştır.

6.2.4. Anahtarlama Elemanlarının Seçilmesi

Tez kapsamında tasarlanan güneş paneli düzenleyici kartında 2 farklı tipte anahtarlama elemanı kullanılmıştır. Bunlardan biri şönt mosfeti olarak kullanılan N-kanal MOSFET, diğeri ise pil şarj işlevinde kullanılan P-Kanal MOSFET'tir. Anahtarlama elemanları seçilirken devredeki en yüksek gerilim ve akım değerlerinin karşılanabileceği göz önüne alınmaktadır. Bununla birlikte, dönüştürücünün verimini doğrudan etkilediğinden dolayı anahtarlama kayıplarını minimize edecek şekilde bir anahtarlama elemanı seçilmiştir. Anahtarlama elemanı seçilirken V_{DS} kırılma gerilimi, I_S sürekli akım değeri, V_{GS} açılma gerilimi, R_{DS-on} iç direnci gibi parametreler dikkate alınmıştır.

Anahtarların gördüğü maksimum yükler aşağıda gösterilmiştir.

$$V_{Q1,maks} = V_{bara} + 2xV_{f,diyot} = 100 + (2x0.5) = 101V \quad (13)$$

$$I_{Q1,maks} = I_{limit} = 5A \quad (14)$$

$$V_{Q2,maks} = V_{bara} - V_{pil} = 100 - 60 = 40V \quad (15)$$

$$I_{Q2,maks} = I_{kesim,maks} = 2.5A \quad (16)$$

Devrede anahtarlara binen yükler göz önünde bulundurularak Çizelge 6.2 ile verilen özelliklerdeki MOSFET'ler kullanılmıştır. Şönt anahtarı olarak **IRFP260NPbF** [31], pil şarj anahtarı olarak **IRHNA597260** [32] kullanılmıştır.

Çizelge 6.2 S4R MOSFET Teknik Özellikleri

Parametre	IRFP260NPbF	IRHNA597260
V_{DS} , Kırılma Gerilimi	200V	200V
I_S , Sürekli Akaç Akımı	50A	33.5A
V_{GS} , Kapı Gerilimi	20V	20V
Kanal Tipi	N Kanal	P Kanal
R_{DS-ON} , İletim Direnci	40mOhm	102mOhm

6.2.5. Çıkış Diyotunun Seçilmesi

S3R yapısında güneş paneli kesimleri ana baraya diyot ile bağlanmaktadır. Bu diyot, anahtarlama sırasında ana baranın şönt MOSFET'i üzerinden kısa devre olmasını engellemektedir. S4R yapısında pil hattında bulunan diyotlar ise pilden güneş panele geri

akım basmasını engellemektedir. S3R diyotları maksimum ana bara gerilimi kadar ters gerilim görmekte, pil hattındaki diyotlar ise pil gerilimi kadar ters gerilim görmektedir. Bu nedenle 150V ters gerilim dayanımına sahip diyot seçimi yapılmıştır [33]. Seçilen diyot ortak katot yapısına sahip olmakla birlikte, 2x25A toplam 50A'e kadar sürekli ileri yönlü akımı desteklemektedir. Güneş paneli kesimlerinin kısa devre akımı olan 2.5A'de ise diyot başına 0.5V gerilim düşümü gerçekleşmektedir.

Buna ek olarak seçilen diyot TO-247 paket yapısına sahip olduğundan ısı alıcı yerleştirilmesine uygundur. Bu sayede diyotlar iletimdeyken ısıyı daha rahat atabilmektedirler.

6.3. Güneş Paneli Düzenleyici Kayıp Analizi

Güç dönüştürücü devrelerde bulunan aktif ve pasif bileşenler güç kayıplarına neden olmaktadır. Bu kayıplar dönüştürücü verimine ve ısıl sorunlara yol açmaktadır. Verim hesabı temel olarak 19 ile hesaplanmaktadır [34].

$$P_{\text{çıkış gücü}} = P_{\text{giriş gücü}} - P_{\text{kayıp}} \quad (17)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış gücü}}}{P_{\text{çıkış gücü}} + P_{\text{kayıp}}} \quad (18)$$

Tez kapsamında tasarlanan güneş paneli düzenleyicisinin kayıp analizi S3R yapısı ve S4R yapısı için ayrı ayrı yapılmaktadır. Her iki yapıda da temel olarak güç kayıplarını diyot ve MOSFET iletim ve anahtarlama kayıpları oluşturmaktadır.

$$P_{\text{kayıp}} = P_{\text{diyot}} + P_{\text{mosfet}} \quad (19)$$

Kayıp analizleri devrenin çalışma parametreleri ve bileşenleri bilgi kağıtları dikkate alınarak hesaplanmıştır.

6.3.1. Ana Bara Regülasyonu Kayıp Analizi

Devrede ana bara regülasyonu S3R yapısı ile gerçekleştirilmektedir. Bu yapıda daha önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere bir şönt MOSFET ve ana baraya bağlı diyot bulunmaktadır. Güç kayıplarının en çok olduğu koşul anahtarlama frekansının en çok olduğu koşul olduğundan %50 çalışma oranı dikkate alınarak kayıp analizi gerçekleştirilmiştir. Diyot kaybı [21] ile hesaplanmıştır.

$$I_{D,rms} = I_{D,tepe} \times \sqrt{D} = 2.5 \times \sqrt{0.5} = 1.76A \quad (20)$$

$$P_{diyot,S3R} = I_{D,rms} \times V_{f,diyot} = 1.76 \times 0.5 = 0.88W \quad (21)$$

$$P_{MOSFET,iletim} = I_{ds,rms}^2 \times R_{DS,on} = 1.76^2 \times 0.04 = 0.124W \quad (22)$$

$$\begin{aligned} P_{MOSFET,anahtarlama} &= \frac{1}{2} \times V_{ds} \times I_{D,tepe} \times f_{anahtarlama} \times (t_{iletim} + t_{kesim}) \\ &= 0.5 \times 100 \times 2.5 \times 1027 \times (5.7us + 10.3us) \\ &= 2.05W \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} P_{kayıp,S3R} &= P_{MOSFET,iletim} + P_{MOSFET,anahtarlama} + P_{diyot,S3R} \\ &= 0.88 + 0.124 + 2.05 \\ &= 3.054W \end{aligned} \quad (24)$$

6.3.2. Pil Şarjı Kayıp Analizi

Devrede pil şarjı S4R yapısı ile gerçekleştirilmektedir. Bu yapıda daha önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere bir seri MOSFET ve ana baraya bağlı yedekli seri diyotlar bulunmaktadır.

Güç kayıplarının en çok olduğu koşul anahtarlama frekansının en çok olduğu koşul olduğundan %50 çalışma oranı ve azami yük modu dikkate alınarak kayıp analizi gerçekleştirilmiştir.

$$I_{D,rms} = I_{D,tepe} \times \sqrt{D} = 2.5 \times \sqrt{0.5} = 1.76A \quad (25)$$

$$P_{diyot,S4R} = I_{D,rms} \times 2 \times V_{f,diyot} = 1.76 \times 2 \times 0.5 = 1.76W \quad (26)$$

$$P_{MOSFET,iletim,S4R} = I_{ds,rms}^2 \times R_{DS,on} = 1.76^2 \times 0.102 = 0.316W \quad (27)$$

$$\begin{aligned} P_{MOSFET,anahtarlama,S4R} &= \frac{1}{2} \times V_{ds} \times I_{D,tepe} \times f_{anahtarlama} \times (t_{iletim} + t_{kesim}) \\ &= 0.5 \times 40 \times 2.5 \times 1027 \times (5.5us + 1.5us) \\ &= 0.36W \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} P_{kayıp,S4R} &= P_{MOSFET,iletim,S4R} + P_{MOSFET,anahtarlama,S4R} + P_{diyot,S4R} \\ &= 1.76 + 0.316 + 0.36 \\ &= 2.436W \end{aligned} \quad (29)$$

6.4. Güneş Paneli Düzenleyici Baskı Devre Kartının Tasarlanması

Bu bölümde benzetim çalışmalarında alınan bulgular ışığında gerçekleştirilen baskı devre kartı çizimi ile ilgili gelişmeler anlatılmaktadır.

Tasarımı yapılan güneş paneli düzenleyicisinin Altium çizim programı kullanılarak şematik ve baskı devre kartı çizimi gerçekleştirilmiştir.

S3R ve S4R anahtarlama bloklarına ait bakır yollar hedeflenen akım seviyelerini geçirebilecek kalınlıkta çizilmiştir. Kontrolcü hatları ise mümkün olduğunca bu güç

hatlarından uzak tutulmuştur. Güneş paneli, pil ve ana bara giriş ve çıkışları için baskı devre üzerine konnektör bölümleri yerleştirilmiştir. Güç komponentleri ve yüksek malzemeler üst katmana yerleştirilmiş olup, alçak ve pasif malzemeler alt katmanda olacak şekilde çizilmiştir. Ana bara regülasyonu ile pil şarj operasyonu birbirinden farklı anahtarlama karakteristiğine sahip olduğundan dolayı, bu hatlar herhangi bir etkileşim olmaması için birbirinden mümkün olduğunda uzak çizilmiştir.

Isınan komponentlere soğutucu takma ihtimali düşünülerek, MOSFET ve güç diyotları yerleştirilirken yakınındaki malzemelerle olan mesafesi dikkate alınmıştır.

Elektronik bileşenler için gerekli olan düşük seviye gerilimleri üretmek amacıyla DC-DC bölümü eklenmiştir. Opsiyonel olarak eklenen bu bölüm, karta bu gerilimleri sağlamak için kullanılacak ekstra test cihazı ihtiyacını azaltmak için eklenmiştir. Bu blok sayesinde kartın test düzeneği sadeleştirilmiştir. Dahili gerilim çıkışlarına, kart enerjilendiğinde bu gerilimlerin oluştuğunu görsel olarak anlayabilmek amacıyla LED'ler yerleştirilmiştir.

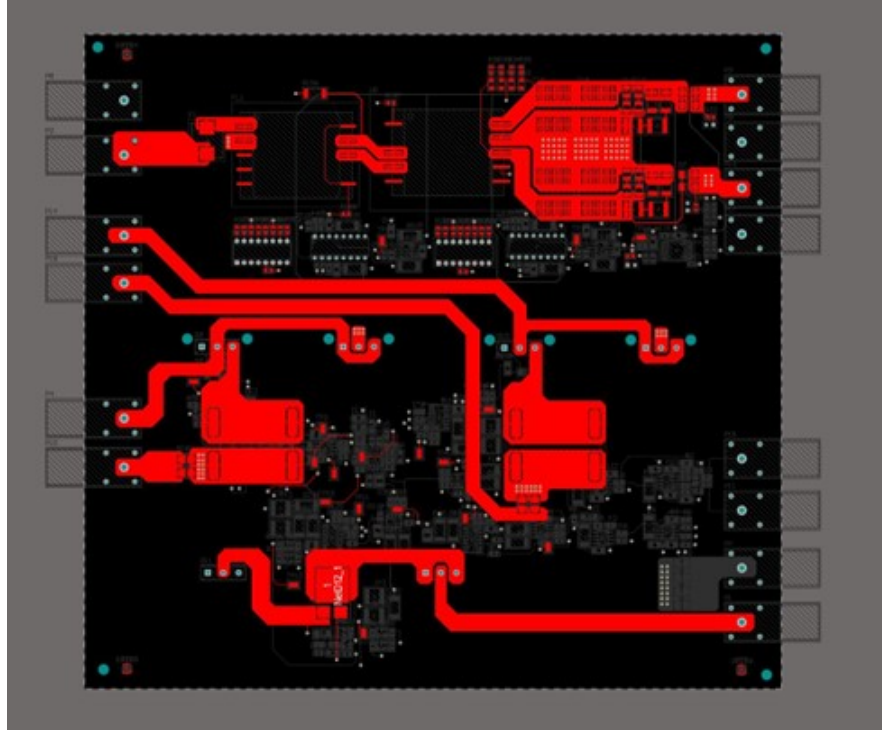
Pil şarj akımı referans ve pil şarj gerilimi referanslarını ayarlamak amacıyla dijital-analog çevirici kısımları da çizime eklenmiştir. Böylece farklı şarj akım ve gerilim seviyelerini ayarlama konusunda kullanışlı bir arayüze sahip olunması sağlanmıştır.

Tasarlanan baskı devre kartı toplam 4 katmandan oluşmaktadır. Üst katman güç hatları için, alt katman ise sinyal hatları ve düşük seviye güç hatları için kullanılmıştır. Ara katmanlar ise toprak olarak kullanılmıştır.

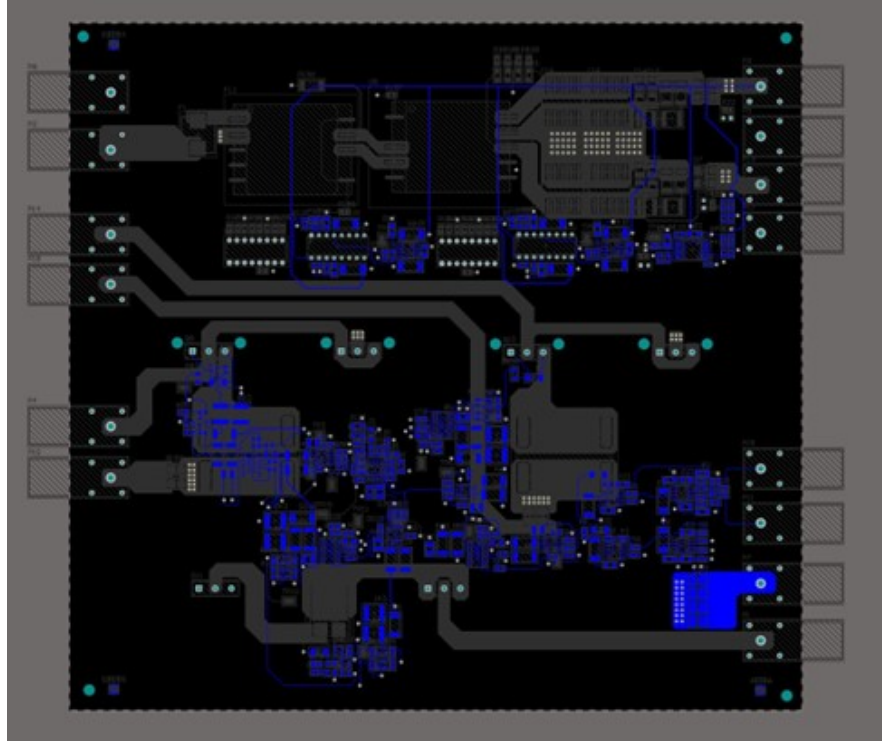
Güneş paneli düzenleyici dizgili baskı devre kartı görseli Şekil 6.11 ile verilmektedir.

7. BENZETİM BULGULARI

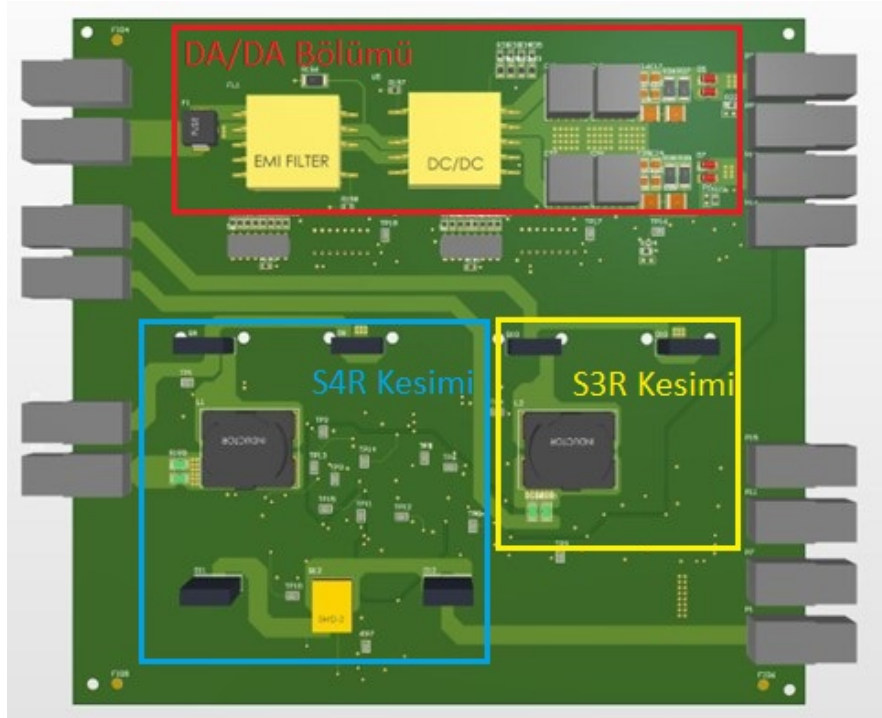
Bu bölümde, tezin bir önceki bölümünde tasarım detayları verilmiş olan S4R temelli güneş paneli düzenleyicisinin, bilgisayar ortamında gerçekleştirilen benzetim bulguları verilmektedir. Devre benzetimleri Orcad Pspice benzetim programı kullanılarak yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında tasarım, öncelikle alt işlevler halinde incelenmiştir. Daha sonra bu



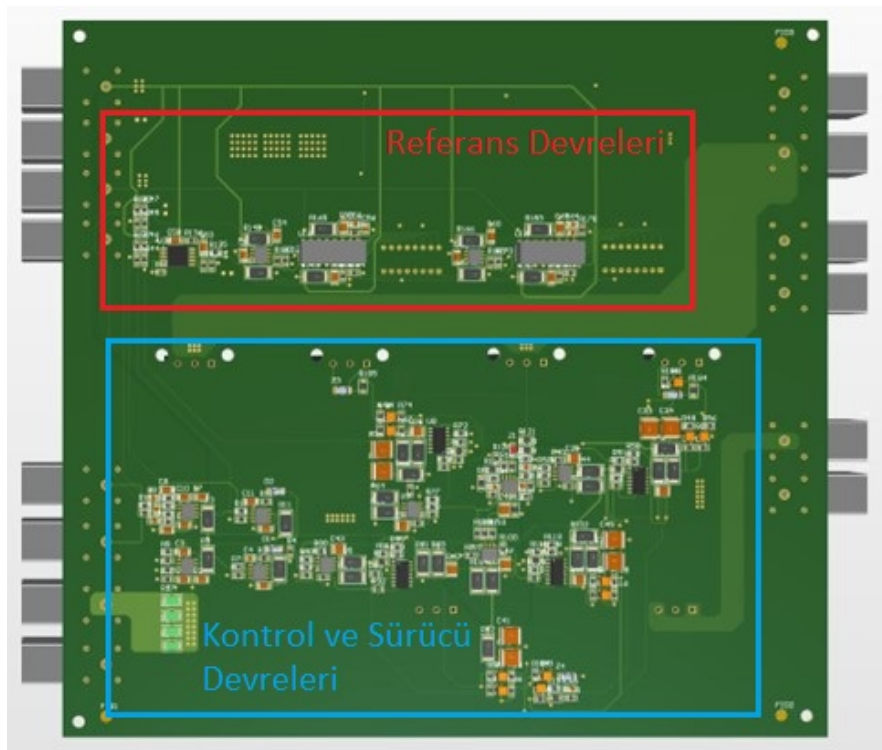
Şekil 6.7 Güneş Paneli Düzenleyici Üst Katman



