



**ALÇAK YÖRÜNGE UYDULARINDA ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMİ İÇİN
SIRALI ANAHTARLAMALI PARALEL REGÜLATÖR TASARIMI**

Esra BAŞKAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Esra BAŞKAYA

24/01/2024

ALÇAK YÖRÜNGE UYDULARINDA ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMİ İÇİN SIRALI ANAHTARLAMALI PARALEL REGÜLATÖR TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Esra BAŞKAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Bir uydu elektrik güç sisteminin ana barasının, gerilim tasarım kriterlerinde belirtilen standart gerilim seviyesini koruyarak çalışabilmesi için, baraya bağlanan bileşenlerin aynı gerilim seviyelerinde uyumlu bir şekilde çalışması beklenmektedir. Ancak uydu yaşam döngüsündeki olaylar (düşük/yüksek radyasyon, şarj/deşarj döngüleri, panel yaşlanması vb.) nedeniyle gerilim regülatörüne ihtiyaç duyulur. Bu gerilim regülatörü, bileşenler arasındaki güç akışını yönetir ve ana bara gerilimini kontrol eder. Bu regülasyon işlemi esas olarak bara geriliminin ölçümünden üretilen hata sinyaline göre şarj/deşarj veya akım şöntleme işlemlerinin koordine edilmesine dayanmaktadır. Akım şöntleme temel olarak güneş panellerinin ürettiği akım ile yükün ihtiyacı arasındaki fazla akımın toprağa şöntlenerek ortadan kaldırılması anlamına gelir. Uydu güneşe maruz kaldığında, özellikle güneş panelinin görev ömrünün başlangıcında, bir süre sonra güç sistemi yükün ihtiyacını karşılarken, akünün şarj kapasitesini aşar. Şönt modunda güneş paneli geriliminin sıfır olduğu durumda kısa devre akımı çekilir. Önerilen topolojinin bu modunda aküye, ana baraya veya toprağa güç iletilmez. Böylece güç güneş panelinde kalır, panelin sıcaklığı artar ve fazla güç uzaya salınır. Güneş paneli burada ısı dağıtıcı olarak kullanılır. Bu tez çalışmasında alçak yörünge uydu elektrik güç sistemi için doğrudan enerji aktarım yöntemlerinden olan sıralı anahtarlama paralel regülatöre dayalı bir güneş paneli regülasyon sistemi tasarlanmış ve benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda ilgili topolojiye ait alt bileşenler tanımlanmış ve gelişen panel teknolojileriyle birlikte gerekli hale gelen pasif akım sınırlama devresi tasarlanmıştır. Sistemde güneş panelinden kaynaklanan kaçak kapasitans etkisi bu akım sınırlama devresi ile bastırılmıştır. Uzay uygulamalarında hataları önlemek için az sayıda malzeme ile basit devreler yapmak avantajlı olduğundan S3R yöntemi kullanılmış, güvenilirliği arttırmak için çoğunluk oylama devresi kullanılmıştır. Benzetim çalışmaları sonuçlarına göre dinamik yük değişimlerinde dahi ana bara gerilim regülasyonunun korunduğu gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 90522

Anahtar Kelimeler : Güç Elektroniği, Güç Koşullandırma Ünitesi, Uzay Aracı Uygulamaları

Sayfa Adedi : 85

Danışman : Prof. Dr. Bünyamin TAMYÜREK

DESIGN OF A SEQUENTIAL SWITCHING SHUNT REGULATOR FOR ELECTRICAL POWER SYSTEM IN LOW EARTH ORBIT SATELLITES

(M. Sc. Thesis)

Esra BAŞKAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2024

ABSTRACT

In order for the main bus of a satellite electrical power system to operate by maintaining the standard voltage level specified in the voltage design criteria, the components connected to the bus are expected to work harmoniously at the same voltage levels. However, a voltage regulator is needed due to events in the satellite life cycle (low/high radiation, charge/discharge cycles, panel aging, etc.). This voltage regulator manages the power flow between components and controls the main bus voltage. This regulation process is essentially based on coordinating the charge/discharge or current shunting processes according to an error signal generated from the measurement of the bus voltage. Current shunting basically means removing the excess current between the current produced by the solar panels and the load's needs by shunting it to the ground. When the satellite is exposed to the sun, after a while the power system meets the needs of the load, it also exceeds the charging capacity of the battery, especially at the beginning of the solar panel's duty life. In shunt mode, short circuit current is drawn when the solar panel voltage is zero. In this mode of the proposed topology, no power is delivered to the battery, main bus or ground. Hence, the power remains in the solar panel, the temperature of the panel increases and the excess power is released into space. The solar panel is used as a thermal distributor here. In this thesis study, a solar panel regulation system based on sequential switching shunt regulator, which is a direct energy transfer method, was designed for the low orbit satellite electrical power system and simulation studies were carried out. In this context, subcomponents for the relevant topology have been introduced and a passive current limiting circuit, which has become necessary due to developing panel technologies, has been designed. The parasitic capacitance effect caused by the solar panel in the system is suppressed by this current limiting circuit. Since it is advantageous to make simple circuits with a small number of materials to prevent errors in space applications, the S3R method was used and a majority voting circuit is used to increase reliability. According to the results of simulation studies, it has been observed that the main bus voltage regulation is maintained even during dynamic load changes.

Science Code : 90522

Key Words : Power Electronics, Power Conditioning Unit, Spacecraft Applications,
S3R Topology

Page Number : 85

Supervisor : Prof. Dr. Bünyamin TAMYÜREK

TEŞEKKÜR

Öncelikle danışmanım Prof. Dr. Bünyamin TAMYÜREK'e yüksek lisans tezim boyunca sağladığı motivasyonu, önemli rehberliği ve sonsuz teşviki için en içten teşekkürlerimi sunarım. Onun değerli tecrübeleri ve teknik bilgileri bana hep yol gösterdi. Tez izleme sürecinde sabrı ve hoşgörüsü ile bana her konuda yardımcı olan çok kıymetli hocalarım Prof. Dr. Sedat SÜNTER'e ve Prof. Dr. Tuğba Selcen NAVRUZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim alabilmem ve ülkemizin en gözde savunma sanayii kuruluşlarından birinde çalışabilme özgürlüğüne sahip olabilmem Cumhuriyetimizin kıymetli değerleri ve kazanımlarıyla mümkün olmuştur. Tezimi Türkiye Cumhuriyeti'nin 100. yılına armağan ediyorum.

Tez çalışmalarım boyunca bana ilham ve motivasyon veren, sonrasında uygun çalışma koşulunu, bilgi ve tecrübe birikimini sağlayan, savunma sanayiimizin göz bebeği TUSAŞ'a teşekkürlerimi sunarım. Tez çıktılarımın ülkeme ve milletime faydalı olmasını diliyorum. TUSAŞ Uzay Sistemleri Donanım Mühendisliği Müdürü sayın Hüseyin ATİK'e verdiği desteklerden ötürü teşekkür ederim. Her ihtiyaç duyduğumda yardımına koşan, teknik desteklerini benden esirgemeyen sayın başmühendisim ve sanayi danışmanım Sinan KAYA'ya, teknik destekleri için Zafer ÇALIŞKAN ve Şamil TARKAY'a, Güç Elektroniği Donanım Tasarım ekibindeki gelmiş geçmiş tüm çalışma arkadaşlarıma destekleri, arkadaşlıkları ve keyifli çalışma ortamı için teşekkür ediyorum.