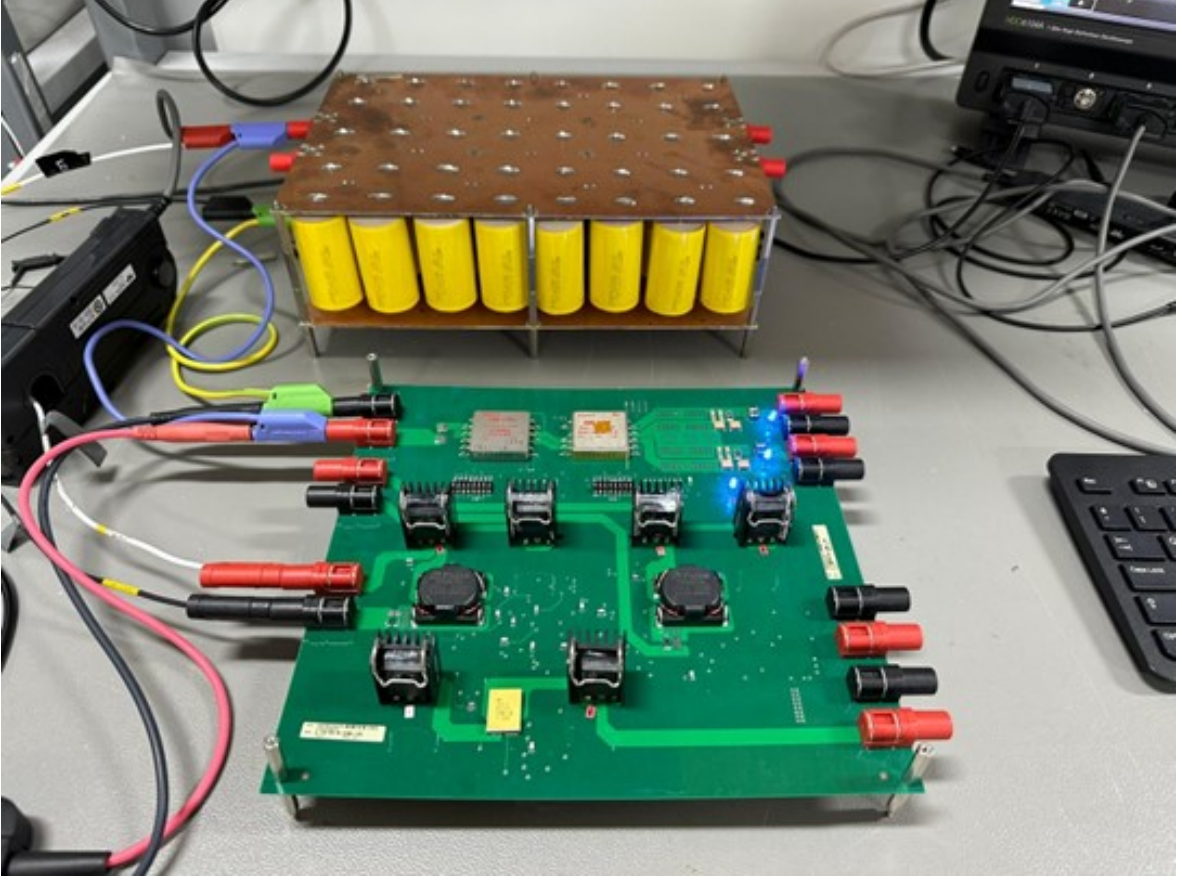
Şekil 6.8 Güneş Paneli Düzenleyici Alt Katman



Şekil 6.9 Güneş Paneli Düzenleyici Üst Katman 3D



Şekil 6.10 Güneş Paneli Düzenleyici Alt Katman 3D



Şekil 6.11 Güneş Paneli Düzenleyici ve Kapasitör Bloğu

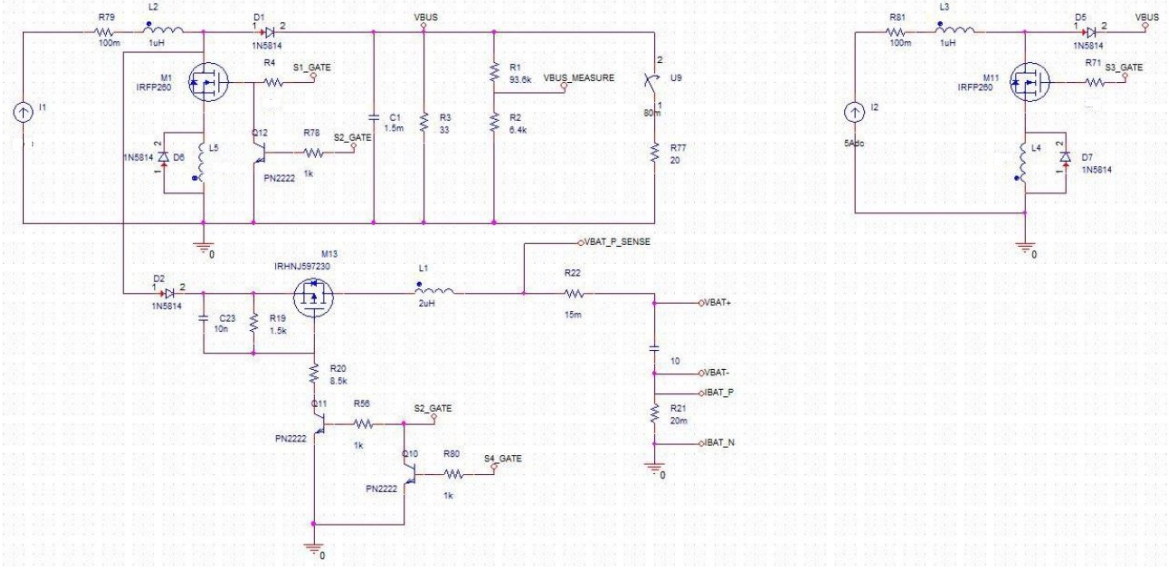
işlevsel parçalar bir araya getirilerek sistemin toplam performansı incelenmiştir. Benzetim bulgularında önce düzenleyicinin S3R bölümüne ait bulgular elde edilmiş olup, sonrasında S4R bölümüne ait tüm operasyonel modları içeren benzetim bulguları elde edilmiştir.

7.1. Benzetim Blokları

7.1.1. Anahtarlama Bloğu

Toplamda 2 kesim anahtarlama bloğu üzerinden benzetimler gerçekleştirilmiştir. 1 kesim sadece şönt fonksiyonu içerirken, diğer kesim ise hem şönt hem pil şarj fonksiyonu içermektedir.

MEA ve BEA kontrol devrelerinde üretilen hata sinyali sonucunda şönt anahtarları veya pil şarj kontrol anahtarı iletime geçirilerek güç üretim/tüketim dengesi yönetilmektedir. Güneş panellerinde üretilen güç, yüklerin çekmek istediği güç miktarından fazla olduğu durumda artık güç pile aktarılarak pil şarjı gerçekleştirilmektedir.



Şekil 7.1 Güneş Paneli Düzenleyici Anahtarlama Bloğu

Pil şarj kontrolü için 3 farklı şarj modu çalışılmıştır. Sabit akım modunda belirlenen bir şarj akımı değerinde pil şarjı gerçekleştirilirken, sabit gerilim modunda ise pil istenen gerilim seviyesine ulaştığında şarj akımını adım adım azaltılmakta ve böylece pilin iç direncinin etkisi minimize edilmektedir.

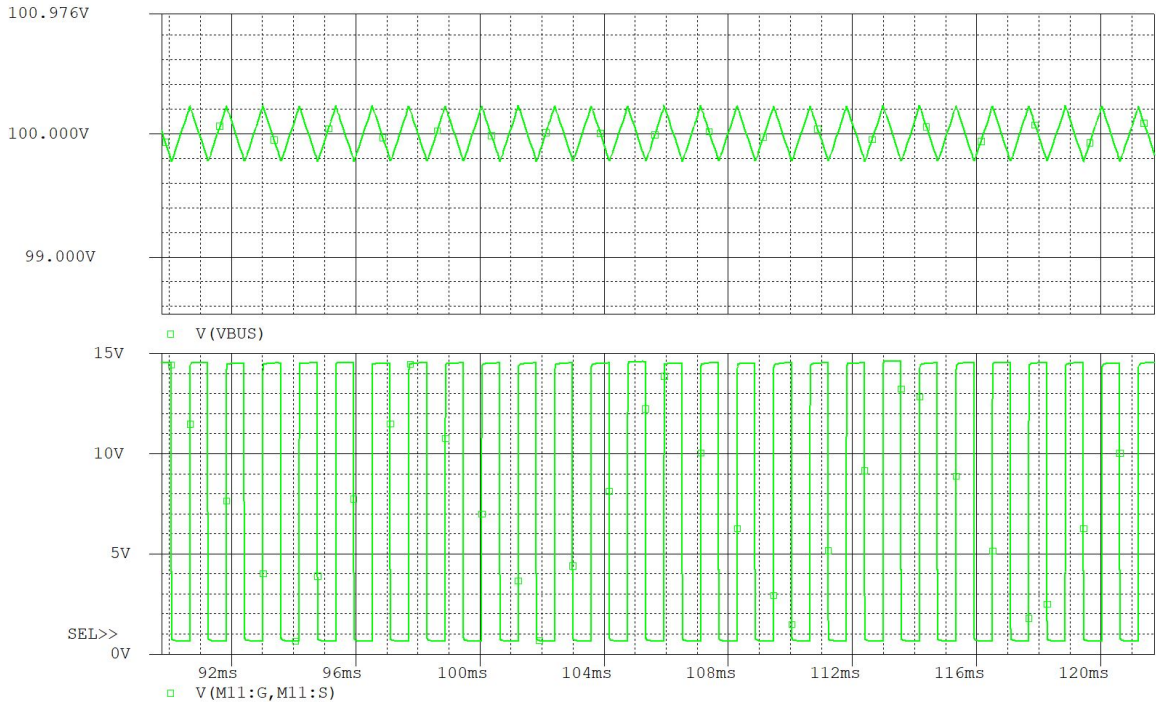
Yük akımı ile pil şarj akımının toplamı güneş panelinde üretilen toplam akımdan fazla olduğu durumda ise pil şarj kontrol anahtarı iletimden çıkarılarak ana bara regülasyonu garanti edilmektedir. Bu koşulda gerçekleştirilen pil şarj modu lineer bölge şarjı olarak adlandırılmaktadır.

Tasarlanan güneş paneli düzenleyici maksimum 2.5A pil şarj kapasitesine sahip olup, toplamda en fazla 500W yük besleyebilecek kapasiteye sahiptir.

Benzetimlerde güneş paneli yerine sabit akım kaynağı, pil yerine ise ilk değere sahip büyük bir kapasitör ve pilin iç direncini simüle eden seri bağlı bir direnç kullanılmıştır. Benzetim hızını artırmak için pil, gerçekte olduğundan daha küçük bir kapasite ile modellenmiştir.

Pil şarj akımı pilin dönüş hattına konan akım okuma direnci üzerinden okunmaktadır. Bu direnç üzerinde oluşan gerilim farkı BEA kontrol devresine aktarılmaktadır. MEA kontrol döngüsü için gerekli olan ana bara gerilim bilgisi ise doğrudan ana baradan gerilim bölücü devresiyle alınmıştır.

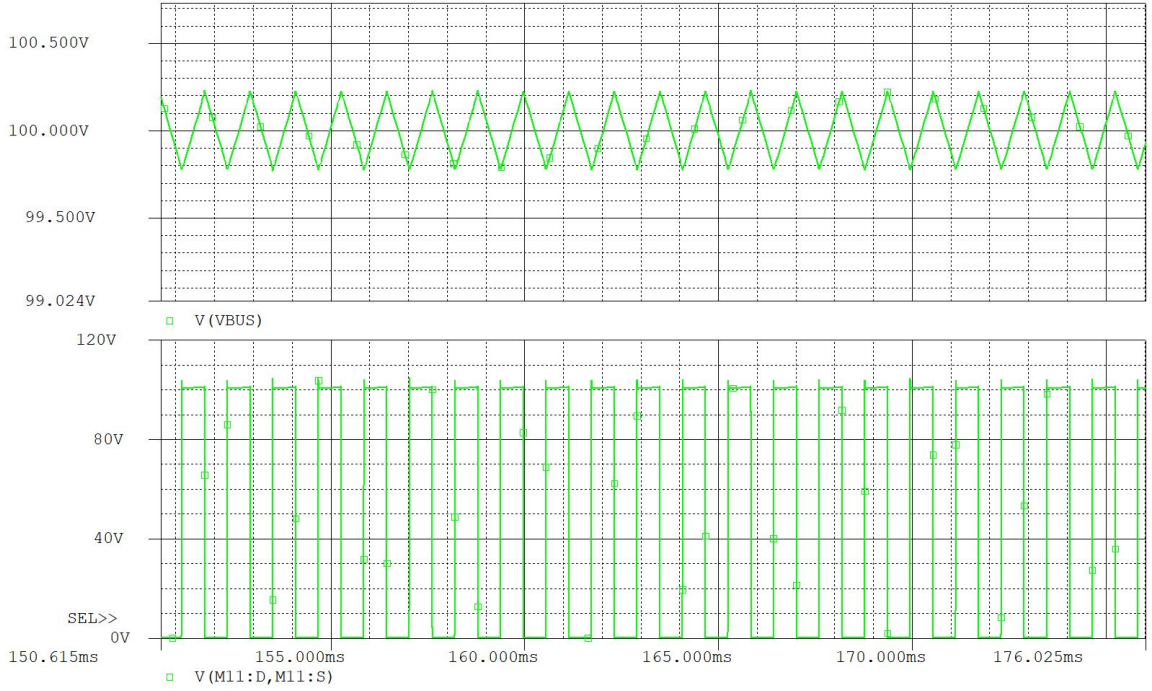
Benzetim ortamında tüm şarj modları denenmiş ve bulgular paylaşılmıştır.



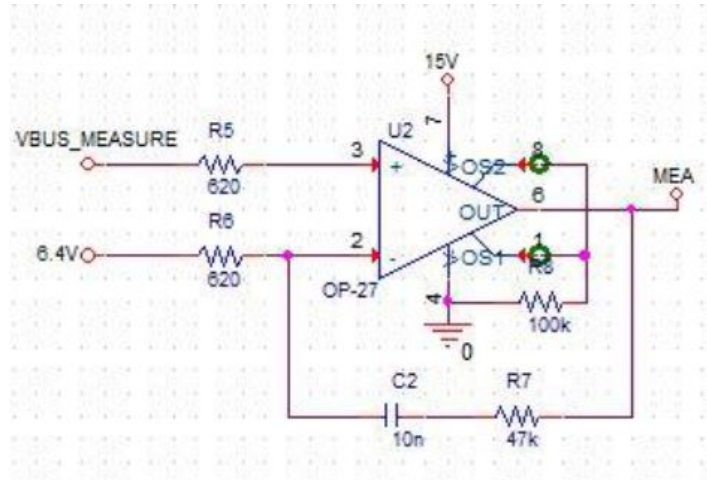
Şekil 7.2 Ana Bara Gerilimi (CH1) ve Kapı-Kaynak Gerilimi (CH2) Benzetim Sonucu

7.1.2. Kontrol Bloğu

Ana bara regülasyonu için MEA kontrol döngüsü, pil şarj fonksiyonu için ise BEA kontrol döngüsü tasarlanmış ve benzetimler bu kapsamda gerçekleştirilmiştir. Pil şarj kontrol döngüsü sabit akım (CC) ve sabit gerilim (CV) modlarına sahiptir.

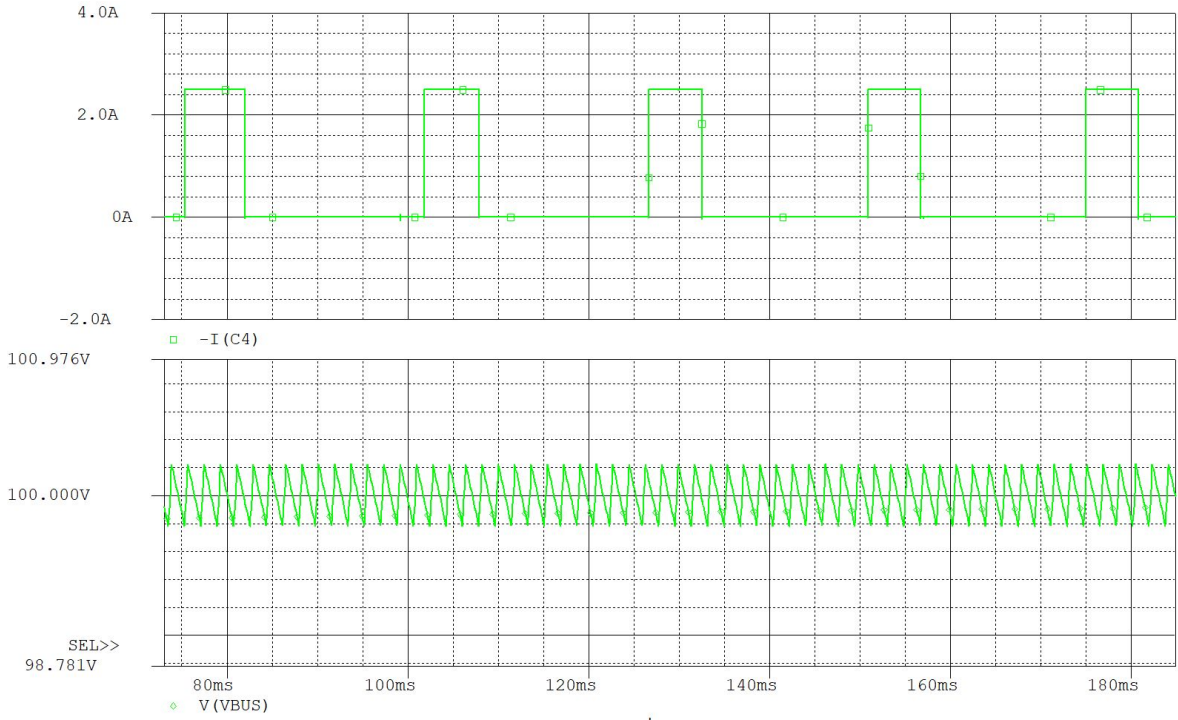


Şekil 7.3 Ana Bara Gerilimi (CH1) ve Akaç-Kaynak Gerilimi (CH2) Benzetim Sonucu



Şekil 7.4 Ana Hata Yükselticisi (MEA)

MEA kontrol devresi ana baradan direnç bölücü ile alınan sinyali sabit bir referans gerilimi ile karşılaştırarak bir ana bara hata sinyali oluşturmaktadır. Bu sinyal doğrultusunda şönt anahtarlarını kontrol ederek ana bara regülasyonunu gerçekleştirmektedir. Bu kontrol devresi için DC hatayı ortadan kaldırmak için PI kontrol tercih edilmiştir. MEA kontrol devresi Şekil 7.4 ile gösterilmiştir.

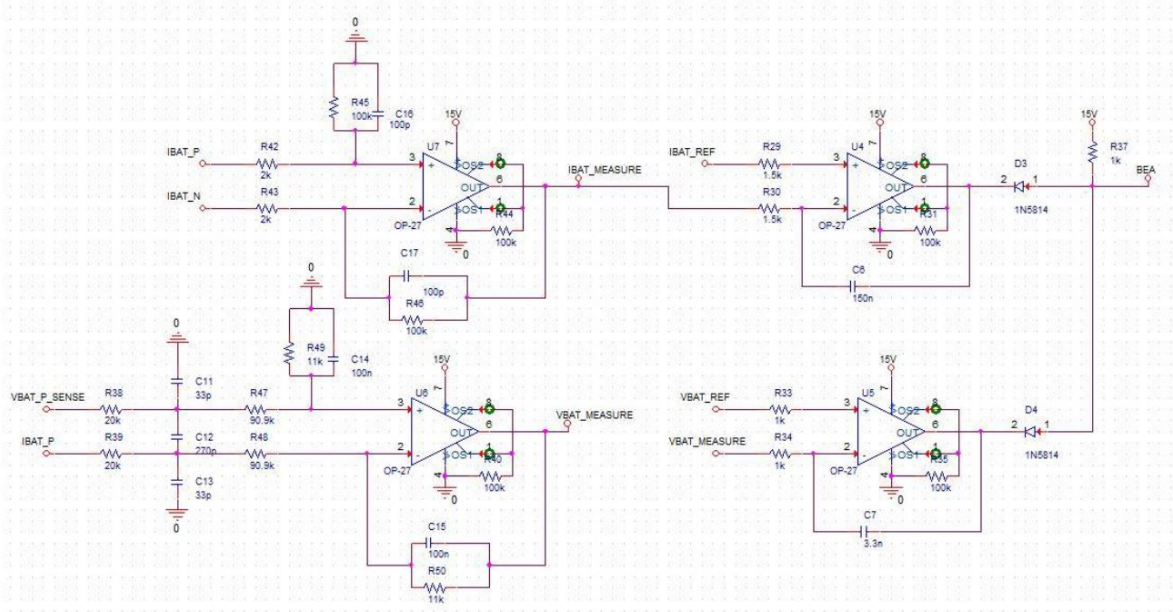


Şekil 7.5 Ana Bara Gerilimi (CH1) ve MEA (CH2) Gerilimi Benzetim Sonucu

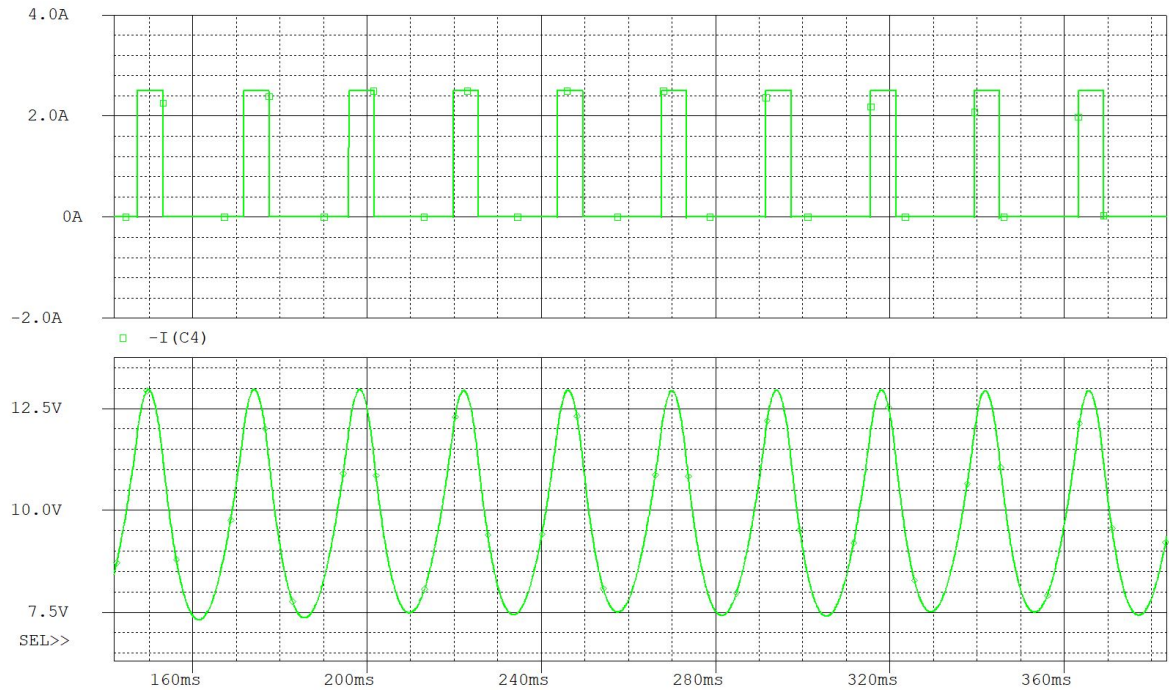
BEA kontrol devresi ise 2 farklı kontrol döngüsü içermektedir. Sabit akım kontrolü, pilin dönüşünden okunan akım değerini sabit bir referans gerilim ile karşılaştırarak hata sinyali oluşturmaktadır. Sabit gerilim kontrolü ise pilin gerilimini sabit bir referans ile karşılaştırarak pilin istenen seviyeye şarj olup olmadığını tespit etmektedir. Bu 2 kontrol devresi ters diyotlar aracılığıyla birbirine bağlanarak hata sinyali küçük olan kontrolcü çıkışını seçerek pil şarj kontrolünü gerçekleştirmektedir.

Sabit akım referansı ve sabit gerilim referansları değiştirilebilir şekilde tasarlanmaktadır. Böylece pilin maksimum gerilimi ve maksimum şarj akımına müdahale edebilme yeteneğine sahip olunmaktadır.

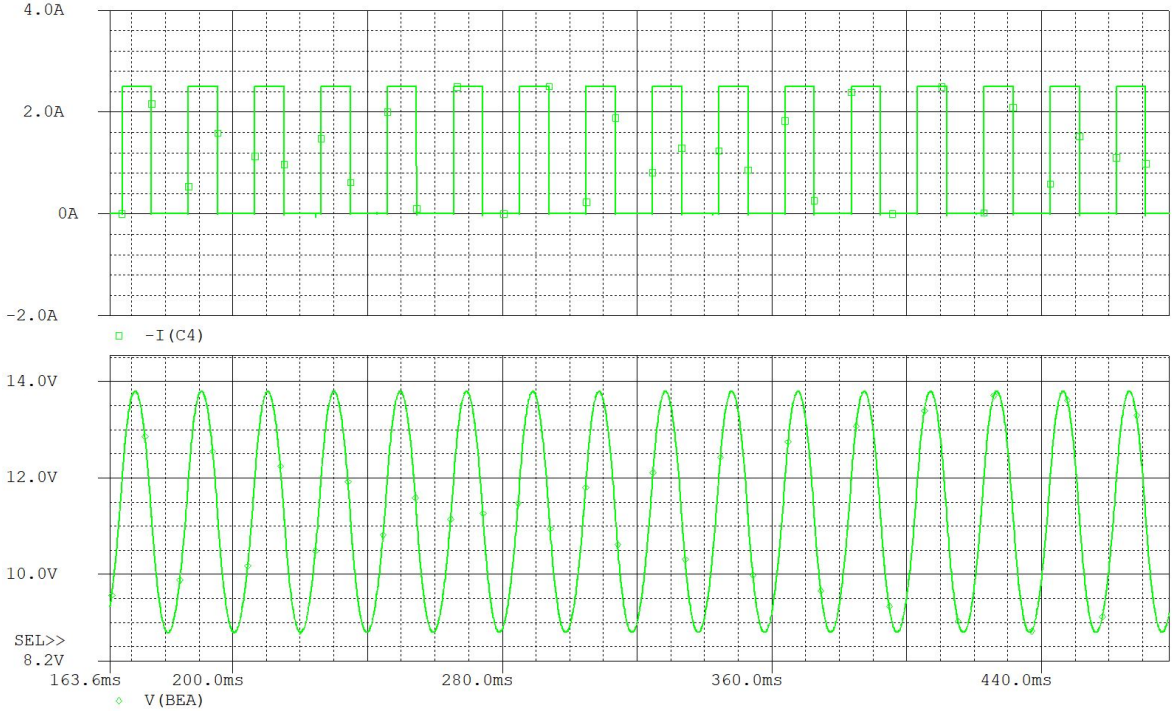
BEA kontrol devresi Şekil 7.6 ile gösterilmiştir.



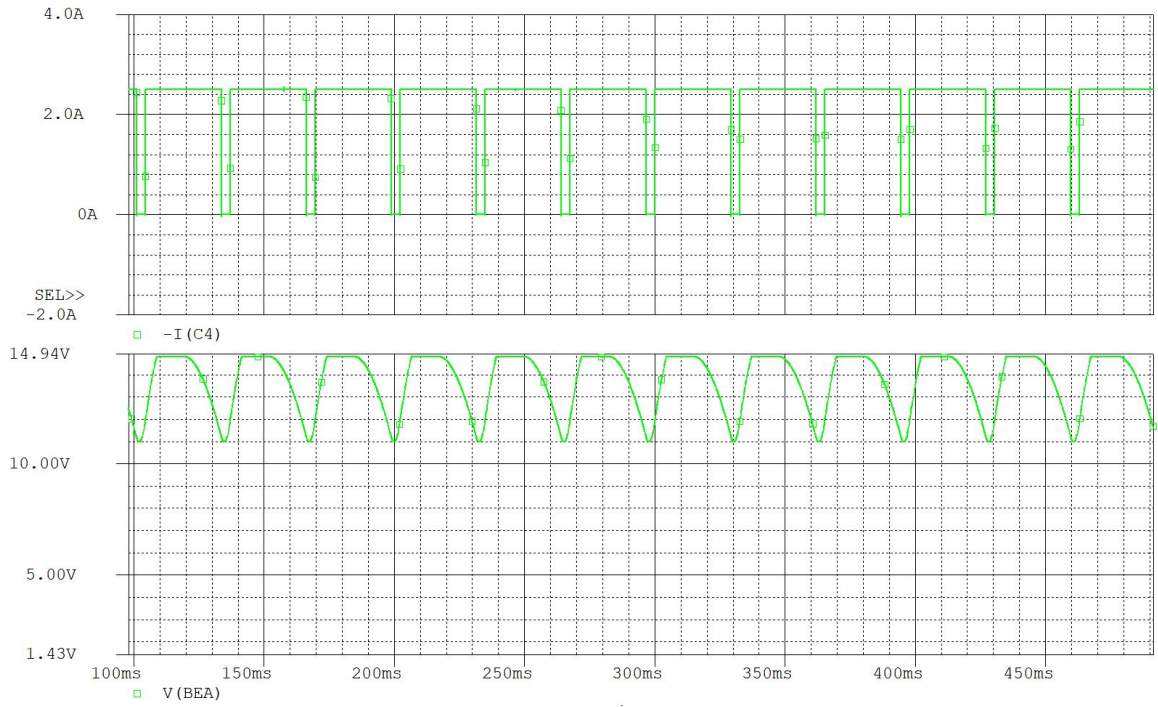
Şekil 7.6 PİL ŞARJ Kontrol Döngüsü (BEA)



Şekil 7.7 PİL şarj hata sinyali benzetimi, 0.6A şarj akımı (CH1)



Şekil 7.8 Pil şarj hata sinyali benzetimi, 1.1A şarj akımı (CH1)



Şekil 7.9 Pil şarj hata sinyali benzetimi, 2.25A şarj akımı (CH1)

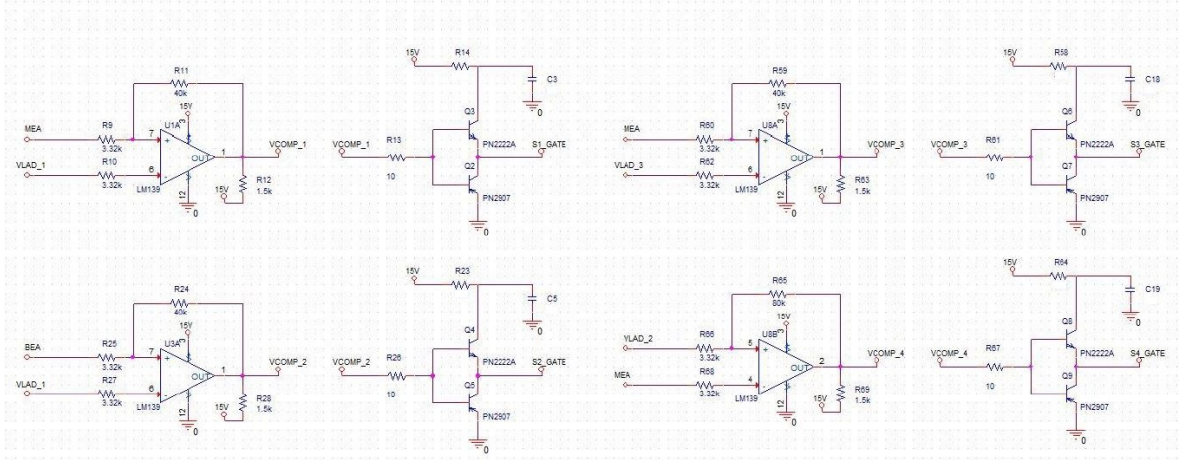
7.1.3. Sürücü Bloğu

Histeresis komparatör ve MOSFET sürücü devreleri aşağıdaki şekilde tasarlanmış ve benzetimlerde kullanılmıştır.

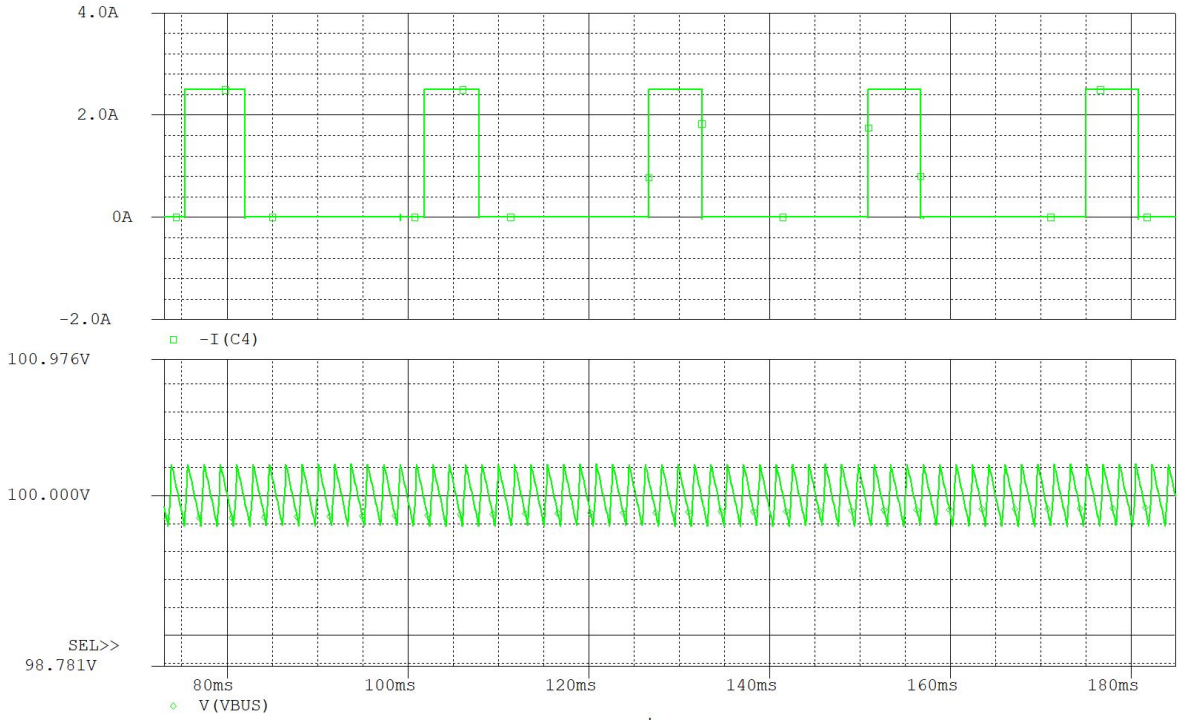
MEA ve BEA kontrol devrelerinde üretilen hata sinyali belirlenen referans değerleri ile karşılaştırılarak sürücü devresine iletilmektedir. Sürücü devresi çıkışı ise anahtarlamayı gerçekleştirerek ana bara regülasyonunu ve pil şarjını gerçekleştirmektedir.

4 adet sürücü bloğu bulunmaktadır. Bunlardan 2 tanesi şönt anahtarlarını sırasıyla ilettime geçiren bloklar. Bir tanesi lineer bölge şarjını gerçekleştiren blok, sonuncusu ise pil şarj anahtarı ilettime girdiğinde aynı kesime ait şönt anahtarını iletimden çıkaran sürücü bloğudur. Bu sürücü blokları ile ana bara regülasyonu ve pil şarjı garanti edilmektedir.

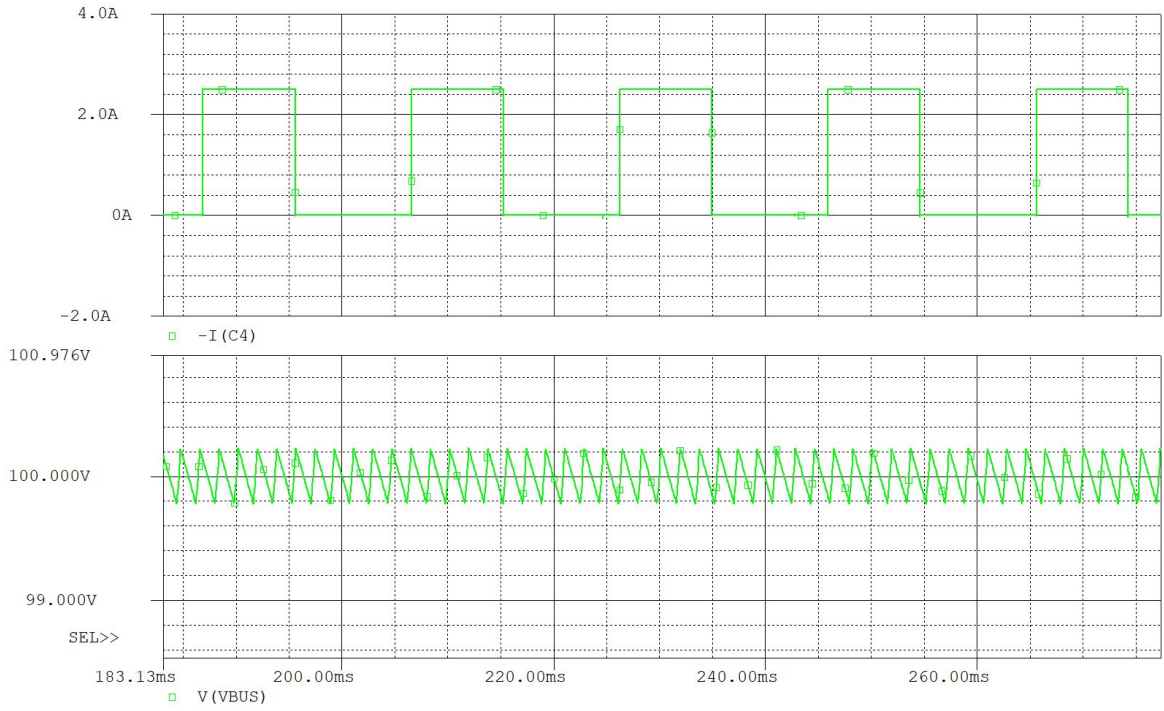
S1 sürücü sinyali S4R yapısının şönt anahtarını kontrol ederken, S2 sinyali pil şarj anahtarına iletilmektedir. S3 sürücü sinyali bağımsız S3R yapısının şönt MOSFET'ini anahtarlamaktadır. Son olarak S4 anahtarı ise lineer bölge şarjı sırasında pil şarj anahtarını susturmaktadır.