Beni yüksek lisansa başlamam için teşvik eden, bana her konuda yardımcı olan ve deneyimlerini benden esirgemeyen Dr. Eyyup DEMİRKUTLU'ya çok teşekkür ediyorum. Tez çalışmam boyunca bana moral, eğlence ve motivasyon aşılayan değerli arkadaşlarım Melike BULUT, Ömer BAĞCIGİL, Sıla CAN ve Seda BAKAN'a çok teşekkür ederim.

Son ve en önemli olarak tezim boyunca beni hiç yalnız bırakmayan, bana her konuda destek olan kıymetli eşim Aydın BAŞKAYA'ya, destekleri ve sabrı için çok teşekkür ederim. Beni yetiştirip bu günlere gelmemi ve eğitim alabilmem için her türlü imkânı sağlayan canım aileme, annem Emine BAŞBUĞA'ya, babam Ahmet BAŞBUĞA'ya, kız kardeşlerim Elif KOÇALAN'a ve Aleyna BAŞBUĞA'ya, yeğenim Rana KOÇALAN'a en derin teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca Zeynep BAŞKAYA'ya, Yalçın BAŞKAYA'ya ve İrem BAŞKAYA'ya da destekleri için çok teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. UYDULARDA ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMİ	7
2.1. Elektrik Güç Sistemi Bileşenleri	11
2.1.1. Güç üretimi.....	11
2.1.2. Güç depolama.....	12
2.1.3. Güç regülasyonu.....	12
2.1.4. Güç dağıtımı.....	13
2.1.5. Güç iletimi.....	13
2.2. Uydularda Ana Bara Güç Regülasyonu Teknikleri	13
2.2.1. MPPT	14
2.2.2. Doğrudan Enerji Transferi Metodu.....	17
2.2.3. Regülasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması ve Topoloji Seçimi	33
3. ANALİZLER.....	35
3.1. Ana Hata Yükseltici Parametrelerinin Hesaplanması.....	35
3.2. Histerezis Karşılaştırmacı Dirençlerinin Hesaplanması	40
4. S3R TASARIMI	43

	Sayfa
5. KAYIPLAR VE VERİM.....	55
6. BENZETİM ÇALIŞMALARI.....	63
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	79
KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	85



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Uzay Bütçeleri Dünya’da ilk 5 Ülke/Ajans 2019	1
Çizelge 1.2. Dünya’da önemli uzay keşifleri	2
Çizelge 3.1. Sistem gereksinimleri	36
Çizelge 5.1 Mosfet teknik özellikleri	58
Çizelge 5.2. Kayıp güç çizelgesi	61
Çizelge 5.3. Her bir S3R çalışma modunun kayıpları	62
Çizelge 5.4. Farklı çalışma modları için güç kayıpları	62
Çizelge 6.1. Yüklerin hesaplanması	64
Çizelge 6.2. Hesaplama ve benzetimlerde ölçüm değerleri karşılaştırılması	65
Çizelge 6.3. Katmanların çalışma modları	66
Çizelge 6.4. S3R hücrelerinde güç paylaşımı	67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Türkiye Milli Uzay Programı uydu geliştirme yol haritası	3
Şekil 2.1. Uydu sistemleri ve sınıflandırması	7
Şekil 2.2. Güneş panelinin yörünge bazlı sıcaklık değişimleri a) LEO, b) GEO	9
Şekil 2.3. Elektrik güç sistemi bileşenleri.....	11
Şekil 2.4. Ana bara regülasyon teknikleri.....	14
Şekil 2.5. MPPT mimarisi.....	15
Şekil 2.6. Güneş paneli I-V ve P-V eğrileri	16
Şekil 2.7. Artımsal iletkenlik algoritması prensibi	17
Şekil 2.8. Doğrudan enerji transferi mimarisi tam regüle bara yapısı	19
Şekil 2.9. Doğrudan enerji transferi mimarisi tam regüle olmayan bara yapısı	20
Şekil 2.10. Bir S3R hücresinin basit devre yapısı.....	22
Şekil 2.11. Güç regülasyonu devresinin blok diyagramı	23
Şekil 2.12. S3R topolojisinde histerezis kontrolcü döngüsü.....	24
Şekil 2.13. Parazitik bileşen ve akım limitleme içeren blok diyagram.....	28
Şekil 2.14. S4R devresi blok diyagramı.....	31
Şekil 3.1. Eviren histerezis karşılaştırıcı.....	40
Şekil 3.2. Histerezis karşılaştırıcı direnç konfigürasyonları	41
Şekil 4.1. Ana bara güç regülasyon sisteminin bloklar halindeki tasarımı	44
Şekil 4.2. Bir S3R bloğunun şematik tasarımı	45
Şekil 4.3. Güneş panelinin modellenmesi.....	46
Şekil 4.4. S3R hücresi şematik gösterimi	47
Şekil 4.5. Akım sınırlandırma devresi şematik gösterimi.....	48
Şekil 4.6. Sürücü devresi şematik gösterimi.....	49

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7. Ana hata yükseltici devresi şematik gösterimi	50
Şekil 4.8. Histerezis kontrolcü devresi şematik gösterimi.....	51
Şekil 4.9. Çoğunluk oylaması devresi şematik gösterimi	53
Şekil 4.10. Çoğunluk oylaması devresi benzetim gösterimi.....	54
Şekil 5.1. SEE hatalarının sınıflandırılması	55
Şekil 5.2. SET hatası.....	56
Şekil 5.3 Güç mosfeti SEB hatası	57
Şekil 5.4. AE526PGA serisi gaz yayılımı yapmayan güç endüktörleri.....	61
Şekil 6.1. Yük değişimlerinin benzetim programında gösterilmesi.....	64
Şekil 6.2. Yük değişimlerine ana bara geriliminin dinamik tepkisi.....	65
Şekil 6.3. Değişken yüke karşı akımın tepkisi.....	66
Şekil 6.4. Ana hata yükseltici sinyalleri.....	67
Şekil 6.5. Referans sinyallerine karşılık gelen hata sinyalleri	68
Şekil 6.6. İlk katmandaki mosfet'in anahtarlama sinyali grafiği	69
Şekil 6.7. İkinci katmandaki mosfet'in anahtarlama sinyali grafiği	69
Şekil 6.8. Üçüncü katmandaki mosfet'in anahtarlama sinyali grafiği	70
Şekil 6.9. Dördüncü katmandaki mosfet'in anahtarlama sinyali grafiği	71
Şekil 6.10. Beşinci katmandaki mosfet'in anahtarlama sinyali grafiği	71
Şekil 6.11. Akım sınırlanmadan önce mosfet üzerinden geçen akım	72
Şekil 6.12. $L=6.5 \mu H$ iken endüktör akımı	73
Şekil 6.13. $L=13 \mu H$ iken endüktör akımı	73
Şekil 6.14. $L=16 \mu H$ iken endüktör akımı	74
Şekil 6.15. $L=22 \mu H$ iken endüktör akımı	74
Şekil 6.16. $L=25 \mu H$ iken endüktör akımı	75

Şekil	Sayfa
Şekil 6.17. Mosfet üzerinden geçen akım.....	76
Şekil 6.18. Mosfet ve endüktör üzerinden geçen akımının yakından gösterimi.....	76
Şekil 6.19. MEA1 4V, MEA2 4V, MEA3 4V iken çıkış sinyali.....	77
Şekil 6.20. MEA1 9V, MEA2 4V, MEA3 4V iken çıkış sinyali.....	78
Şekil 6.21. MEA1 9V, MEA2 9V, MEA3 4V iken çıkış sinyali.....	78



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A	Amper
F	Farad
H	Henry
J	Joule
kHz	Kilohertz
km	Kilometre
ns	Nanosaniye
s	Saniye
V	Volt
W	Watt
Ω	Ohm

Kısaltmalar

Açıklamalar

AHY	Ana Hata Yükseltici
BDR	Batarya Deşarj Regülatörü
BHY	Batarya Hata Yükseltici
BOL	Ömür Başlangıcı
BŞR	Batarya Şarj Regülatörü
DET	Doğrudan Enerji Transferi
EGS	Elektrik Güç Sistemi
EMK	Elektromotor Kuvveti
ESA	Avrupa Uzay Ajansı
FV	Fotovoltaik
GaAs	Galyum Arsenik
GEO	Jeosenkron Yörünge

Kısaltmalar**Açıklamalar****GSYH**

Gayrisafi Yurt İçi Hasıla

GTO

Jeostatik Transfer Yörüngesi

LEO

Alçak Dünya Yörüngesi

MEA

Ana Hata Yükseltici

MEO

Orta Dünya Yörüngesi

MPPT

Maksimum Güç Noktası İzleme

NASA

Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi

PI

Oransal-İntegral

PPT

Güç Noktası Takibi

PWM

Darbe Genişlik Modülasyonu

SEB

Tekil Olay Yanması

SEE

Tekil Olay Etkisi

SEGR

Tekil Olay Kapı Yırtılması

SEL

Tekil Olay Parazitik Kısa Devre

SET

Tekil Olay Anlık Değişimi

SSO

Güneş Senkron Yörünge

S3R

Sıralı Anahtarlama Paralel Regülatör

S4R

Sıralı Anahtarlama Paralel Seri Regülatör

TUA

Türkiye Uzay Ajansı

1. GİRİŞ

Uzayın sırlarını anlama merakı, İkinci Dünya Savaşı sonrası ülkeler arasındaki uzay yarışı ve bu gelişmelere paralel olarak sürekli gelişen teknolojiler insanlığın geçtiğimiz yüzyılda uzayla tanışmasına imkân sağlamıştır. Askeri, haberleşme, görüntüleme, tarım vb. konularda farklı görevleri yerine getiren yüzlerce uydu günümüzde Dünya yörüngesinde dolaşmaktadır. Ülkeler açısından çok kritik bir öneme sahip olan bu uzayda yer alma ve söz sahibi olma yarışı, ülkelerin ilgili kurum kuruluşları vasıtasıyla stratejiler üretmesine ve bunları hayata geçirmesine neden olmuştur. Birçok ülkede bu stratejiler kapsamında yapılan hukuki düzenlemeler ve teşvikler sayesinde kamu ve özel sektör uzay ekosistemine dahil edilerek desteklenmektedir. Uzay alanındaki çalışmalar yalnızca ülkelerin itibar yarışına hizmet etmekle kalmayıp aynı zamanda robotik ve algılama sistemlerinden kuantum teknolojisine, uydu ve uyduya dayalı konumlama teknolojilerinden nükleer çalışmalara varan ve bunlarla sınırlı kalmayan birçok alanda teknolojik gelişmelerin ve yeniliklerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Dünyada uzay alanındaki gelişmeler

2020 sonunda 424 milyar dolar seviyelerinde gerçekleşen bir küresel uzay ekonomisi bulunmaktadır [1]. Güncel durumda Türkiye de dahil yetmişten fazla ülkede uzay ajansı bulunmakta olup, uzay ekosistemi oluşturulması ve çalışmaların finansmanı gibi konularda stratejiler bu ajanslar vasıtasıyla üretilmektedir. 2019 verilerine göre uzay alanına en çok bütçeyi ayıran beş ülke ve ajans isimleri ile ilgili bütçelerin dağılımları Çizelge 1.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. Uzay Bütçeleri Dünya’da ilk 5 Ülke/Ajans 2019 [1]

Ülke veya Ajans	Sivil Alan (M \$)	Toplam (M \$)	GSYH (%)
ABD	22,5	43,4	0,21
Çin	3,7	6	0,04
ESA (Avrupa Uzay Ajansı)	5,1	5,1	-
Rusya	1,8	3,4	0,2
Fransa	2,7	3,3	0,12

Uzay alanında yapılan bu yatırımların alt kırınımlarına bakıldığında ise başlıklar; fırlatma, uzaktan algılama, konumlama, keşif ve insanlı görevler, haberleşme ve güvenlik konuları olarak dağılım göstermektedir. Dünya’da uzay alanında yapılan önemli keşifler ve ilklerle ilgili bir tablo Çizelge 1.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.2. Dünya’da önemli uzay keşifleri [1]

Program	Ülke	Yıl	Açıklama
Sputnik-1	SSCB	1957	Alçak yörüngeye yerleşen ilk uydu
Vostok 3KA	SSCB	1961	Uzayda insanlı ilk görev
Luna-9	SSCB	1966	Ay’a ilk iniş
Apollo-11	ABD	1969	Ay’a ilk insanlı iniş
Mars-2	SSCB	1971	Mars’a ilk iniş
Landsat-1	ABD	1972	İlk görüntüleme uydusu
Hubble Teleskobu	ABD	1990	Gök cisimlerinin keşfi
Uluslararası Uzay İstasyonu-ISS	-	1998	En büyük insan yapımı uzay cismi (420 ton)
Perseverance	ABD	2020	Mars’tan numune alınması
Chang’e 5	Çin	2020	Ay’dan numune alma

Türkiye’de uzay alanındaki gelişmeler

Türkiye’deki uzay ekosistemine bakıldığında; uydu işletici ve veri son kullanıcıları, Ar-Ge kurumları, üretim ve eğitim kuruluşları ile destekleyen kurumlar başlıca aktörler olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle son 30 yıl içinde uydu çalışmaları alanında kritik öneme sahip gelişmeler kaydedilmiş olup, değerli bir teknoloji tecrübesi oluşmaktadır. 1994 yılında TÜRKSAT 1B haberleşme uydusu ile uzay faaliyetlerinde ilk önemli kilometre taşı geçilmiş olup, Türkiye’deki geçmiş ve gelecekteki uydu projelerine ait bilgiler Şekil 1.1’de verilmiştir. Yapılan bu projelerden ülkenin başlıca kazanımları şu başlıklar altında özetlenebilir:

- Veri iletişim ve haberleşme altyapısındaki kritik unsur olan uyduların yerleştirilmesi ve tecrübe kazanımı

- Uzay ekosisteminin önemli oyuncularından olan TUSAŞ ve TÜBİTAK UZAY'da kritik öneme sahip yer istasyonu, üretim laboratuvarı, test merkezi, ekipman yapma yetkinliği ile yetişmiş uzman insan kaynağı kazanımı
- Uydu alt bileşenlerinin yerli olarak geliştirilmesi ve uzay uçuş tarihçesi kazandırılması
- Fırlatma teknolojisi alanında; alçak yörünge uydusu fırlatma tecrübesi ve dış bağımlılığın azaltılması