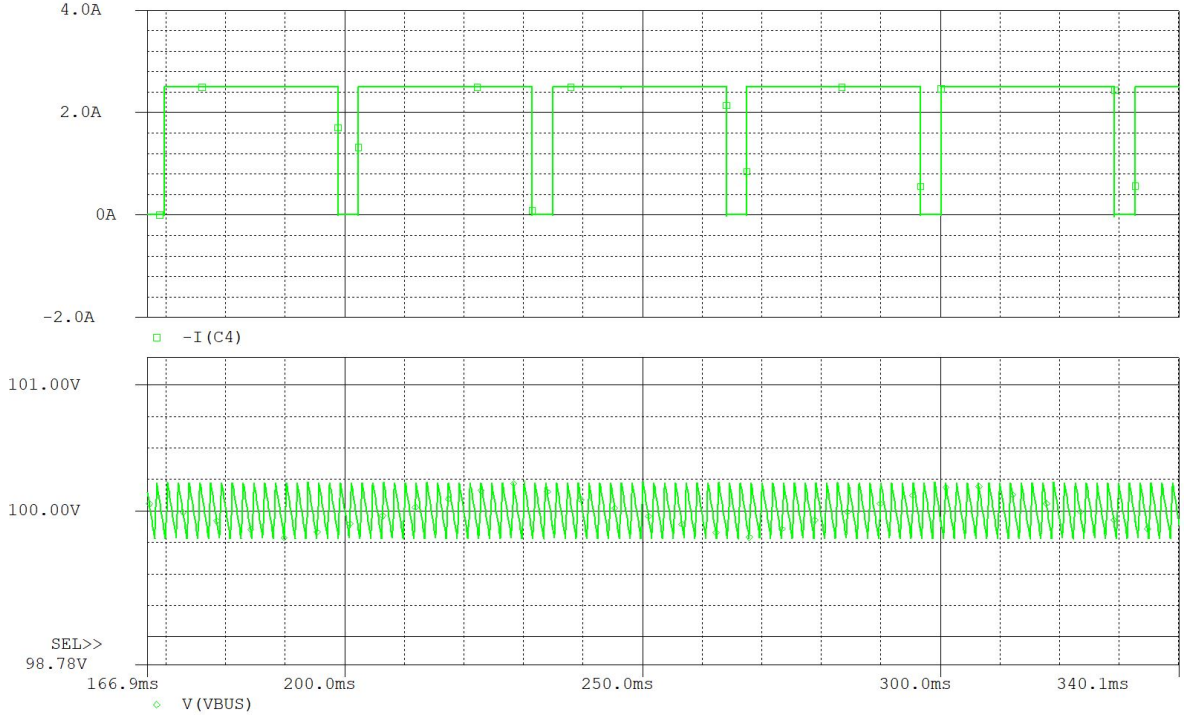
Şekil 7.10 Histeresis Komparatör ve Sürücü Devresi



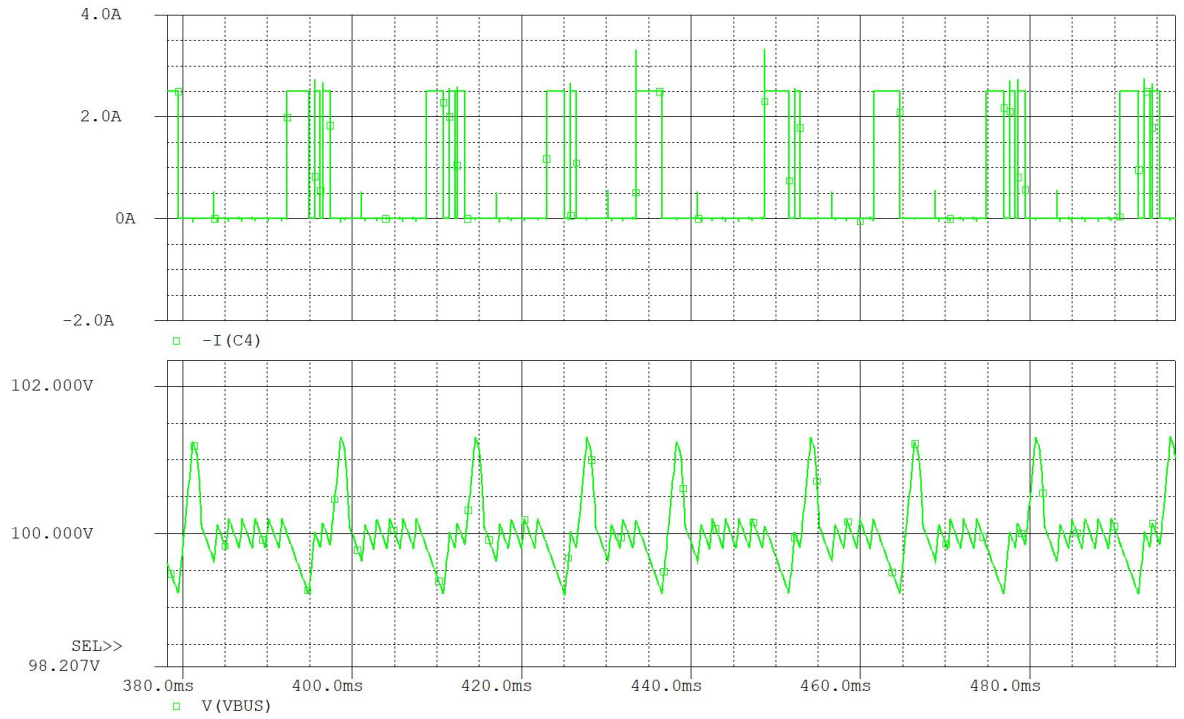
Şekil 7.11 Sabit akım modu (düşük yük) benzetimi, 0.6A şarj akımı (CH1)



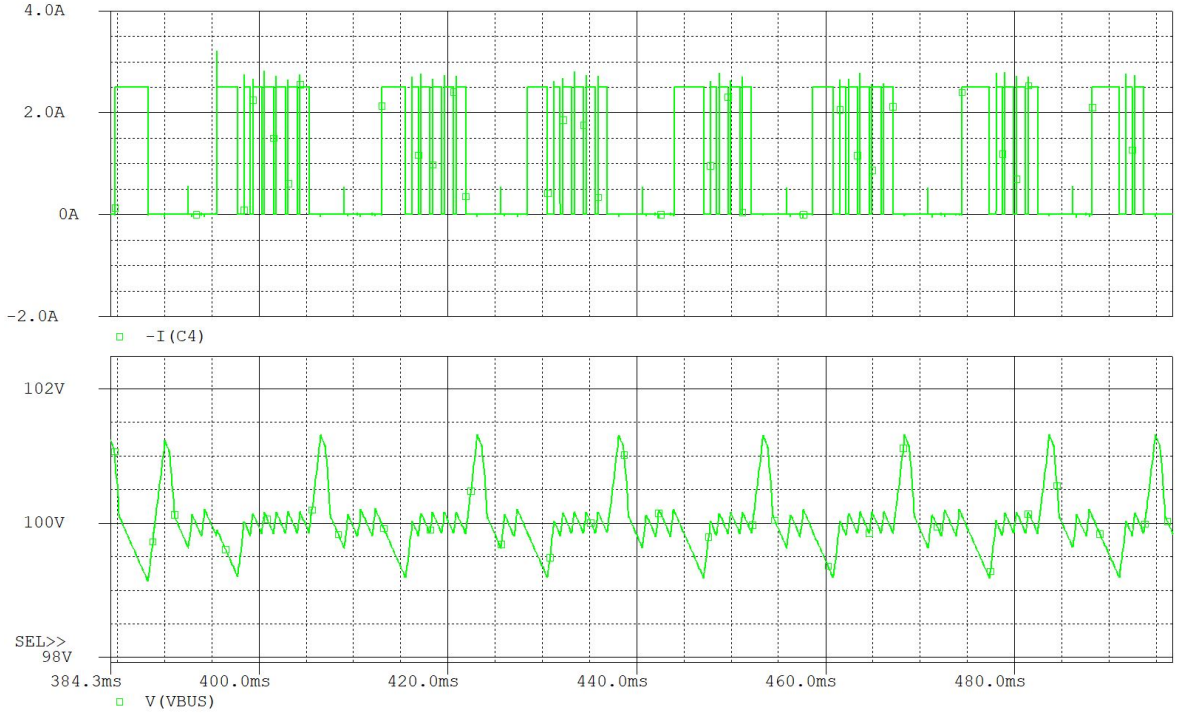
Şekil 7.12 Sabit akım modu (düşük yük) benzetimi, 1.1A şarj akımı (CH1)



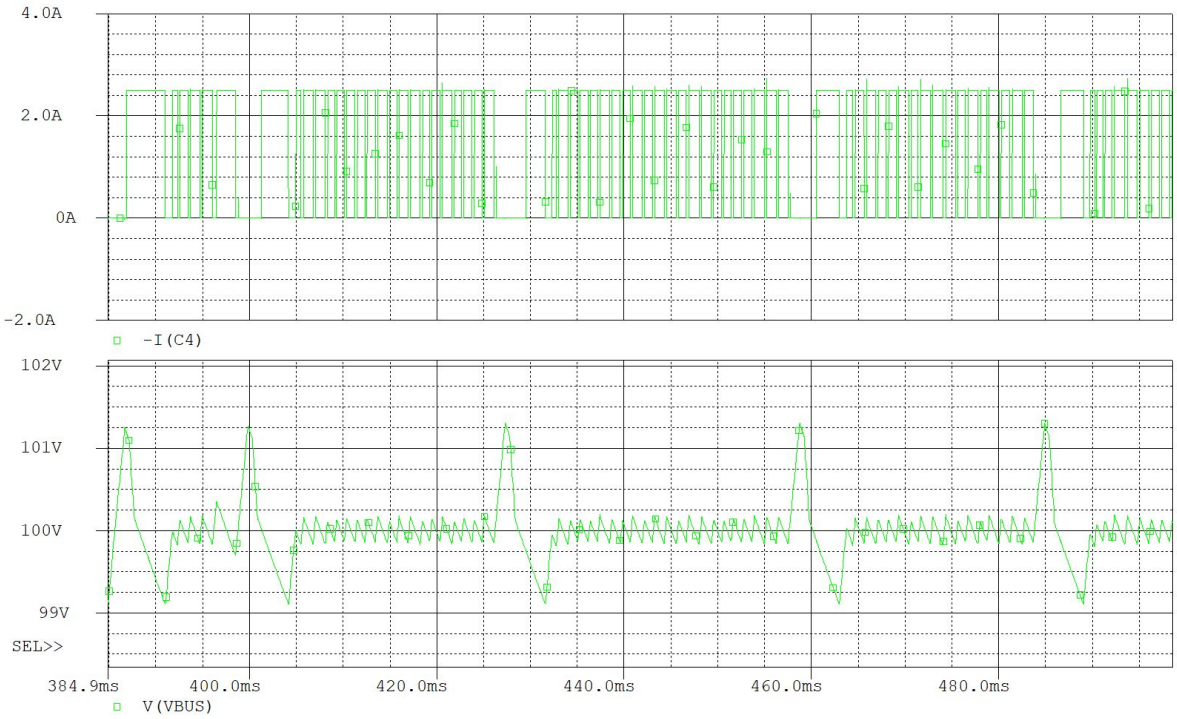
Şekil 7.13 Sabit akım modu (düşük yük) benzetimi, 2.25A şarj akımı (CH1)



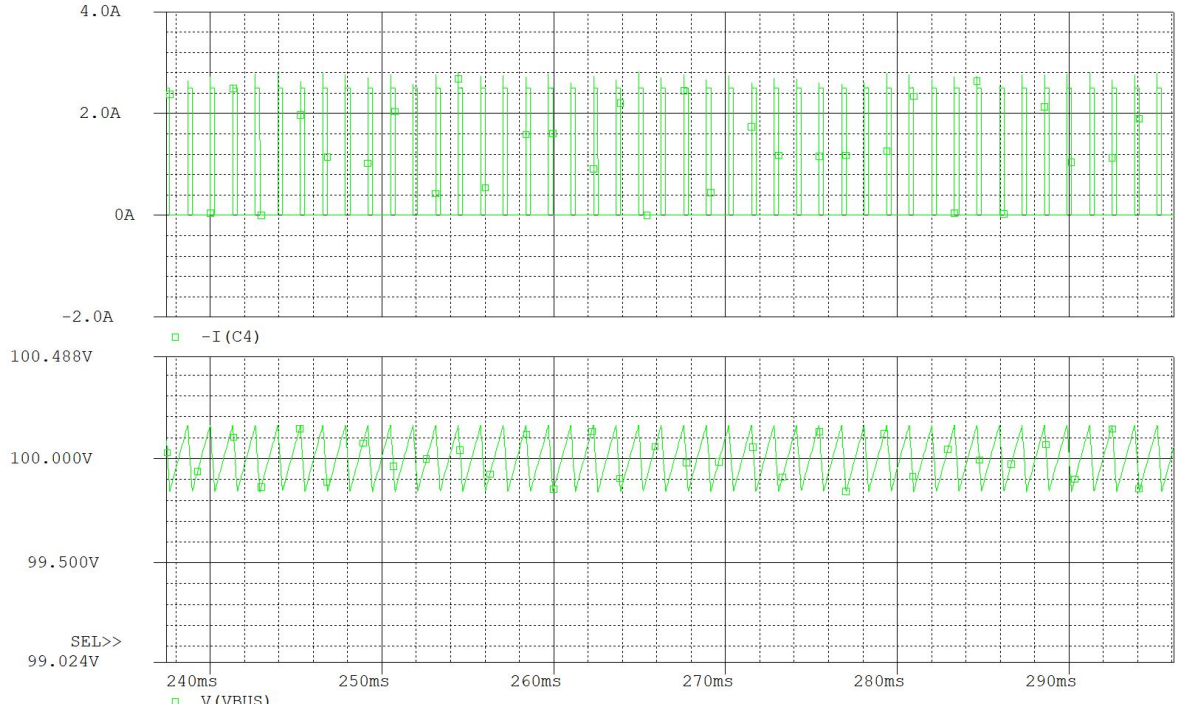
Şekil 7.14 Sabit akım modu (azami yük) benzetimi, 0.6A şarj akımı (CH1)



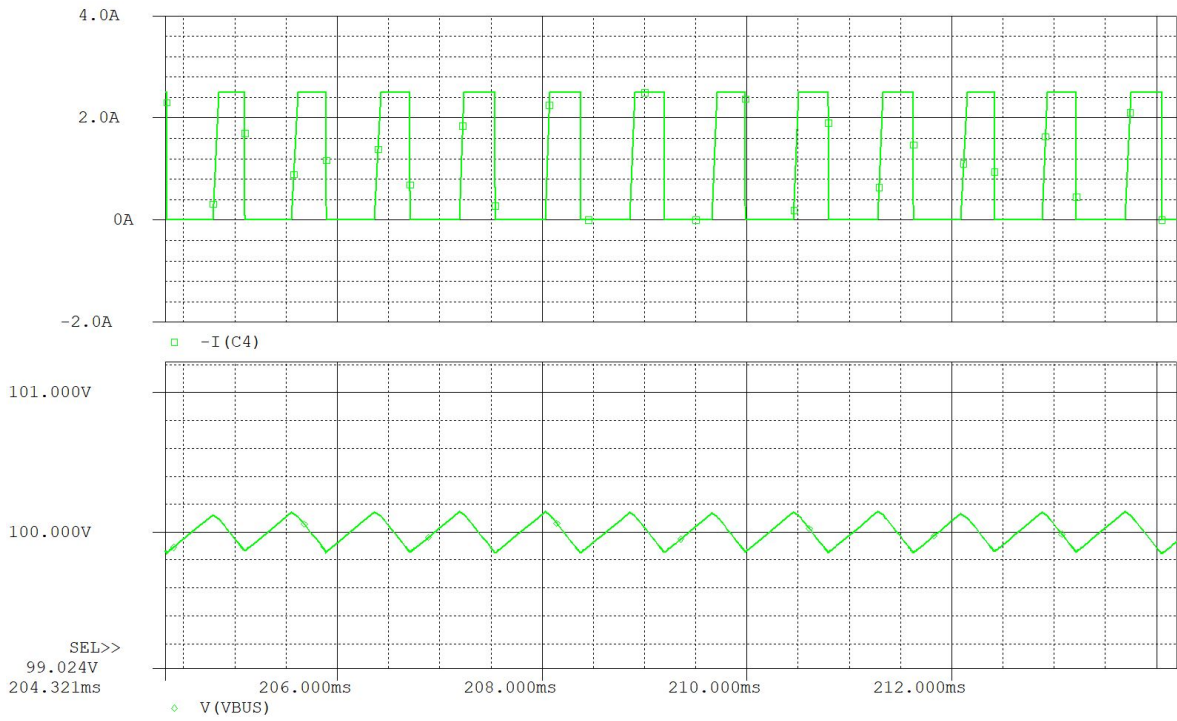
Şekil 7.15 Sabit akım modu (azami yük) benzetimi, 1.1A şarj akımı (CH1)



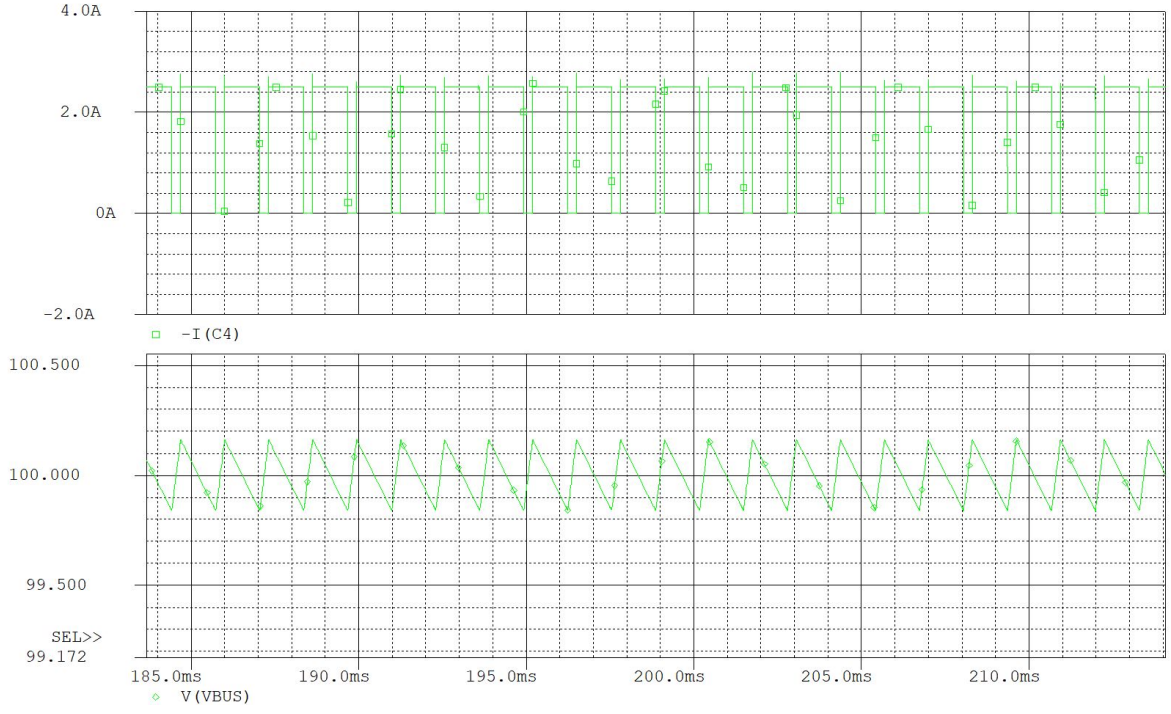
Şekil 7.16 Sabit akım modu (azami yük) benzetimi, 1.75A şarj akımı (CH1)



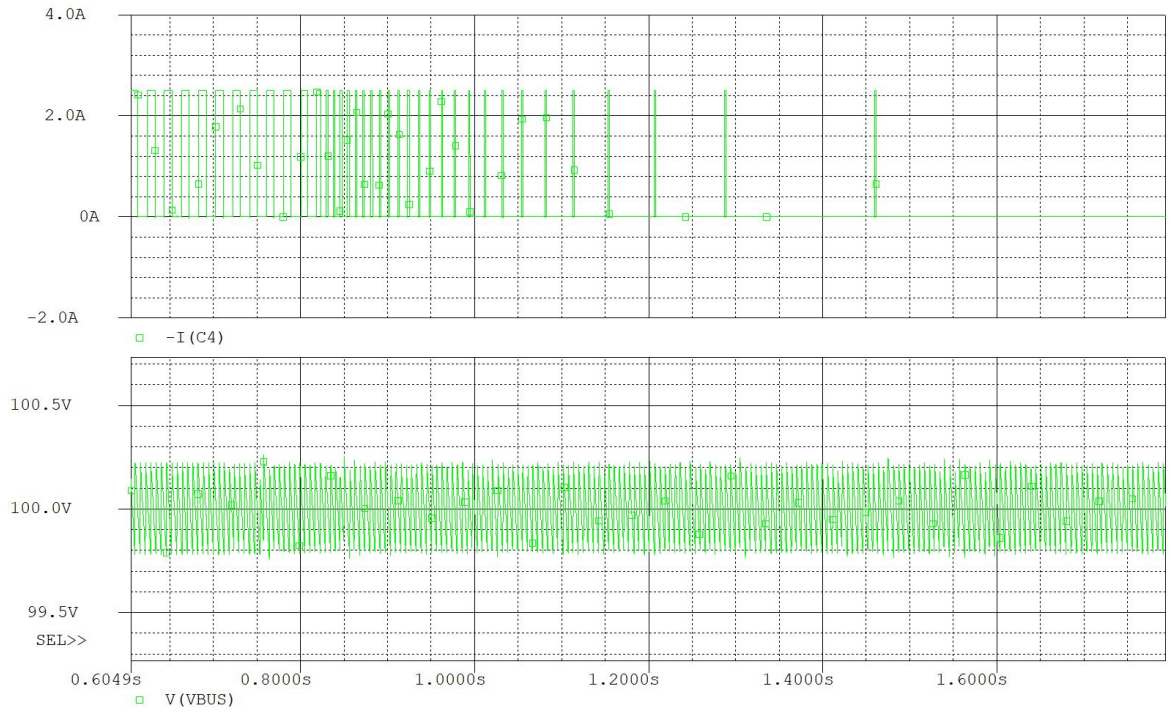
Şekil 7.17 Lineer bölge şarjı benzetimi, 0.5A şarj akımı (CH1)



Şekil 7.18 Lineer bölge şarjı benzetimi, 1A şarj akımı (CH1)



Şekil 7.19 Linear bölge şarjı benzetimi, 2A şarj akımı (CH1)



Şekil 7.20 Sabit gerilim modu pil şarjı benzetimi

8. DONANIM TEST BULGULARI

8.1. Test Ortamı ve Kullanılan Cihazlar

Güneş paneli düzenleyici devresinin çıkışına ana bara filtrelemesi için kapasitör bloğu paralel olarak bağlanmıştır. Daha sonra bu ana bara noktasına yük simülatörü dahil edilmiştir. Kart üzerindeki gerilim ve akım seviyelerini ve dalga şekillerini incelemek amacıyla osiloskop ve multimetre kullanılmıştır. Pil şarj işlevinin denenebilmesi amacıyla ise sabit gerilim kaynağı olan pil simülatörü kullanılmaktadır. Güneş paneli düzenleyicisinin girişi ise güneş paneli simülatörlerine bağlanmıştır. S3R ve S4R kesimlerine aynı anda güç sağlayabilmek amacıyla 2 kesim güneş paneli simülatörü kullanılmıştır.

Güneş paneli düzenleyici testleri kapsamında güneş paneli simülatörü, yük simülatörü, pil simülatörü, kapasitör bloğu, osiloskop ve multimetre ile birlikte oluşturulan test düzeneği Şekil 8.1 ile verilmiştir.

8.2. Dahili Güç Kaynağı Çıkışlarının Kontrolü

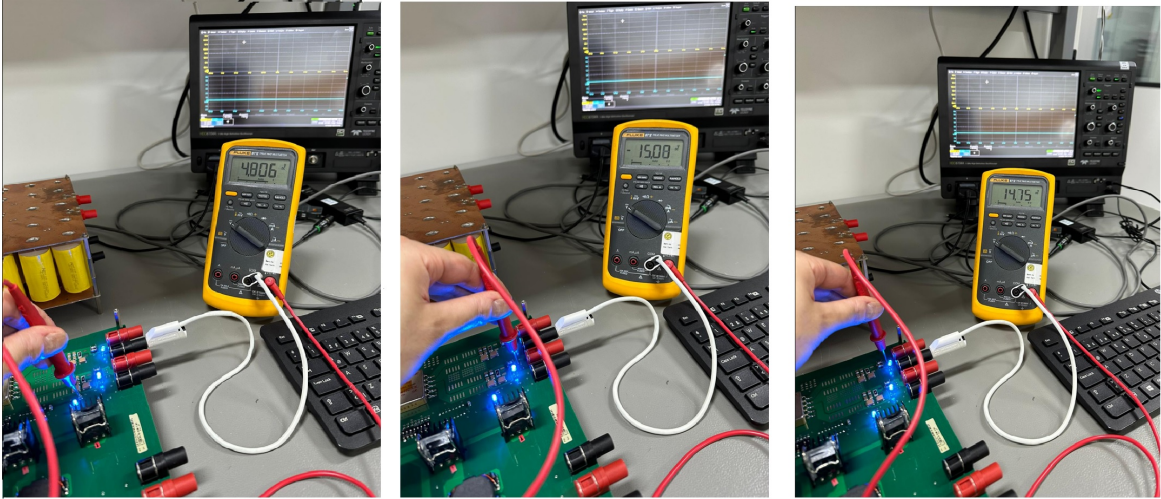
Güneş paneli düzenleyici içerisinde bulunan elektronik komponentlerin düşük seviye gerilim ihtiyaçların kendi bünyesinde bulundurduğu DA/DA dönüştürücü aracılığıyla üretmektedir. $\pm 15V$ ve $5V$ gerilim çıkışları kart içerisinde üretilmektedir. $\pm 15V$ çıkışları doğrudan DA/DA çıkışlarından alınmakta olup, $5V$ dahili gerilimi referans entegresi aracılığıyla üretilmektedir. $\pm 15V$ kontrol devresi, dijital-analog dönüştürücü ve MOSFET sürücü devresinde kullanılmakta olup, $5V$ ise dijital-analog dönüştürücü gerilim referansı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca güneş paneli düzenleyici kesimlerinin ihtiyaç duyduğu referans gerilimler ise $+15V$ üzerinden gerilim bölücüler ile elde edilmektedir.

Dahili gerilimlerin test bulguları Şekil 8.2 ile verilmiştir. Değerler çıkış diyotlarının katot tarafından alınmıştır. Bu tasarım sayesinde sadece güneş paneli simülatörü üzerinden devre enerjilendirilerek herhangi bir harici kaynak ihtiyacı olmamış ve daha sade bir test düzeneği



Şekil 8.1 Güneş Paneli Düzenleyici Test Düzenneđi

kurulabilmiştir. İhtiyaç halinde harici kaynak bağlayarak test edilebilmesi amacıyla bu dahili girişleri için konnektör eklenmiştir.



Şekil 8.2 $\pm 15V$ ve $5V$ Dahili Gerilim Çıkışları

8.3. Kapasitör Bankası Ölçümü

Ana bara regülasyonu için kritik bileşenlerden olan kapasitör bankasının değeri multimetre ile ölçülmüş ve Şekil 8.3 ile verilmiştir. Herbiri MKP tipi 250V 40uF olan paralel bağlı toplam 40 adet kapasitörden oluşan bu blok ana bara regülasyonu için kritik öneme sahiptir.

Ölçüm sonucu toleranslardan kaynaklı olarak toplam 1635uF çıkmıştır. Seçilen kapasitörlerin toleransı %10 olduğundan, sonucun beklenen aralıkta olduğu görülmüştür.



Şekil 8.3 Kapasitör Bankası Ölçümü

8.4. Sabit Akım ve Sabit Gerilim Referens Değerlerini Üretilmesi

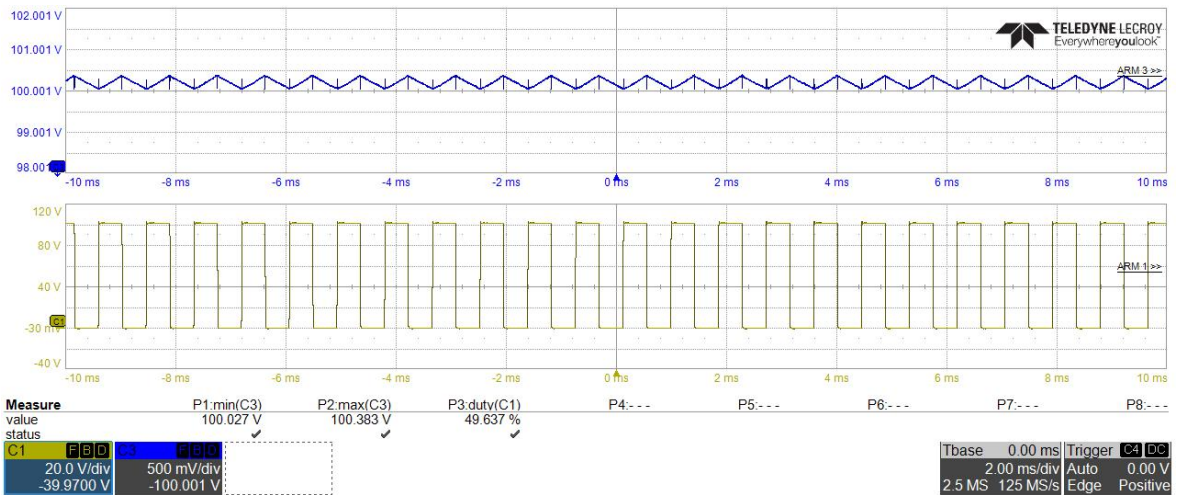
Pil şarj fonksiyonu için gerekli olan sabit akım ve sabit gerilim referanslarının üretilmesi için 8 bit dijital analog çeviriciler kullanılmıştır. Her iki referans 0-10V arası ölçeklendirilmiş olup test bulguları aşağıdaki çizelgede paylaşılmıştır.

DAC Bit	Sabit Akım Referansı	Sabit Gerilim Referansı
1000 0000	4,78 V	4,82 V
1100 0000	7,14 V	7,22 V
1110 0000	8,32 V	8,40 V
1111 0000	8,90 V	8,99 V
1111 1000	9,18 V	9,28 V
1111 1100	9,32 V	9,41 V
1111 1110	9,38 V	9,47 V
1111 1111	9,40 V	9,49 V

Şekil 8.4 Sabit akım ve sabit gerilim referans ölçümleri

8.5. Ana Bara Regülasyonu

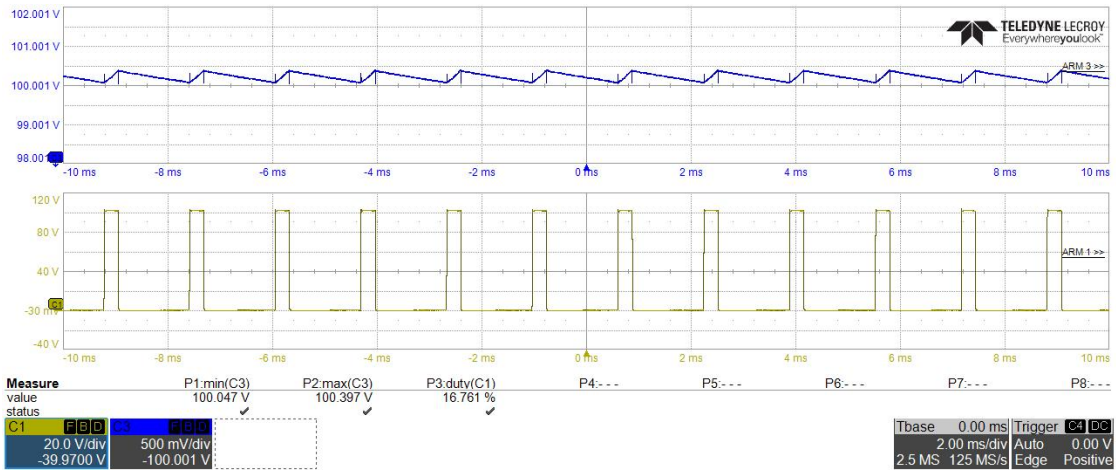
Kart üzerinde 2 adet güneş paneli düzenleyici kesimi bulunmaktadır. Bu kesimler ana baradan alınan gerilim bilgisini kullanarak hata sinyali doğrultusunda anahtarlama yaparak ana bara regülasyonunu sağlamaktadır. Ana hata yükselticisi çıkışı MOSFET sürücü devrelerine iletilmekte ve sürücü çıkışları ise N-kanal Mosfet'leri anahtarlama yapmaktadır. Test kapsamında regülasyon sırasında devrenin maksimum çalışma frekansı ve maksimum gerilim dalgalanması incelenmiştir.



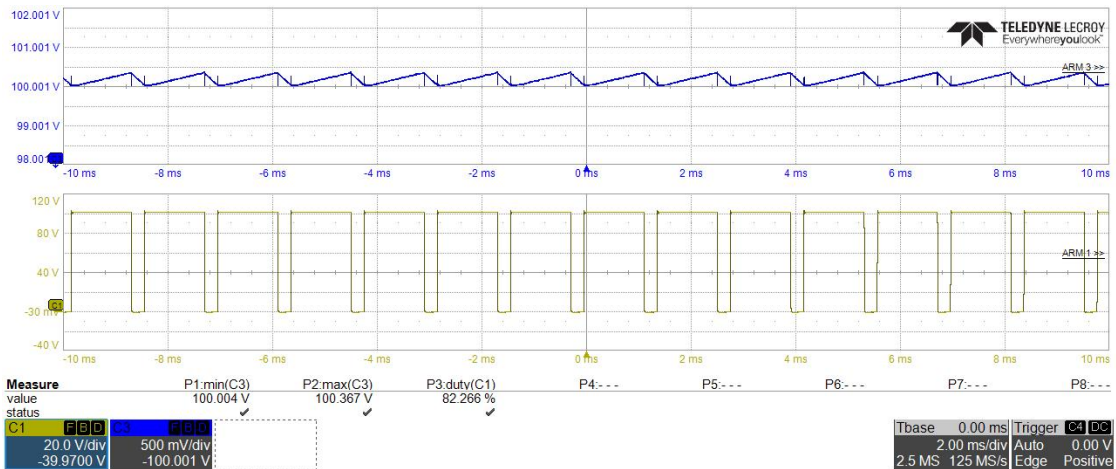
Şekil 8.5 Ana Bara Gerilim Dalgalanması (CH3-Mavi) ve Maksimum Çalışma Frekansı (CH1-Sarı)

Şekil 8.5 ile görüldüğü üzere ana bara dalgalanması maksimum 380mV olarak ölçülmüştür. %50 duty cycle altında maksimum çalışma frekansına ulaşan güneş paneli düzenleyicisinin çalışma frekansının da yaklaşık 1.1kHz olduğu görülmektedir. Ana bara gerilim dalgalanması ve çalışma frekansının teorik hesaplamalarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

%15 ve %80 duty cycle ile anahtarlama yapıldığı koşullar için test bulguları alınmış ve aşağıda verilmiştir. Bu durumlar altında çalışma frekansının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda ana bara gerilim dalgalanması beklendiği gibi aynı seviyede kalmıştır.

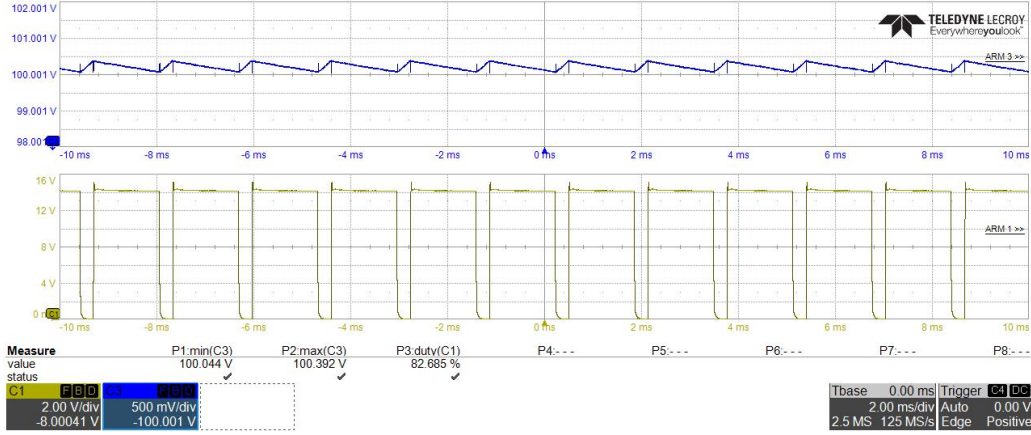


Şekil 8.6 Ana bara gerilimi (CH3-Mavi) ve Akaç-Kaynak Gerilimi (0.4A yük) (CH1-Sarı)

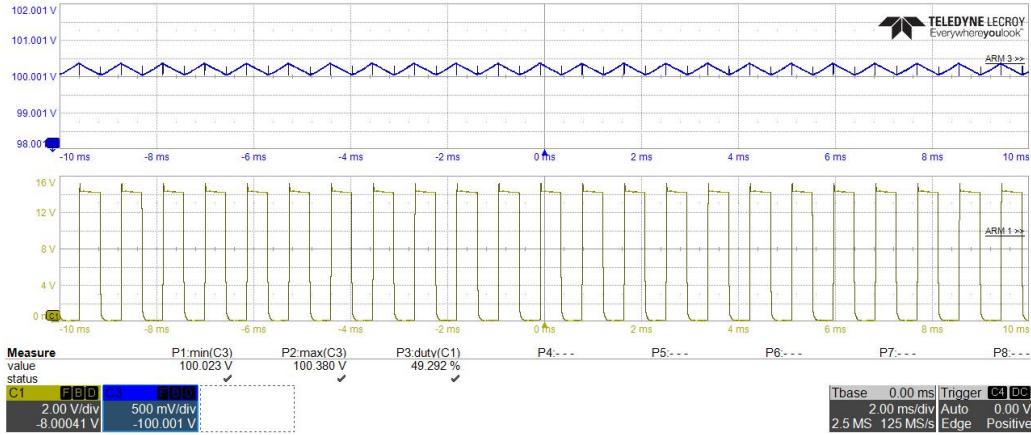


Şekil 8.7 Ana bara gerilimi (CH3-Mavi) ve Akaç-Kaynak Gerilimi (2A yük) (CH1-Sarı)

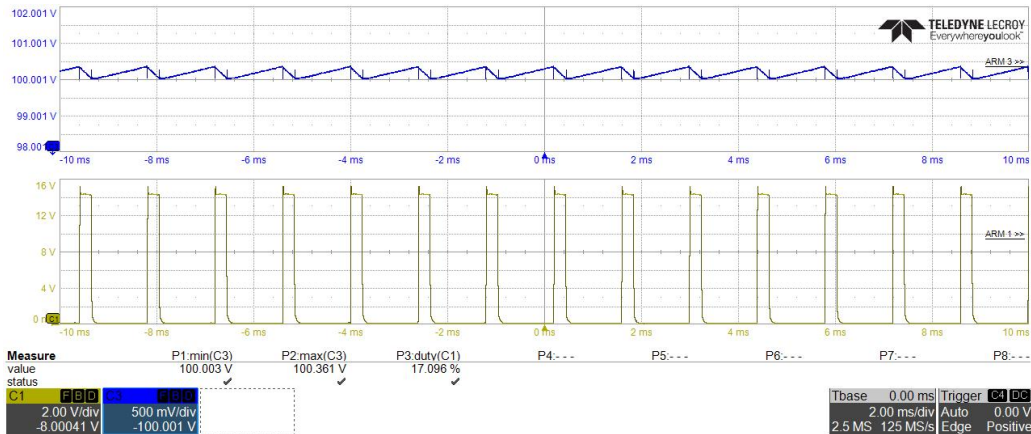
Farklı yük akımları altında kayıt altına alınan anahtarlamaya sinyalleri bulguları Şekil 8.8, Şekil 8.9 ve Şekil 8.10 ile verilmektedir.