Şekil 1.1. Türkiye Milli Uzay Programı uydu geliştirme yol haritası [1]

Tezin motivasyonu

Ülkemizin uzay yolculuğunda elde edilen kritik kazanımlarının yanı sıra yakın gelecekte ülkenin uzay teknolojilerindeki strateji ve hedeflerini ortaya koyan bazı önemli gelişmeler olmuştur. Bu kapsamda 13 Aralık 2018 tarih ve 30624 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi ile “Türkiye Uzay Ajansı (TUA)” kurulmuştur. Buna göre ajansın misyonu ülkenin uzay konusundaki insan gücünü ve ekosistemini geliştirmek, ulusal ve uluslararası iş birlikleri ile ülkenin uzay stratejisini etkin, güvenilir ve sürdürülebilir şekilde gerçekleştirmek olarak belirtilmiştir. TUA’nın kurulmasını izleyen dönemde 24 Mayıs 2022 tarih ve 31845 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Cumhurbaşkanlığı Genelgesi ve 11. Kalkınma Planı (2019-2023) bileşkesinde “Milli Uzay Strateji Belgesi (2022-2030)” yayımlanmıştır. İlgili strateji belgesinde “Milli Uzay Programı” yol haritası ilan edilmiştir. Bu program kapsamında, önümüzdeki 10 yılda ulaşılması planlanan ve ilan edilen 10 stratejik hedef aşağıdaki başlıklarda tanımlanmıştır [2].

- Ay görevi
- Uydu üretiminin tek çatı altına toplanması ve yerli uydu geliştirme programı
- Bölgesel konumlama ve zamanlama sistemi
- Uzaya erişim ve uzay limanı
- Uzay havasına ilişkin teknolojik araştırmalar
- Uzay nesnelerinin yerden gözlemi ve takibi
- Uzay sanayi ekosisteminin geliştirilmesi
- Uzay teknolojileri geliştirme bölgesi
- Uzay farkındalığı ve insan kaynağının geliştirilmesi
- Türk astronot ve bilim misyonu

Güncel durumda 1 Kasım 2023 tarih ve 32356 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan, 2024-2028 yılları arası dönemi kapsayan “12. Kalkınma Planı” belgesi de incelendiğinde ülkemizin yakın gelecekte uzay ve alçak yörünge uydu teknolojilerinde millilik ve yerlilik hedefleri belirlediği görülmektedir.

Sonuç olarak, buraya kadar belirtilen bulgular dikkate alındığında ülkemizin uzay teknolojileri alanında olgunlaştırdığı bilgi birikimi ve vizyonu ile yakın gelecek için değerli stratejik hedefler ortaya koyduğu anlaşılmaktadır. Türkiye'nin günümüze uzanan başarılarla dolu yakın geçmişiyle geleceğe yol gösteren yerli uydu geliştirme yolculuğu ve Milli Uzay Programı doğrultusundaki yerli uydu geliştirme programı hedefleri, bu tezin ana motivasyonunu oluşturmaktadır.

Problem tanımı ve tezin amacı

Uydularda elektrik güç sistemi tasarımında kullanılacak mimarinin seçim kriterlerini toplam ağırlık, verim, maliyet ve göreve özel detaylar belirler. MPPT mimarisi, ışık akısı ve panel sıcaklık değişim aralığı çok geniş olan uydu görevleri için caziptir. DET/Regüle Olmayan mimariler özellikle uydu yaşam döngüsünde ışımanın karanlık evreden çok daha uzun sürdüğü görevler için tercih edilir.

Öte yandan DET/Tam Regüle mimarilerde fazladan batarya deşarj regülatörü bulunmasına rağmen bu durum, yük tarafında kompleksliği ve sayısı azaltılan dönüştürücü sayısı ile kompanse edilir. Sabit ana bara gerilimi rejiminde batarya grubunun ekonomikliği de artar. Bu mimariler sıkı regülasyon gerektiren yük içeren uygulamalarda kullanılmakta olup, daha basit, hafif ve verimli yük dönüştürücüleri içermektedir. Bu mimarilerin hibrit şekilde kullanıldığı topolojiler de literatürde mevcuttur [3-4]. Tam regüle bara sisteminde bara gerilimi sabit olduğundan, yükleri besleyen dönüştürücü ağırlıkları da daha düşüktür. Tam regüle bara sistemi basit tasarım yapısı, yörünge işlev esnekliği, ağırlık ve maliyet avantajları nedeniyle bu tez kapsamında tercih edilmiştir.

Bu tezin amacı uydularda büyük bir problem haline gelen ana baranın regülasyonunun sağlanması, ana baranın sabit gerilim seviyesinin korunması, yüklerin doğru güçlerle beslenebilmesi, fotovoltaiik panellerden üretilen düzensiz güç ile tüketilecek gücün dengesinin sağlanabilmesidir. Ayrıca uyduların güç kapasitesi, yeni nesil uydularda artmakta olan daha büyük güç kapasitesi talebi ve faydalı yükün daha yüksek performans gereksinimleri nedeniyle artmaktadır. Uydularda birincil güç kaynağı olarak fotovoltaiik paneller kullanıldığı için, çıkış gerilimi ve akımı güneş paneli parametrelerine (sıcaklık, güneş açısı, bozulma vb.) bağlı olarak önemli ölçüde değişir. Bu nedenle, sistem ana bara gerilimini izin verilen gerilim aralığında tutmak için ana baranın regülasyonunun sağlanması

gereklidir [3]. Bu tez kapsamında uydu elektrik güç sistemi açısından kritik bir öneme sahip olan ve güneş panelinde üretilen ihtiyaç fazlası gücün DET mimarisine dayalı anahtarlama şönt regülatörler tarafından kontrol edildiği özelleşmiş bir devre tasarımı yapılacaktır.

Yukarıda bahsedilen amaçla yapılan literatür taramaları ve bulguları ışığında, alçak yörünge uydularında doğrudan enerji transferi metoduna dayanan EGS sisteminde şönt regülatör devresinin tasarımı ve analizi yapılacaktır. Tezin ilerleyen kısımlarından Bölüm 2’de uydularda güç sistemi üzerine yapılmış literatür araştırması, uydu EGS güç regülasyon yöntemleri ve DET mimarilerindeki şönt regülatör yapıları hakkında bilgiler ve karşılaştırmalar verilecek olup, uygun regülatör yapısının seçimi yapılacaktır, Bölüm 3’te seçilen şönt regülatör için analiz çalışması yapılacaktır, Bölüm 4’te analizleri yapılan regülatör yapısı için tasarım çalışması yapılacaktır. Bölüm 5’te tasarlanan devrenin değişik yük koşullarında kayıpları hesaplanacak ve sistemin verimi incelenecektir. Bölüm 6’da benzetim çalışmaları çıktılarıyla birlikte verilecektir, Bölüm 7’de ise elde edilen sonuçlar paylaşarak irdelenecek ve tez çalışması sonlandırılacaktır.

Uydular Dünya çevresinde bulundukları yörünge mesafelerine göre de gruplandırılır. Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency) tanımlamalarına göre bu yörüngeler aşağıdaki gibidir [5]:

- LEO, bu yörünge dünya etrafındaki 160-1000 km mesafeyi
- GEO, bu yörünge 35786 km mesafeyi
- MEO, (bu yörünge LEO ve GEO arasındaki mesafeyi
- SSO, bu yörünge kutuplardan geçen ve 200-1000 km mesafeyi
- GTO, bu yörünge herhangi iki yörünge arası geçişteki mesafeyi kapsamaktadır.

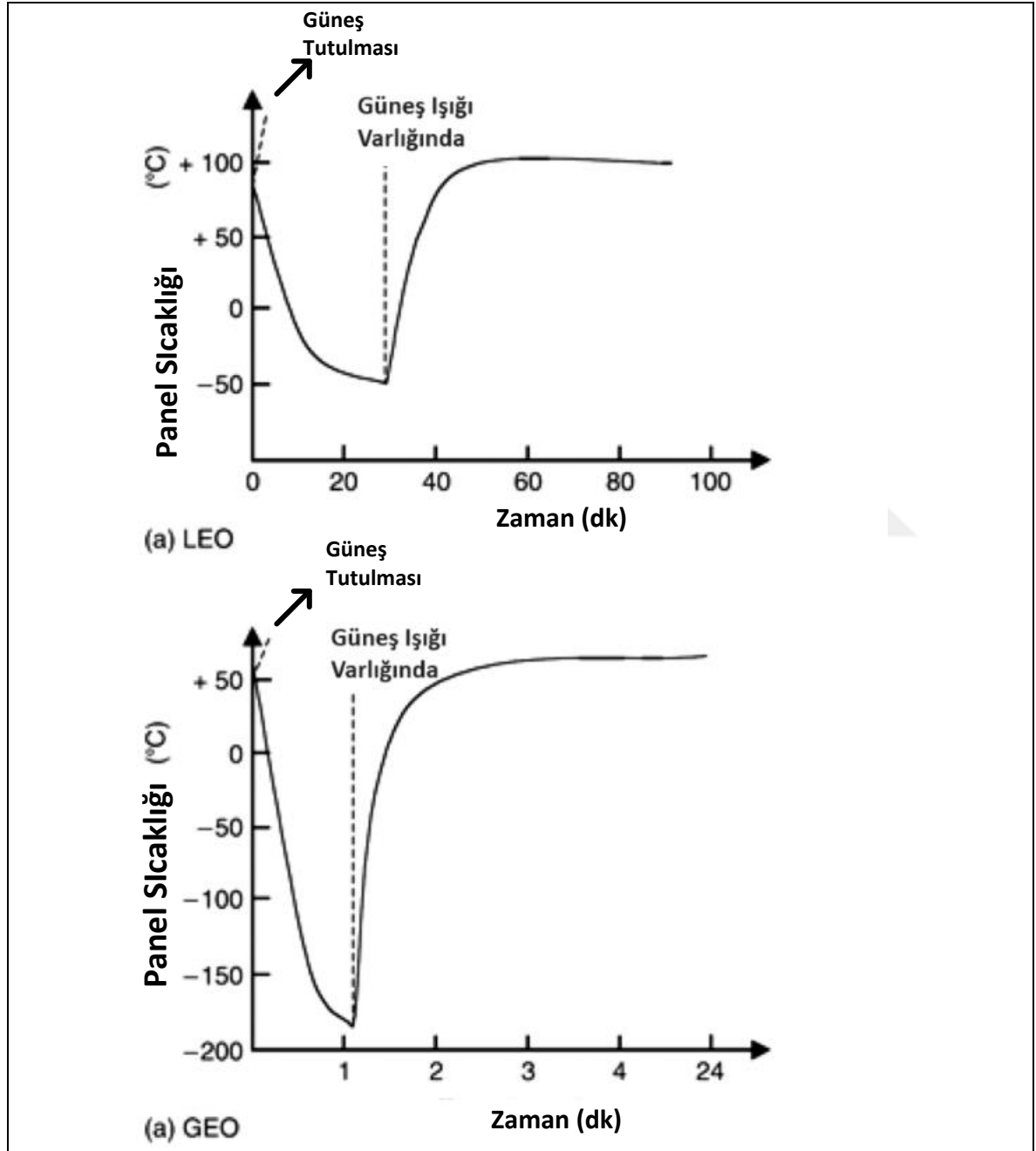
Uzayda tek harici enerji kaynağı güneş radyasyonu olup, bu enerji kaynağını kullanmayan uydular beraberlerinde enerji kaynağını taşımak zorundadır. Bu enerji kaynaklarına örnek olarak; birincil piller, yakıt hücreleri, nükleer ve kimyasal yakıtlar gösterilebilir. Uzay endüstrisindeki çığır açıcı teknolojik gelişmelerden biri fotovoltaiik hücrelerinin Dünya yörüngesindeki uydularda kullanılmasıdır. Güncel durumda, yüksek güçlü haberleşme uydularında en çok kullanılan elektriksel güç kaynağı fotovoltaiik hücrelerdir [3, 6]. Bu tez çalışmasında incelenecek uydu elektrik güç sistemi (Elektrik güç sistemi- EGS) enerji kaynağı olarak güneş pili hücrelerine dayanan tipte enerji kaynağı seçilmiştir.

Uydu güneş ışınlarını alamadığında, güneş tutulması zamanlarında, güneş paneli dizileri yeterli gücü sağlayamayacak kapasitedeyken veya yük talebi aşırı arttığında tam kapasiteli çalışma için şarj edilebilir bataryalar deşarj edilerek alternatif enerji kaynağı olarak kullanılır. Batarya grubu, batarya şarj regülatörü (BŞR) aracılığıyla şarj edilir. Bataryanın boşalması sırasında şarj modülünün çalışmasına izin verilmez.

Batarya deşarj modülü sayısı baranın tepe gücü ve yedeklilik yaklaşımına göre belirlenir. Bataryanın deşarj olduğu durumlarda kullanılan enerjinin yeniden üretilmesi gerekmektedir. Bu yüzden güneş paneli seçilirken anma güç değerlerini düşürme payı koşulları da göz önünde bulundurularak güneş paneli çıkış gücü alçak yörünge uyduları için güç ihtiyacının 2.2 katını karşılayabilecek şekilde seçilmelidir [6].

Çevresel faktörler güneş panellerinin ömrünü ve performansını belirler. Bu yüzden güneş paneli boyutlandırılırken tahmini görev sonu ömrü (End of Life-EOL) parametrelerine

göre seçim yapılmalıdır. Tutulma süreleri, batarya şarj deşarj süreleri, güneş panelinin ömrünü belirleyen parametrelerdendir. Güneş paneli boyutları ve bataryalarda derin deşarj durumunun periyodu en kötü durum analizleriyle belirlenebilir. Güneş panelleri uzayda doğrudan güneş ışığına veya doğrudan uzayın aşırı soğuk bölgesine maruz kaldığı için geniş sıcaklık salınımları söz konusudur [6].