Şekil 8.8 Ana bara gerilimi (CH3-Mavi) ve Kapı-Kaynak Gerilimi(0.4A yük) (CH1-Sarı)

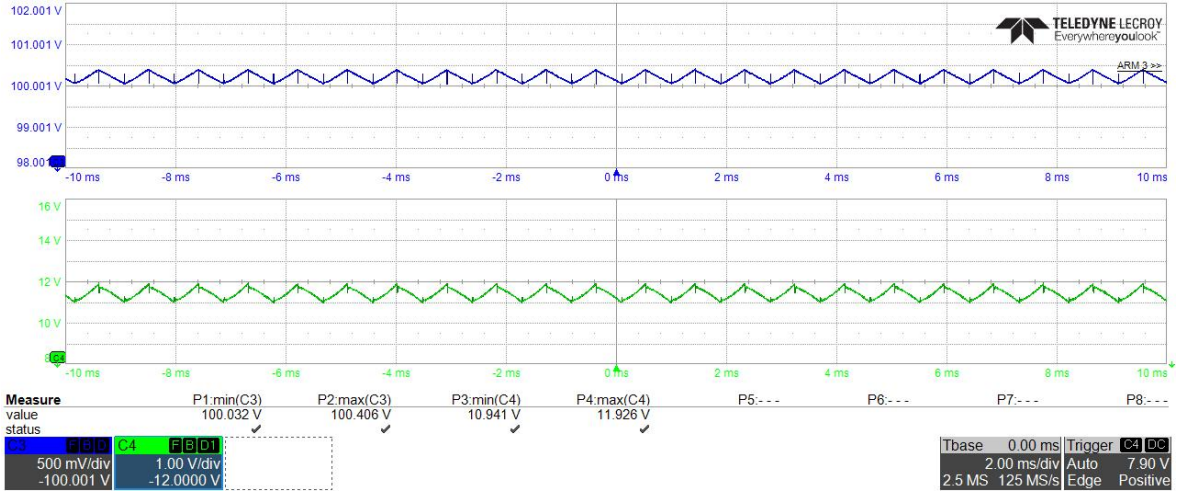


Şekil 8.9 Ana bara gerilimi (CH3-Mavi) ve Kapı-Kaynak Gerilimi(1.2A yük) (CH1-Sarı)



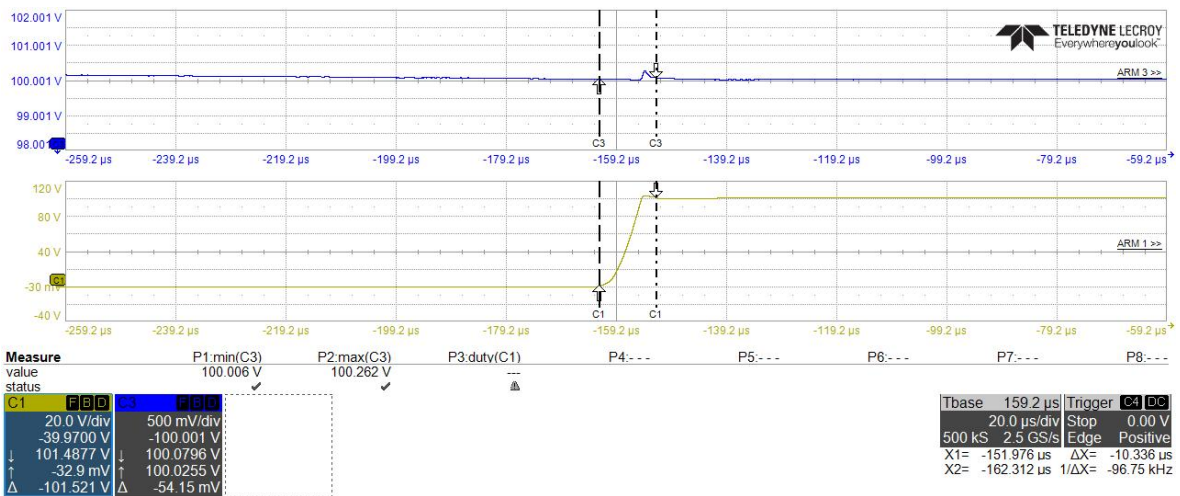
Şekil 8.10 Ana bara gerilimi (CH3-Mavi) ve Kapı-Kaynak Gerilimi(2A yük) (CH1-Sarı)

Ana bara kontrolcü hat sinyali ölçümleri de alınmış olup, ana bara ile paralel hareket ettiği gözlemlenmiştir. Ana bara gerilimi ve ana bara kontrolcü sinyali Şekil 8.11 ile verilmiştir. Ana bara gerilim dalgalanması ile MEA gerilim dalgalanması arasındaki ilişki bulgular ile desteklenmiştir. Ana bara gerilim dalgalanması 380mV, MEA gerilim dalgalanması ise 1V olarak. Bu bulgular tasarım bölümünde belirtilen hesaplamaları desteklemektedir.

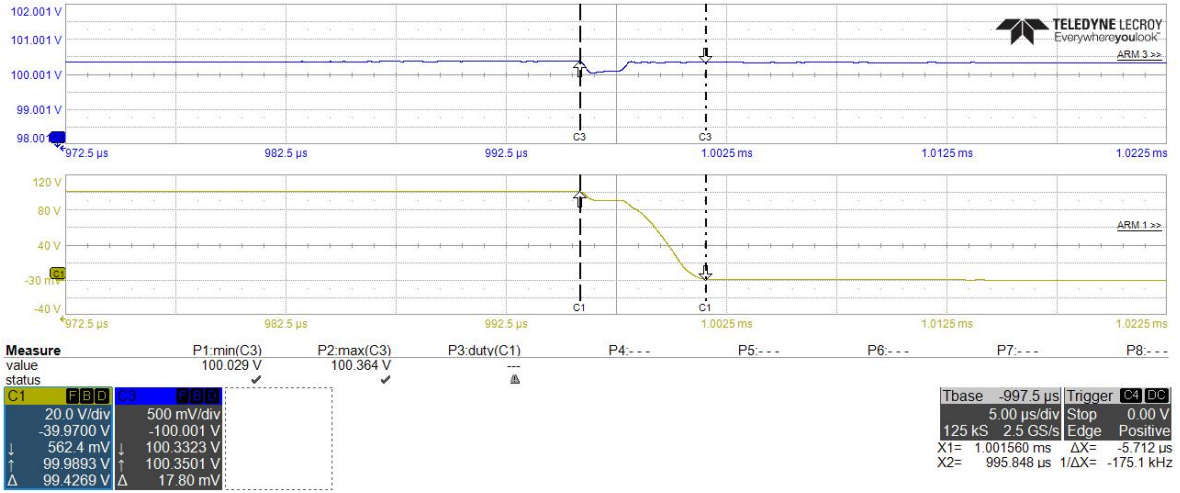


Şekil 8.11 Ana bara gerilimi (CH3-Mavi) ve MEA Sinyali (CH4-Yeşil)

Anahtarlama gecikme değerleri Şekil 8.12 ve Şekil 8.11 ile verilmiştir. S3R mosfeti açılma gecikmesi 5.7us, kapanma gecikmesi 10.3us olarak ölçülmüştür.



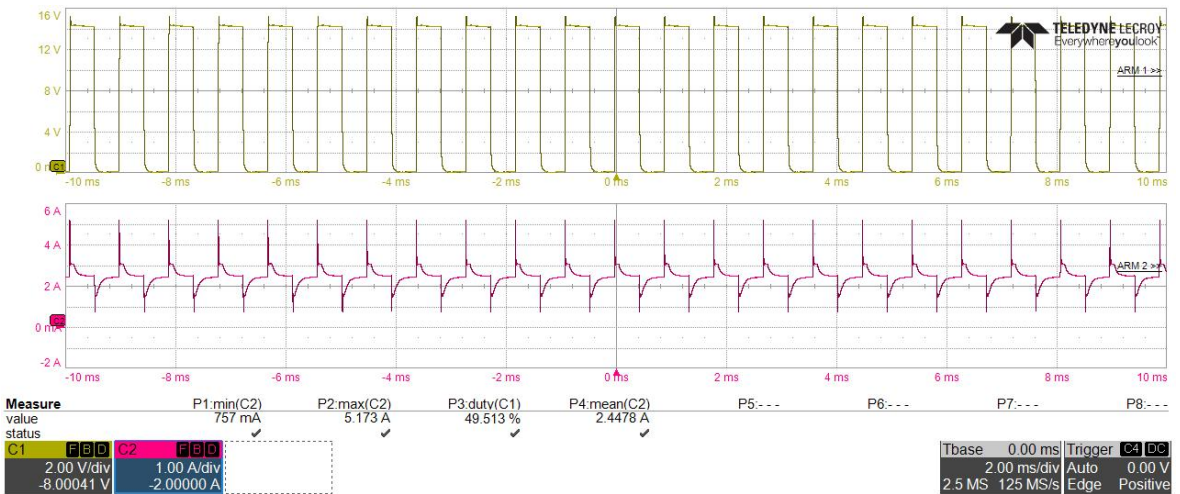
Şekil 8.12 S3R Mosfet Kapanma Gecikmesi (CH3:Ana Bara Gerilimi, CH1:Akaç-Kaynak Gerilimi)



Şekil 8.13 S3R Mosfet Açılma Gecikmesi (CH3:Ana Bara Gerilimi, CH1:Akaç-Kaynak Gerilimi)

Güneş paneli kesimlerinin anahtarlaması sonucu parazitik kapasitans kaynaklı akım sıçramalarının etkisi ölçülmüştür. S3R anahtarının kaynak bacağına seri bağlı indüktör ile pasif akım limitleme yapılmaktadır. Bu sayede akım sıçramalarının seviyesi azaltılmakta ve anahtarlama elemanlarının zarar görmesinin önüne geçilmektedir.

Şekil 8.14 ile anahtarlama sırasında güneş paneli akımının değişimi verilmektedir. Akım sıçramalarının maksimum değerinin 5A olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 8.14 Anahtar Kapı-Kaynak Gerilimi (CH1-Sarı) ve Güneş Paneli Giriş Akımı (CH2-Kırmızı)

8.6. Pil Şarjı

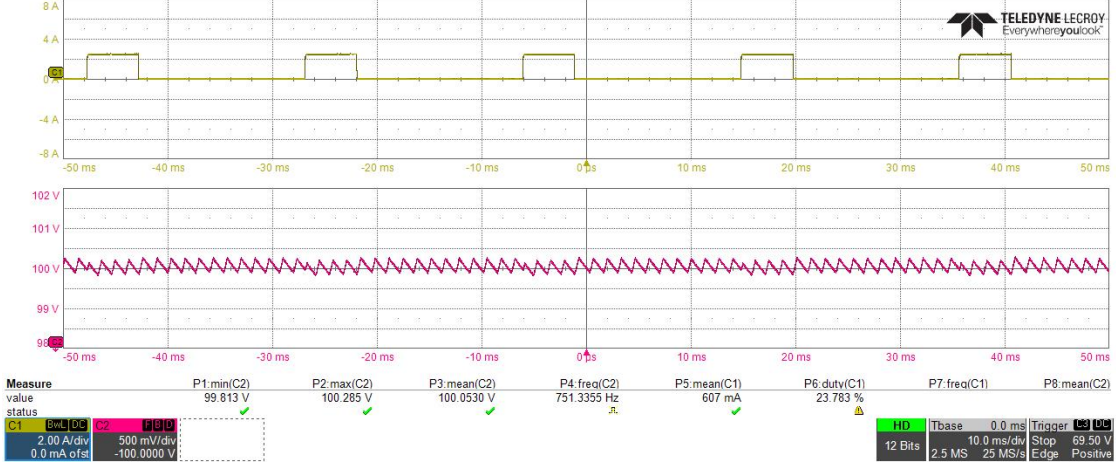
Kart üzerinde bulunan 2 adet güneş paneli düzenleyici kesiminden bir tanesi pil şarjı için ayrılmıştır. Pil hata sinyali doğrultusunda pile seri bağlı MOSFET anahtarlanarak pil şarjı kontrol edilmektedir. Sabit akım, sabit gerilim ve lineer bölge şarjı için alınan bulgular osiloskop ile alınmış ve incelenmiştir. Test görüntülerinde CH1, CH2 ve CH3 kanalları sırasıyla pil şarj akımı, ana bara gerilimi ve pil şarj kontrol hata sinyallerini göstermektedir.

Şekil 8.15, Şekil 8.16 ve Şekil 8.17 bulgularından görüldüğü üzere, şarj akımı referansı arttıkça, pil şarj kontrol anahtarının çalışma oranı pil şarj hata sinyali doğrultusunda (Şekil 8.20, Şekil 8.21, Şekil 8.22) artırılarak ortalama şarj akımı referans şarj akımına getirilmektedir.

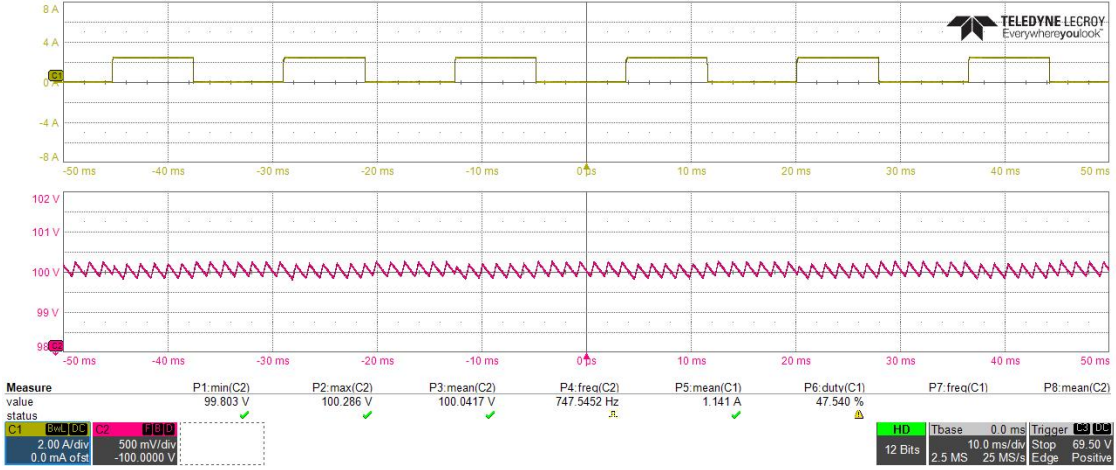
Düşük yük modunda S3R ve S4R kesimleri bağımsız regülasyon gerçekleştirdiklerinden dolayı ana bara gerilim dalgalanmasında herhangi bir değişim olmamıştır. Pil şarj darbe akımlarının olduğu anlarda ana barada anlık değişimler olmakta fakat ana bara kontrolcü devresi sayesinde hızlı bir şekilde toparlanma gerçekleşmektedir.

Pil şarj akım darbelerinin maksimum değerinin beklendiği üzere güneş paneli kesimi kısa devre akımı kadar olduğu gözlemlenmiştir. Pil şarj frekansının S3R modunda olduğu gibi maksimum değerine kesim akımının yarısında ulaştığı görülmektedir. Şekil 8.18 ve Şekil 8.17 ile de pil şarj akımı anahtarlamasının yükseliş ve iniş süreleri verilmiştir.

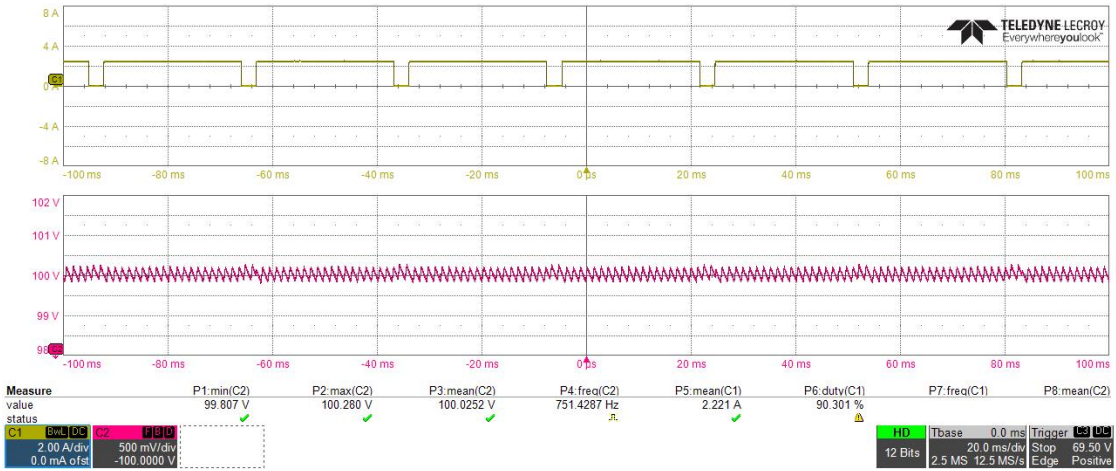
Ana baradan çekilen yük 2.5A'ın üstüne çıkarıldığında, devre, azami yük modunda sabit akım pil şarjı gerçekleştirmektedir. Şekil 8.23, Şekil 8.24 ve Şekil 8.25 ile 3 farklı şarj akımı için sonuçlar verilmiştir. Azami yük modunda S3R ve S4R kontrol döngüleri birlikte aynı anahtar kontrol etmektedirler. Daha düşük frekansa sahip pil şarj akım darbe sinyallerinin içerisinde ana bara regülasyonunu sağlayacak şekilde pil şarjının kesildiği görülmektedir. Bu modda anahtarlama frekansı düştüğünden dolayı ana bara gerilim dalgalanmasının yükseldiği gözlemlenmiştir. Fakat 100V regülasyon noktasının stabil bir şekilde tutulduğu görülmektedir.