Şekil 2.2. Güneş panelinin yörünge bazlı sıcaklık değişimleri a) LEO, b) GEO [3]

Güneş panellerinin uzaya yakın bir ortamda test edilmesinin zorluklarından dolayı çoğu herhangi bir işlevselliği olmayan kütle ve yer simülasyonunu gerçekleyen kukla modüllerle oluşturulmuş mühendislik modeli ekipman üzerinde test edilir. Uçuş modeli kartlar üzerinde kalifiye ve test edilmiş maliyeti fazlasıyla yüksek malzemeler olmasından dolayı çoğu çevresel ve işlevsel test mühendislik modeli ekipman üzerinde gerçekleştirilir. Böylelikle aynı zamanda uçuş modeli ekipmanın test koşulları altında tahrip edilmesinin önüne de geçilmiş olur.

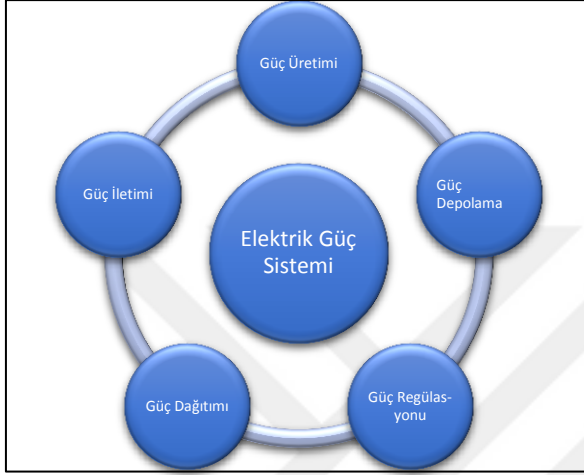
İlk uydularda güç gereksinimleri birkaç watt mertebesinde iken günümüz modern haberleşme uyduları için onlarca kilowatt mertebesine ulaşmıştır. Bazı askeri amaçlı uydularda güç gereksinimleri yüzlerce kilowatt'a ulaşmıştır. Uydu ana bara gerilimleri, birkaç yüz watt güç talebi olan ilk nesil uydularda 28 V seviyesinde olmuştur. Bu seviyenin belirlenmesinde zamanın hâkim havacılık teknolojilerinin etkisi olmuştur. Modern uydularda artan güç ihtiyaçlarıyla beraber bara akımlarını makul bir seviyede tutmak adına bara gerilim seviyeleri de artış göstermiştir. Günümüzdeki uydu uygulamalarında 28 V, 50V, 70 V, 100 V, 120 V ve 160 V seviyeleri ana bara gerilimleri için standardize olmuştur. Bu standart seviyelerin oluşmasında farklı ekipman üreticilerinin ve son kullanıcı tercihlerinin ortaklaşması etkili olmuştur [3].

Uydu teknolojisi, haberleşme, gözlem, navigasyon gibi bilimsel çalışmalarda önemli bir rol oynar. Uyduda bulunan bütün sistemlerin enerji ihtiyaçlarının karşılanması, uzun yıllar hata yapmadan çalışması ve uyduların görevlerini başarıyla yerine getirebilmeleri için elektrik güç sistemi tasarımı kritik bir öneme sahiptir. Daha verimli güneş panelleri, gelişmiş batarya teknolojileri ve yenilenen ve geliştirilen güç regülasyon sistemleri gibi yenilikler, uyduların görevlerini daha etkili bir şekilde yerine getirmesine yardımcı olmaktadır.

Uzay uygulamalarında üretilecek gücün miktarı, bu gücün yönetimi ve dağıtımı EGS tasarımında önemli rol oynar. Uydu güç sisteminde, uydunun görev ömrü boyunca faydalı yükleri besleyebilmesi için yeterli miktarda ve uygun güç kalitesinde elektriksel güç üretilmelidir. Uydunun elektriksel güç sistemi operasyonu sırasında diğer yüklerin ve alt sistemlerin çalışmasını ve güç kalitesini etkilememeli, aynı zamanda kendisi de etkilenmemelidir. EGS tasarımında sistemin güç ihtiyacı belirlenirken alt sistemlerin ve yüklerin en kötü durumdaki tüketimi dikkate alınır [6].

2.1. Elektrik Güç Sistemi Bileşenleri

Elektrik Güç Sistemlerinin temel görevi, uydu alt sistemleri ve yükleri arasında verimli bir şekilde enerjinin sağlanması, üretilmesi, depolanması, düzenlenmesi ve dağıtılmasıdır. Şekil 2.3 uydularda işlevsel yönden elektrik güç sistemi bileşenlerini göstermektedir.



Şekil 2.3. Elektrik güç sistemi bileşenleri

2.1.1. Güç üretimi

Uydularda elektrik gücü, genellikle güneş panelleri veya farklı güneş hücreleri kullanılarak üretilir. Güneş ışığından gelen enerji, güneş panelleri tarafından yakalanır ve doğru akıma dönüştürülür. Uydunun yüzeyine monte edilirler veya kanatlı bir yapı kullanılarak uyduya entegre edilebilirler. Bu paneller, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürürler ve genellikle silikon veya GaAs fotovoltaiik hücrelerden oluşur. Silikon ve GaAs tabanlı güneş panellerinden ilerleyen bölümlerde daha detaylı bahsedilecektir.

Güneş enerjisinin dönüştürülmesinden ve uyduya elektrik enerjisi sağlanmasından sorumlu birincil güç kaynağı olarak güneş dizileri kullanılmaktadır. Yük ihtiyacı güneş panellerinden üretilen güçten fazla olduğunda veya güneş tutulması zamanlarında ikincil enerji kaynağı olarak bataryalar kullanılır.

Uzayda kullanılan güneş panelleri ile geliştirilen uydu ekipmanları birbirinden farklı değerlendirilir. Çünkü ikisinin maruz kaldığı ortam güneş panelinin uydunun dışında yer

almasından dolayı farklıdır. Uydu ekipmanlarının dışında mekanikler ve uydu içinde ısıtıcılar, kaplamalar vardır ancak güneş panelleri doğrudan güneşe veya aşırı soğuğa maruz kalır [6]. Sonuç olarak uzay ortamında çalışacak güneş panellerinin bu zorlu çevresel koşullarda çalışması beklenir.

2.1.2. Güç depolama

Elektrik enerjisi, kullanılmadığı zamanlarda depolanmalıdır. Bu amaçla, uydularda genellikle lityum iyon piller gibi şarj edilebilir bataryalar kullanılır. Bu piller, güneş panellerinden elde edilen enerjiyi uydudaki yüklerin beslenebildiği ve uydunun güneş görebildiği zamanlarda depolar ve güneş tutulması sırasında veya uydunun güneş görmediği zamanlarda depolanan bu enerji kullanılarak alt sistemlerin beslenmesi sağlanır. Bataryalar aynı zamanda uydunun ikincil enerji kaynağıdır.

2.1.3. Güç regülasyonu

Uyduların güç kapasitesi, daha büyük kapasite talebi ve faydalı yükün daha yüksek performans gereksinimleri nedeniyle artmaktadır. Uyduların güç kaynağı, çıkış gerilimi ve akımı güneş paneli parametrelerine (sıcaklık, güneş açısı, bozulma vb.) bağlı olarak önemli ölçüde değişen fotovoltaiik panellerdir. Bu nedenle, sistemin ana bara gerilimini izin verilen gerilim aralığında tutmak için bazı regülatörlerin sağlanması gerekir [7].

Regülasyon ünitesi, güneş panellerinden veya bataryalardan gelen enerjiyi uydunun güç ihtiyaçlarına, bataryanın şarj deşarj durumuna ve uydunun güneş görmesi gibi parametrelere göre düzenler. Bu, enerjinin uygun gerilim ve akımda olmasını sağlar ve uydu alt sistemlerine dağıtılacak gücün dengesini sağlayan birimdir.

Uydulardaki güç akışının kontrol edilmesi, üretilen güç ile tüketilen gücün dengelenmesi, ana baranın gerilim regülasyonunun sağlanması bu blokla sağlanır. Kaynaktan çekilen akımdan ve yüklerin ihtiyacından bağımsız olarak ana baranın gerilimini önceden ayarlanan bir aralıkta sabit tuttuğu için regülasyon ünitesi elektrik güç sisteminin beynidir. Uydunun görev ömrü boyunca sağlanan bu regülasyon korunmalıdır [8].

Güç regülasyon ünitesi, güneş panelleri ile batarya arasına bir arayüz sağlar. Batarya gerilimi hücreler şarj olduğunda artar, deşarj olduğunda azalır. Güç regülasyon ünitesi güneş tutulması sırasında bataryanın deşarj olarak yükleri beslenmesinin kontrolünde rol oynar. GEO uyduları için tasarlanan batarya sistemlerinde genellikle şarj kapasitesi deşarj kapasitesinden daha düşüktür. Bu nedenle batarya şarj ve deşarj regülatörlerinin gereksinimlere ve ihtiyaca göre ayrı ayrı tasarlanması avantajlıdır. Düşük yörüngeli uydularda ise şarj ve deşarj ihtiyaçları ölçeklenebilir olduğundan çift yönlü tek bir tasarım yapılabilir [3].

2.1.4. Güç dağıtımı

Güneş panellerinde üretildikten sonra regülasyonu sağlanan gücün uydunun alt bileşenlerine ve yüklere iletilmesini sağlar. Güç dağıtım ünitesinde hem yükleri hem de yüklerden güç sistemini hata durumuna karşı korumak için sigortalar ve akım sınırlama devreleri kullanılır.

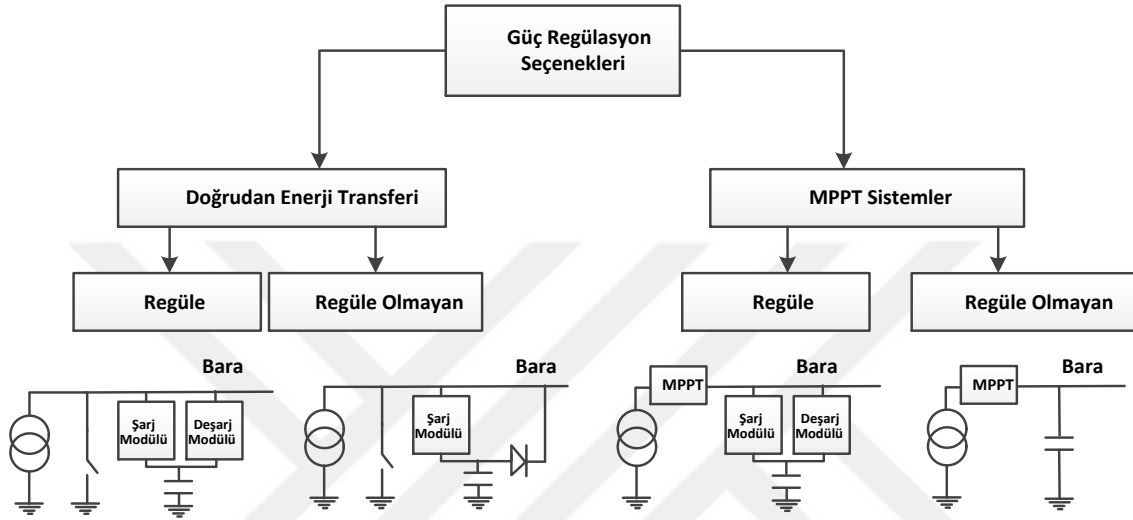
2.1.5. Güç iletimi

Uydunun farklı bileşenleri ve alt sistemleri arasında güç iletiminin sağlanması için özel tasarlanmış kablajlar kullanılır. Elektrik enerjisinin paneller, bataryalar, güç kontrol birimleri ve güç dağıtım birimleri ve diğer sistemler arasında taşınabilmesini sağlamak için kablaj tasarımları yapılır.

2.2. Uydularda Ana Bara Güç Regülasyonu Teknikleri

Devre yapısı açısından, güneş dizisinin güç düzenleme teknikleri, doğrudan enerji transferi ve MPPT Sistemler olarak ikiye ayrılabilir. Doğrudan enerji transferi yönteminin en büyük avantajı daha az malzeme kullanılması buna bağlı olarak daha düşük maliyet sağlaması ve hata yapma olasılığının azalmasıdır. Enerji atımı yapmayan bir sistem olarak da adlandırılan MPPT sistemi, yalnızca güneş panelinin maksimum güç noktasında gerekli yük gücünü çekerek regülasyonu sağlar [9]. Bu teknikte ana baraya seri olarak bir güç dönüştürücü bağlı olduğu için MPPT aynı zamanda seri regülasyon tekniği olarak da geçer ve yüksek güçlü uygulamalarda sistemin verimliliği düşebilir. Doğrudan enerji transferi ise paralel regülasyon tekniği olarak bilinir. Bu tez kapsamında seri regülasyonda MPPT

tekniki, paralel regülasyonda ise S3R ve S4R ayrıntılı olarak incelenecektir. Paralel regülasyon, uzay uçuşu görevlerinin çoğu tarafından tercih edilir. Uzay uygulamalarında kullanılacak şönt regülatör tasarımı yaparken şönt yöntemi yük özelliklerine göre seçilmeli ve tasarlanmalıdır [10]. Şekil 2.4'te regüle ve regüle olmayan baralar için regülasyon teknikleri gösterilmiştir.



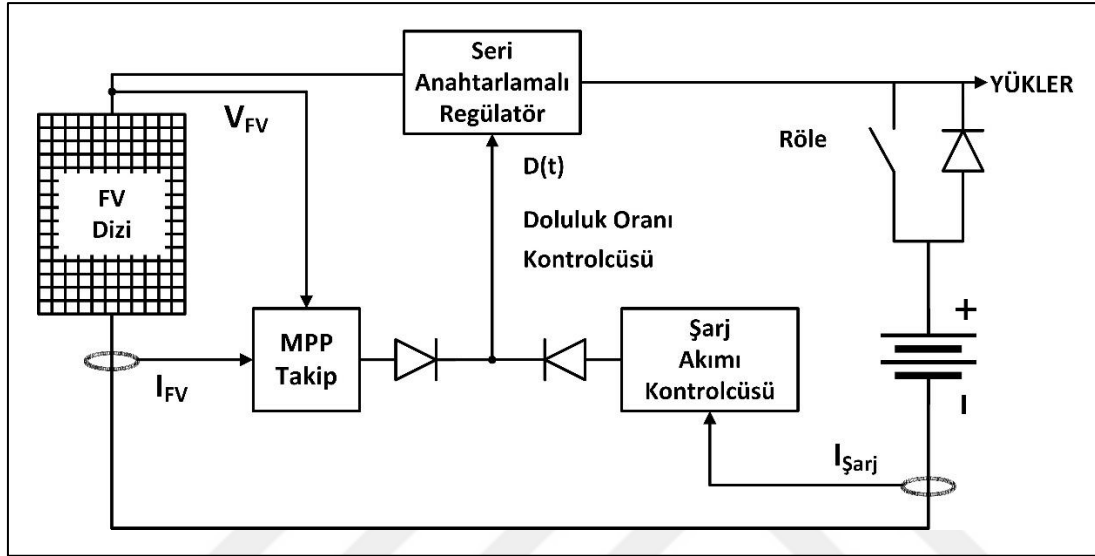
Şekil 2.4. Ana bara regülasyon teknikleri [9]