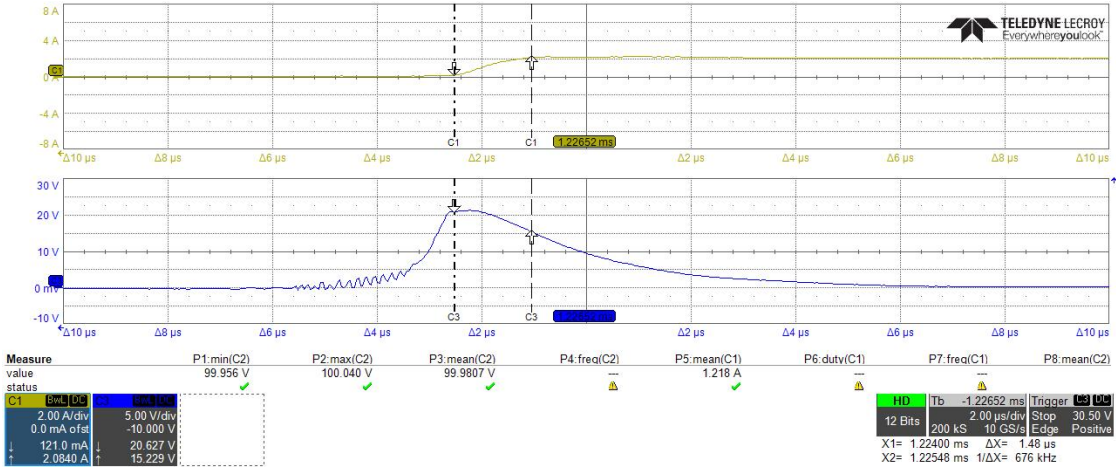
Şekil 8.15 Sabit akım modu (0.6A Pil Şarjı) (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)



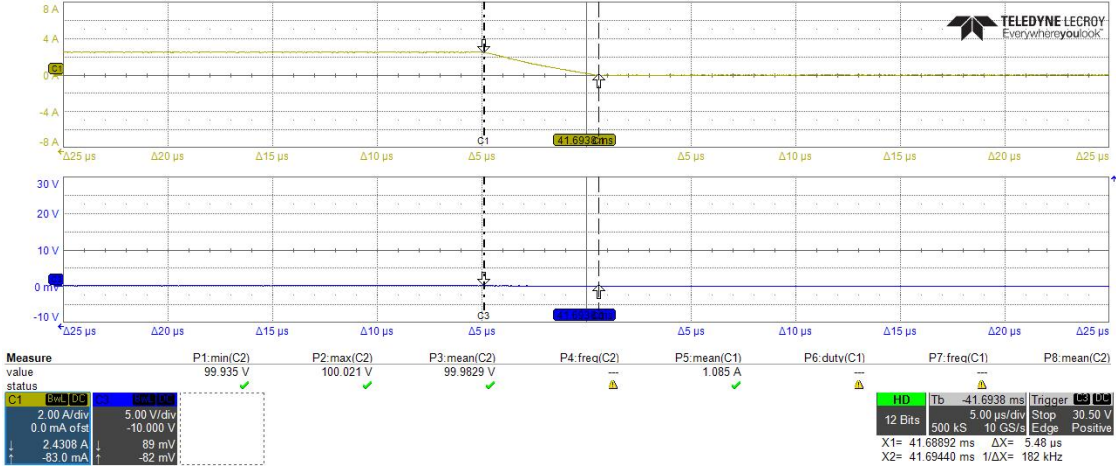
Şekil 8.16 Sabit akım modu (1.1A Pil Şarjı) (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)



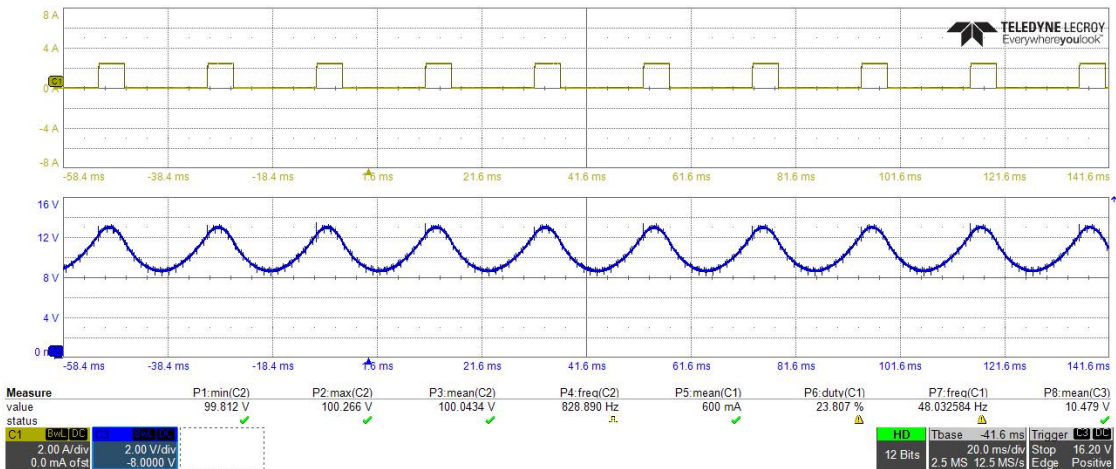
Şekil 8.17 Sabit akım modu (2.25A Pil Şarjı) (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)



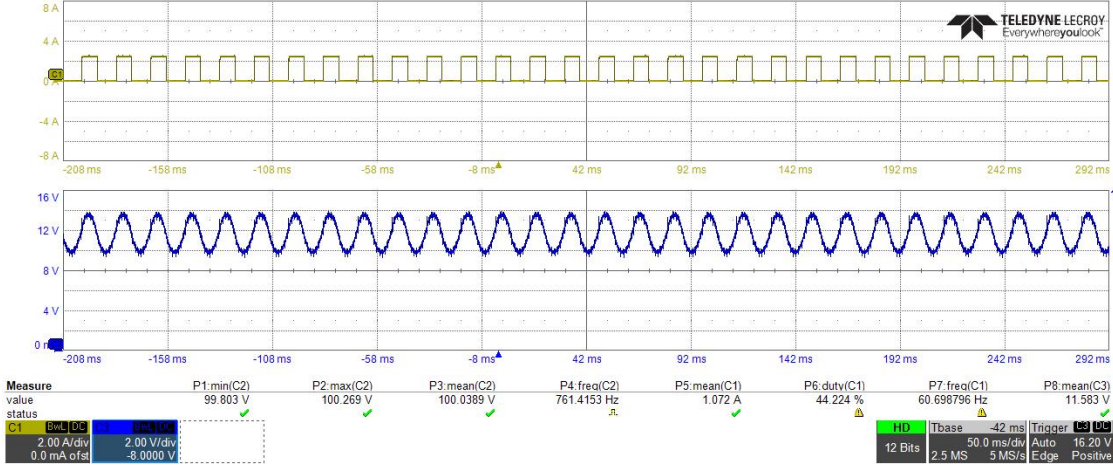
Şekil 8.18 Pil şarj akımı anahtarlaması yükseliş(tr) değeri



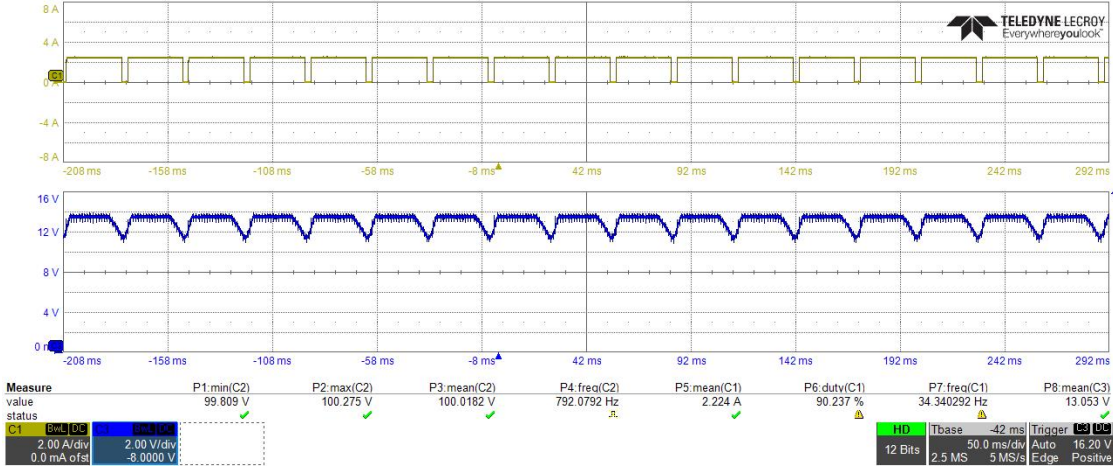
Şekil 8.19 Pil şarj akımı anahtarlaması iniş(tf) değeri



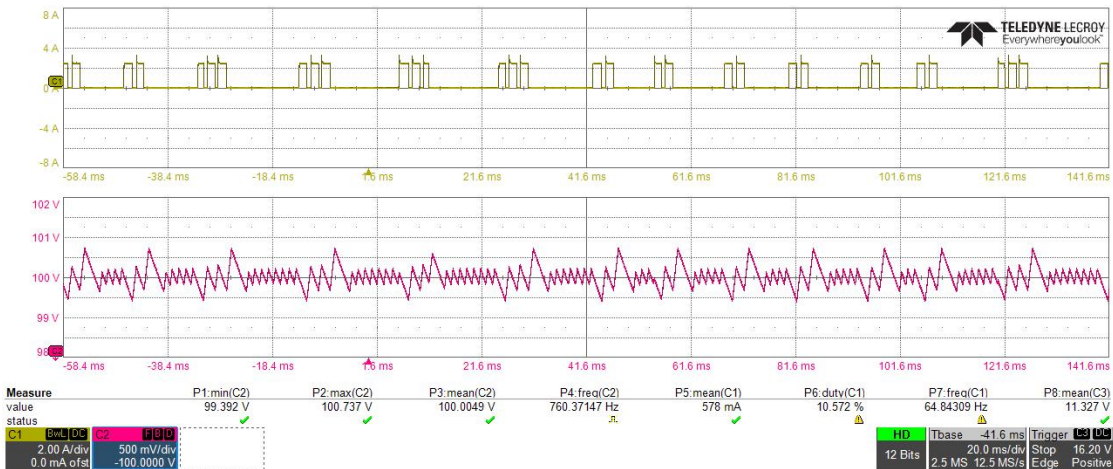
Şekil 8.20 Pil şarj hata sinyali, 0.6A şarj akımı (CH1:Şarj Akımı, CH3:BEA Gerilimi)



Şekil 8.21 Pil şarj hata sinyali, 1.1A şarj akımı (CH1:Şarj Akımı, CH3:BEA Gerilimi)



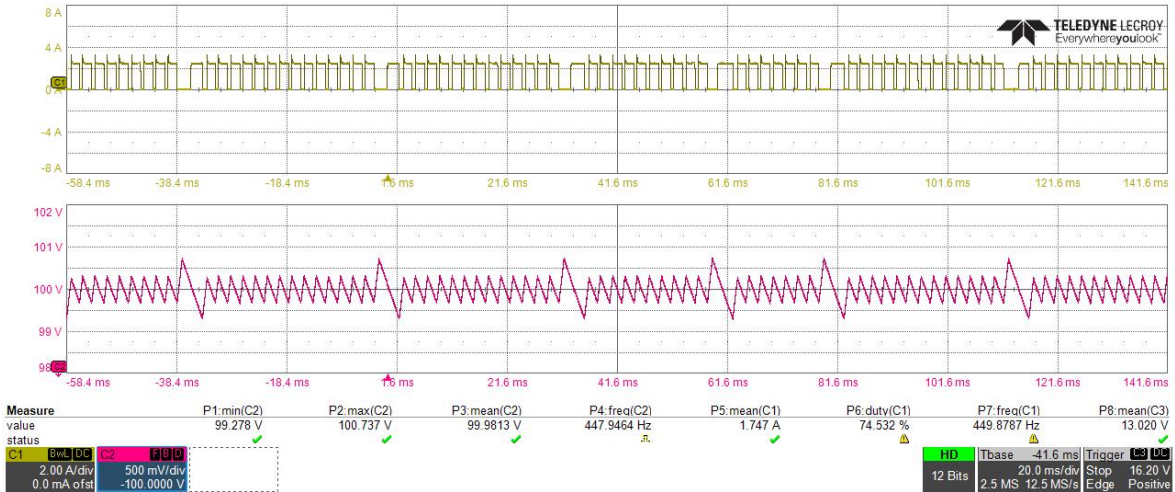
Şekil 8.22 Pil şarj hata sinyali, 2.25A şarj akımı (CH1:Şarj Akımı, CH3:BEA Gerilimi)



Şekil 8.23 Sabit akım modu (azami yük), 0.6A pil şarjı (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)



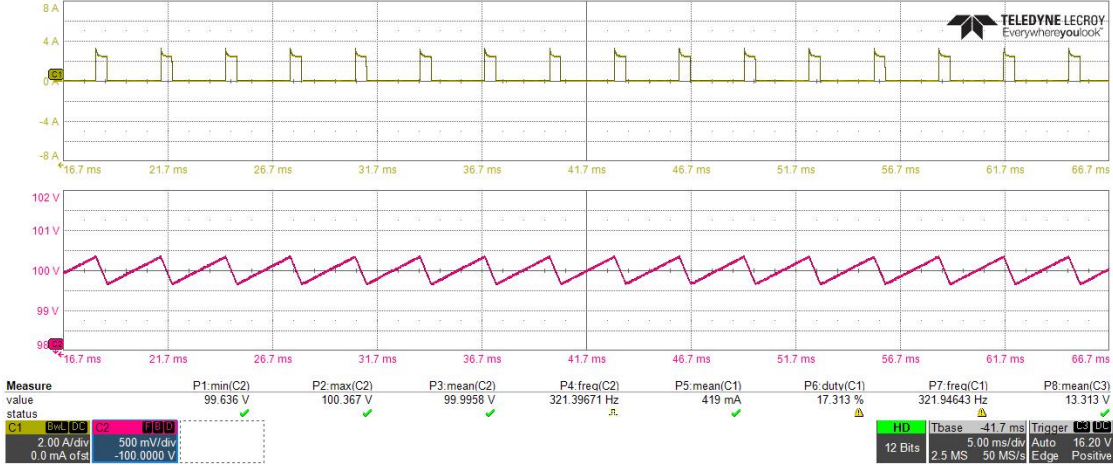
Şekil 8.24 Sabit akım modu (azami yük), 1.1A pil şarjı (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)



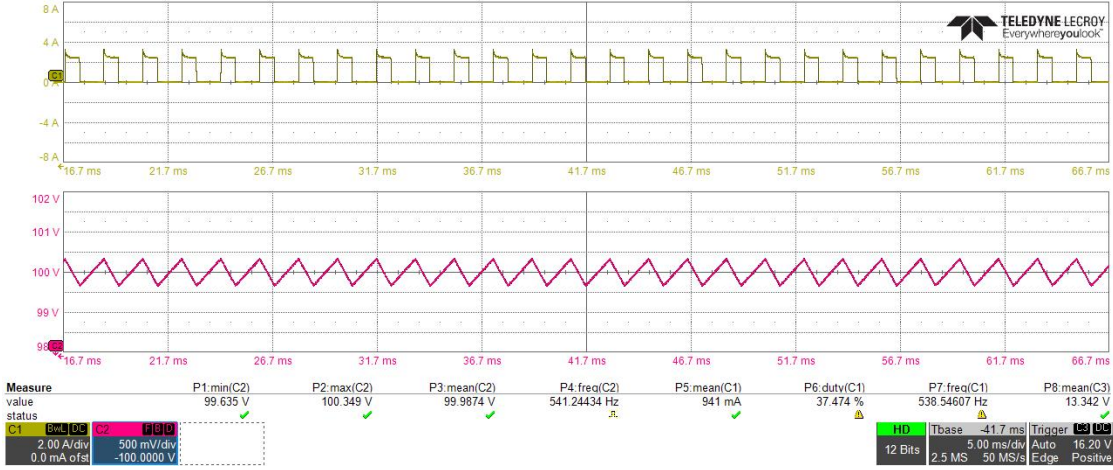
Şekil 8.25 Sabit akım modu (azami yük), 1.75A pil şarjı (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)

Azami yük modunda eğer pil şarj referansı, güneş panelinin sağlayabileceği maksimum şarj akımı seviyesinden yukarıda bir değere atanırsa, devre lineer bölge şarjına başlamaktadır. Bu modun temel mantığı, ana bara regülasyonu sağlanırken, mümkün olan tüm akımın pil şarjına yönlendirilmesidir. Bu modda regülasyon ana bara kontrolcüsü tarafından gerçekleştiğinden pil şarj akım frekansı diğer modlara göre yüksektir. Maksimum şarj akımı frekansı ise S3R maksimum anahtarlama frekansı geçmemektedir.

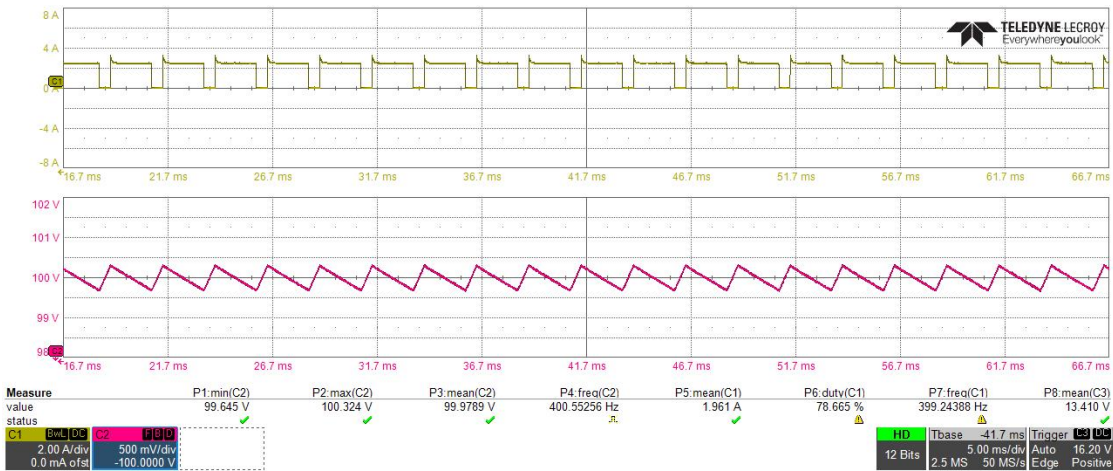
Şekil 8.26, Şekil 8.27 ve Şekil 8.28 ile 3 farklı şarj akımı için lineer bölge şarjı bulguları verilmiştir.



Şekil 8.26 Lineer bölge şarjı, 0.5A pil şarjı (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)

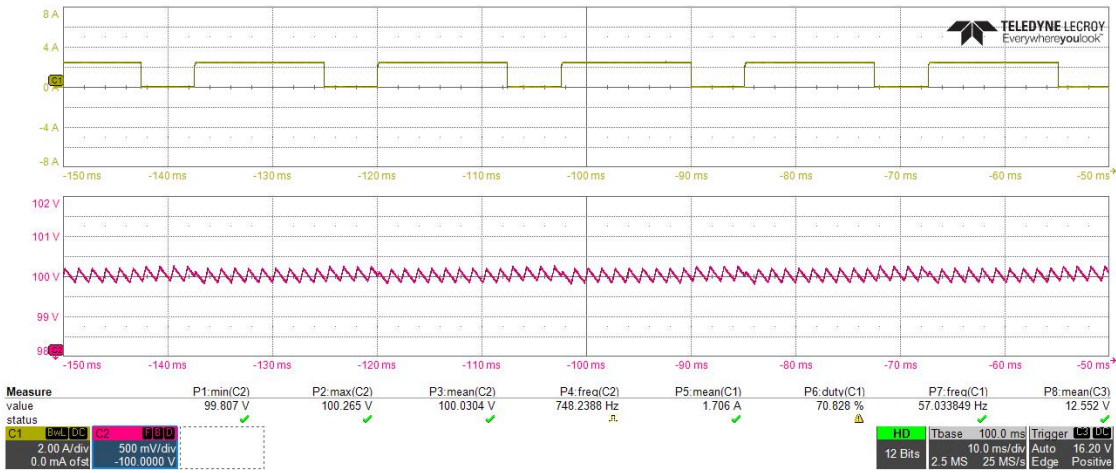


Şekil 8.27 Lineer bölge şarjı, 1A pil şarjı (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)

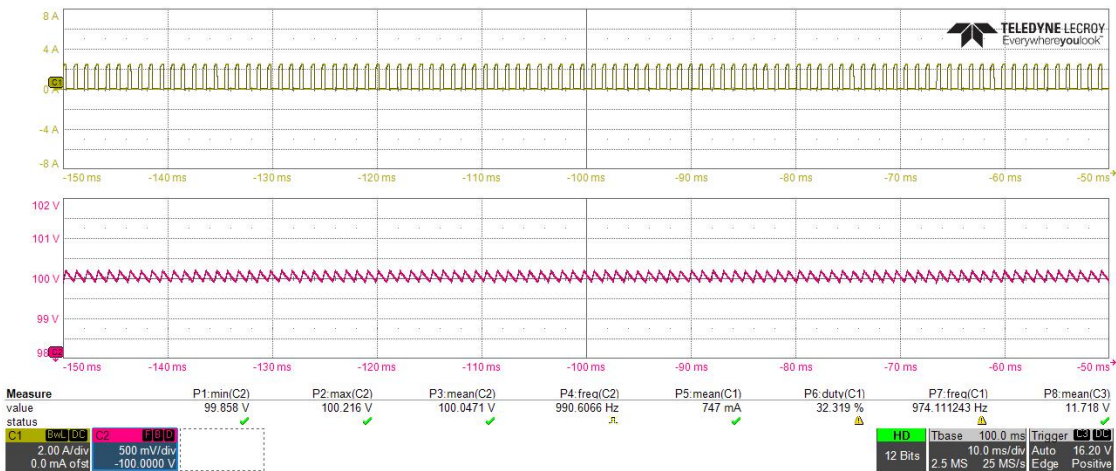


Şekil 8.28 Lineer bölge şarjı, 2A pil şarjı (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)

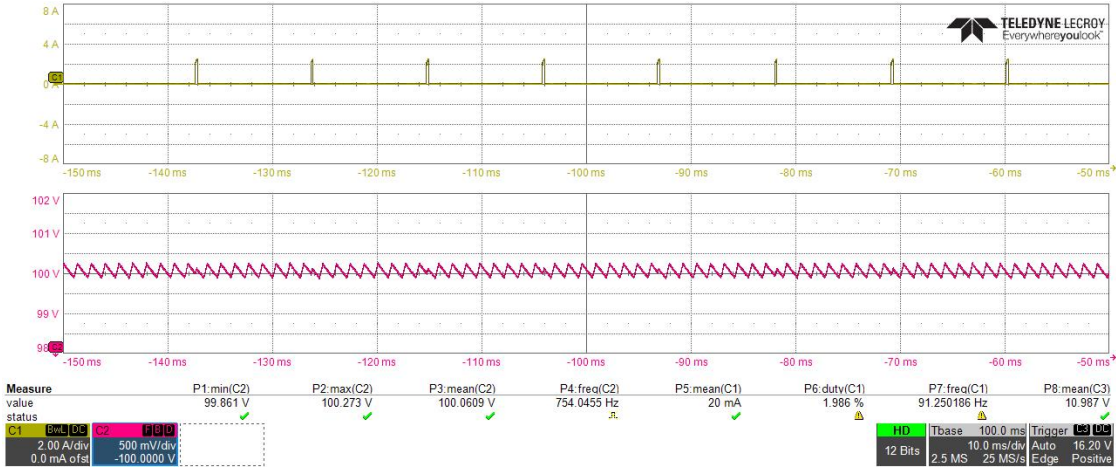
Pil gerilimi şarj sonu referans seviyesine yaklaştığında, dönüştürücü sabit gerilim modunda şarja devam etmektedir. Pil gerilimi attığında sabit gerilim kontrol döngüsü çıkışı düşmeye başlamakta ve regülasyonu devralmaktadır. Testlerde pil şarj sonu referansı yaklaşık 72.5V seviyelerine ayarlanmış olup, pil gerilimi adım adım artırılarak sabit gerilim moduna girdiği gözlemlenmiştir. Şekil 8.29 ile pil gerilimi referans değerinden düşük olduğu durumda pil şarjının sabit akım modunda devam ettiği görülmektedir. Pil gerilimi referans değerinin üzerine çıkarılmaya başladığında ise Şekil 8.30 ve 8.31 ile verildiği üzere pil şarj döngüsü sabit gerilim moduna geçmekte ve pil şarj akımı kısılmaktadır. Pil gerilimi 72.8V seviyesi geldiğinde ise pil şarj akımı kesilmektedir.



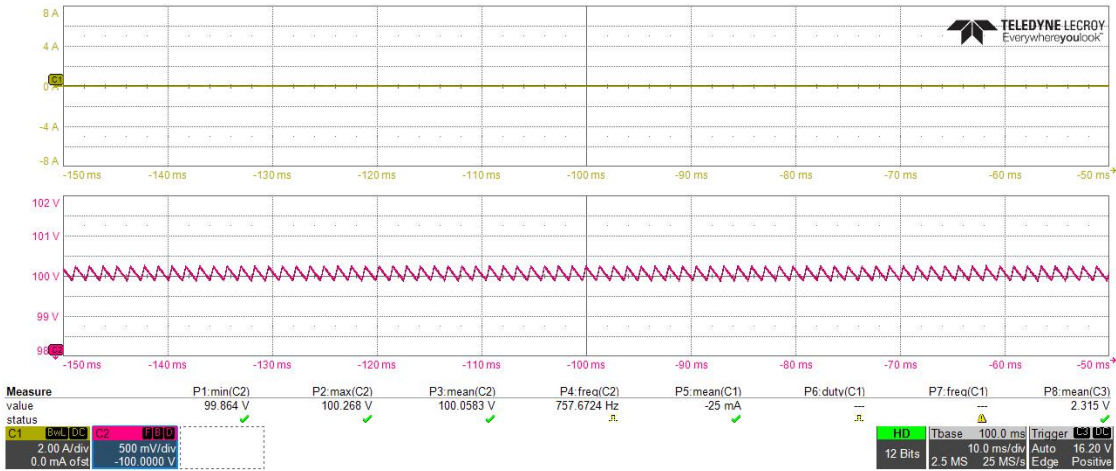
Şekil 8.29 Sabit gerilim modu pil şarjı (Pil:72.4V) (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)



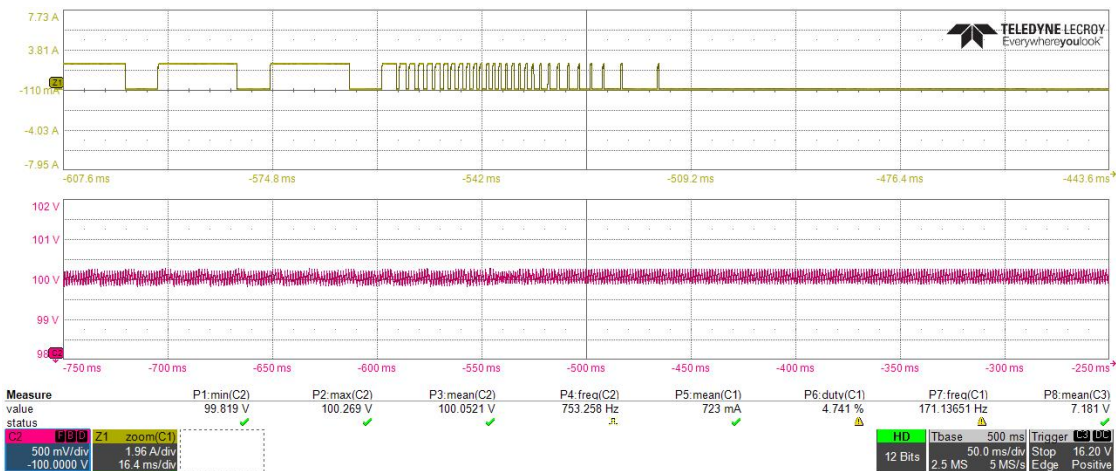
Şekil 8.30 Sabit gerilim modu pil şarjı (Pil:72.6V) (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)



Şekil 8.31 Sabit gerilim modu pil şarjı (Pil:72.7V) (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)



Şekil 8.32 Sabit gerilim modu pil şarjı (Pil:72.8V) (CH1:Şarj Akımı, CH2:Ana Bara Gerilimi)



Şekil 8.33 Sabit akım modundan sabit gerilim modu pil şarjına geçiş

9. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, tam regüle bara mimarisine sahip uydu güç alt sisteminde kullanmak üzere ana bara regülasyonu ve pil şarj işlevlerini birlikte gerçekleştirebilen bir güç dönüştürücü tasarımı sunulmuştur. Temel motivasyon, geleneksel bir tam regüle bara mimarisinde bulunan pil şarj düzenleyici yapısını sistemden çıkararak, tek bir birim altında hem ana bara regülasyonu hem de pil şarjı gerçekleştirebilen tek bir birim kullanılmasıdır. Böylece kütle, hacim ve maliyet açısından ciddi avantaj sağlanmaktadır.

Tez kapsamında 1 kesimi S3R tabanlı, 1 kesimi de S4R tabanlı toplam 2 kesime sahip 500W kapasiteli bir güneş paneli regülatörü tasarlanmıştır. Pil şarjı için sabit akım, sabit gerilim ve lineer mod şarj özellikleri tasarıma uygulanmıştır. Tasarımın Orcad pspice üzerinde benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiş olup, daha sonra baskı devre kartı çizilip, üretilmiş ve test sonuçları alınmıştır. Test sonuçlarının benzetim sonuçlarıyla oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Tez kapsamında tasarlanan güneş paneli regülatörü ile hem ana bara regülasyonu, hem pil şarjı için %98'in üzerinde verim elde edilmiştir. Düşük anahtarlama frekansına sahip bu topoloji sayesinde anahtarlama kayıpları azalmakta ve verim yükselmektedir. Güç kayıpları azaldığından dolayı ısı kontrol açısından daha tercih edilebilir bir topoloji haline gelmektedir. Bunlara ek olarak kullanılacağı sistem için elektromanyetik girişim açısından avantaj sağlamaktadır. Güneş paneşi regülatörü maksimum çalışma frekansı 1kHz seçilmiştir.

[16] ve [15] makalelerinde 28V ve 50V regüle bara yapısına uyumlu S4R yapıları anlatılmaktadır. [16] çalışmasında bahsedilen minimum yük modu ve azami yük modu, tez çalışmasında gerçekleştirilen 100V uyumlu S4R yapısıyla benzerlik göstermektedir. Fakat bu makalelerde pil şarj modu olarak sadece sabit akım modu çalışılmıştır. Sabit gerilim ve lineer şarj modunun çalışıldığı bir S4R çalışması bulunmamaktadır. Tez kapsamında, literatürde yapılan çalışmalara ek olarak sabit gerilim ve lineer mod şarj işlevleri ve kontrol yöntemiyle ilgili detaylar verilmiştir.

Çizelge 9.1 Benzetim ve Test Sonuçları Karşılaştırılması

Parametre	Benzetim	Test
Ana Bara Çıkış Gerilimi (Maksimum) (Anahtarlama Modu)	100.2 V	100.383 V
Ana Bara Çıkış Gerilimi (Minimum) (Anahtarlama Modu)	99.8 V	100.027 V
Ana Bara Gerilimi Dalgalanması (Anahtarlama Modu)	400 mV	356 mV
Ana Bara Gerilimi Dalgalanması (Azami Yük Şarj Modu)	1.9 V	1.356 V
Ana Bara Gerilimi Dalgalanması (Lineer Şarj Modu)	320 mV	714 mV
Ana Bara Gerilimi Dalgalanması (Sabit Gerilim Şarj Modu)	410 mV	400 mV
Maksimum Anahtarlama Frekansı	950 Hz	1.11 kHz

Tez kapsamında gerçekleştirilen tasarımın benzetim ve test sonuçlarının oldukça tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Azami yük modunda benzetim ile test sonuçları arasındaki farkın benzetim modellemesiyle ilgili olduğu değerlendirilmektedir. Azami yük modu test sonuçlarında benzetim sonuçlarına nazaran herhangi bir istemsiz anahtarlama gözlenlenmemiştir. Benzetim ve test sonuçları karşılaştırılması aşağıda verilmiştir.

Pil şarj yöntemine ek olarak literatürdeki çalışmalarda S4R yapısındaki sürücü devrelerinde kullanılan MOSFET'ler yerine BJT kullanılarak maliyet ve boyut açısından bu çalışmalara göre avantaj kazanılmıştır. Bu çalışmalara göre dezavantaj olarak ise tez çalışmasında kullandığımız kapasitör bankası değeri gösterilebilir. 28V ve 50V baralara uyumlu yapılarda yaklaşık 500uF kapasitör bankasıyla çözümler geliştirilirken, tez kapsamında geliştirilen 100V uyumlu güneş paneli düzenleyicisinde 1.6mF değerinde kapasitör bankası kullanılmıştır. Bu durum muadillerine göre devrenin bir sistemde kullanılması durumunda boyut ve ağırlık dezavantajı getirmektedir. Gelecek çalışmalarda, lineer şarj modundaki ana bara dalgalanmasındaki farkın optimize edilmesi ile birlikte daha düşük kapasitör bankası kullanımıyla benzer performans elde edilerek boyut, ağırlık ve maliyet açısından gelişme sağlanması hedeflenmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Mukund R Patel. *Spacecraft power systems*. CRC press, **2004**.
- [2] Sparkwing Solar Arrays. <https://sparkwing.space/satellite-solar-panels/>.
- [3] W Guter, F Dunzer, L Ebel, K Hillerich, W Köstler, T Kubera, M Meusel, B Postels, and C Wächter. Space solar cells–3g30 and next generation radiation hard products. In *E3S Web of Conferences*, volume 16. EDP Sciences, **2017**.
- [4] Jean-Baptiste Lotin, Marc Bekemans, Emmanuel De Jaeger, Corentin DUMONT, and Caroline LEROI. Mppt based on synchronous demodulation.
- [5] Enersys. *Li-ion Space Battery Datasheet*.
- [6] Jeong-Eon Park. A control algorithm for tapering charging of li-ion battery in geostationary satellites. *Energies*, 16(15):5636, **2023**.
- [7] SAFT. *Rechargeable Li-ion battery systems*.
- [8] L Schirone, M Ferrara, P Granello, C Paris, and F Pellitteri. Power bus management techniques for space missions in low earth orbit. *energies* 2021, 14, 7932, **2021**.
- [9] Faik Ercan Karagöz, Berk İnce, Yunus Şahin, Doğacan Yıldırım, Emre Çetin, Mehmet Karahan, Barış Çolak, and Cihat Nusret Uğurlu. Turkish first indigenous 100v satellite power subsystem. In *2023 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST)*, pages 01–06. IEEE, **2023**.
- [10] L Soubrier and E Trehet. High power pcu for alphabus: Psr100v. In *9th European Space Power Conference*, volume 690, page 11. **2011**.
- [11] Berk İnce, Doğacan Yıldırım, Faik Ercan Karagöz, Emre Çetin, and Yunus Şahin. High power density sequential switching shunt regulator module. In *2023 13th European Space Power Conference (ESPC)*, pages 1–7. IEEE, **2023**.

- [12] Peter Fortescue, Graham Swinerd, and John Stark. *Spacecraft systems engineering*. John Wiley & Sons, **2011**.
- [13] Fatama Ahmed Mohamed Alshehhi. Design and control of electrical power subsystem for satellite applications. **2019**.
- [14] A Capel and P Perol. Comparative performance evaluation between the s4r and the s3r regulated bus topologies. In *2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 01CH37230)*, volume 4, pages 1963–1969. IEEE, **2001**.
- [15] Ausias Garrigós, Javier Rubiato, Jose A Carrasco, José M Blanes, and Agustin Ferreres. Control loop design of the sequential switching shunt series regulator. In *MELECON 2006-2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, pages 1194–1197. IEEE, **2006**.
- [16] Ausias Garrigós, Jose A Carrasco, Jose M Blanes, and Esteban Sanchis. Modeling the sequential switching shunt series regulator. *IEEE Power Electronics Letters*, 3(1):7–13, **2005**.
- [17] James Richard Wertz, Wiley J Larson, Douglas Kirkpatrick, and Donna Klungle. *Space mission analysis and design*, volume 8. Springer, **1999**.
- [18] Antonio De Luca. Architectural design criteria for spacecraft solar arrays. In *Solar Cells-Thin-Film Technologies*. IntechOpen, **2011**.
- [19] Dermott O’SULLIVAN. Satellite power system topologies. *ESA Journal*, 13(2):77–88, **1989**.
- [20] Zhang Xuan, Kang Qing, Yu Wentao, Xing Jie, Li Feng, and You Xiangan. Power assessment indices of solar arrays under mppt and det methods for spacecraft. In *2019 European Space Power Conference (ESPC)*, pages 1–4. IEEE, **2019**.
- [21] D Osullivan and G Weinberg. The sequential switching shunt regulator s3r. *Spacecraft Power Conditioning*, pages 123–131, **1977**.

- [22] Ausias Garrigos, José M Blanes, José A Carrasco, and Juan B Ejea. Influence of the parasitic solar array capacitance in the sequential switching shunt series regulator. In *MELECON 2006-2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, pages 1198–1201. IEEE, **2006**.
- [23] Abbas A Salim. Regulation and control of solar array power-a minimum power dissipation approach. In *INTELEC-1978 International Telephone Energy Conference*, pages 121–127. IEEE, **1978**.
- [24] Hans Jensen. Shunt regulator module. In *8th European Space Power Conference*, volume 661, page 57. **2008**.
- [25] DAC08 Datasheet. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/dac08>
- [26] LM139 Datasheet. <https://www.ti.com/lit/gpn/LM139-MIL>.
- [27] 2N2222 Datasheet. <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/p2n2222a-d.pdf>.
- [28] 2N2907 Datasheet. <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/p2n2907a-d.pdf>.
- [29] OP27 Datasheet. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/op27>.
- [30] P0597NL Datasheet. <https://productfinder.pulseelectronics.com/api/open/part-attachments/data>
- [31] IRFP260NPbF Datasheet. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRFP260N-DataSheet-v01_01-EN.pdf.
- [32] IRHNA597260 Datasheet. <https://panatronic.co.jp/wp/wp-content/uploads/2022/06/irhna597260>
- [33] DSSK 50-015A Datasheet. <https://www.mouser.com/datasheet/2/205/L516-79724.pdf>.
- [34] Muhammad H Rashid. *Power electronics handbook*. Butterworth-heinemann, **2017**.