2.2.1. MPPT

Güneş panelleri, ışığa maruz kaldıklarında belirli bir değerde güç üretirler ve bu güç, farklı ışık koşulları altında değişebilir. MPPT teknolojisi, güneş panellerinden alınan enerjiyi maksimum verimde kullanabilmek için geliştirilmiş bir kontrol tekniğidir.

DET mimarisine alternatif olan MPPT mimarisinde ise uydu güneş panelleri çıkışında maksimum gücü verecek şekilde regüle edildiği bir bara yapısına dayanır. Bu regülasyon, bir maksimum güç noktası izleyici ve anahtarlamalı bir regülatör yapısıyla mümkün olur. Maksimum güç noktası izleyici değiştir-gözle, artımsal iletkenlik vb. bir algoritma ile panelin akım ve gerilimlerini izleyerek, paneli maksimum güç çıkışı olan gerilim seviyesinde çalıştırır. Anahtarlamalı regülatör ise ayarlanan bu maksimum güç noktası gerilimini yük ihtiyacı gerilim seviyesine çevirir. Bu mimaride şönt devresi ve batarya şarj regülatörü kullanımı gerekmez. Maksimum güç noktası izleme sadece bataryanın şarj ihtiyacı olduğunda veya yük talebi güneş paneli çıkışından büyük olduğunda aktiftir. Batarya rölesi batarya tam şarja ulaştığında açılır. DET mimarisine göre en büyük avantajı

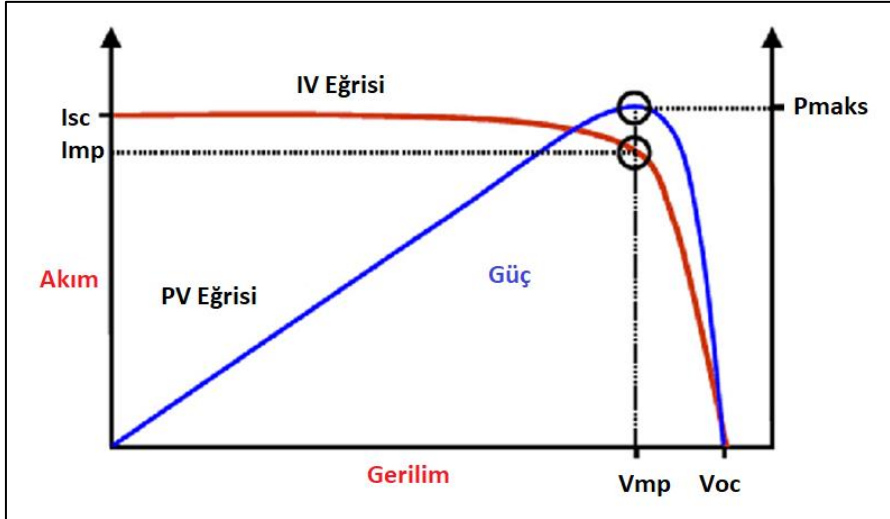
panelden hep maksimum güç alınması ve bu gücün fazlasının şönt devreleriyle atılmamasıdır. Öte yandan, MPPT sisteminin kayıpları anahtarlama regülatör yüzünden yüksektir. Bu anahtarlama devrenin kayıpları uydu gövdesi içinde birikir ve ısı olarak problem oluşturur. Ayrıca bu sistemin EGS'ye eklenmesi fazladan ağırlık ve maliyet dezavantajı da getirmektedir. MPPT mimarisine ait bir diyagram Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. MPPT mimarisi [3]

MPPT, panellerin verimli bir şekilde güç üretebileceği maksimum güç noktasına ulaşması için güneş panellerinden üretilen enerjinin gerilimini ve akımını sürekli olarak izler. Bu sayede sistem, panellerin verimli bir şekilde çalışabileceği optimum gerilim ve akım kombinasyonunu belirleyerek sistemin en yüksek güç üretimine ulaşmasını sağlar. Böylece güneş panellerinden elde edilebilecek enerji en üst düzeye çıkarılmış olur.

MPPT kontrol panellerin karakteristik gerilim-akım (V-I) eğrisi üzerinde, gücün maksimum olduğu noktayı belirler ve panellerin çalışma koşullarını anlık olarak değerlendirerek, panellerin optimum maksimum güç noktasına ulaşmalarını sağlamak için gerilim ve akımı düzenler. Güneş Paneli I-V ve P-V Eğrileri Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



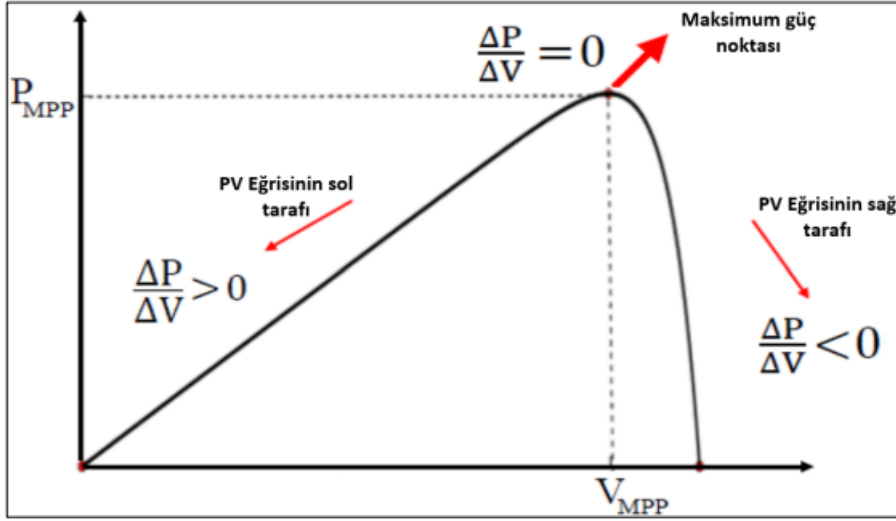
Şekil 2.6. Güneş paneli I-V ve P-V eğrileri

MPPT'yi uygulamak için çeşitli algoritmalar kullanılabilir. Bu algoritmalar arasında en çok kullanılanlar Değiştir ve Gözlemle ve Artımsal İletkenlik yöntemlerinden bahsedilecektir.

Değiştir ve Gözlemle algoritması basit yapı ve yaygın kullanılan bir takip algoritmasıdır. Bu algoritma, güç-gerilim eğrisinde panellerin maksimum güç noktasını takip etmeye çalışır. Panel gerilimini küçük aralıklarla değiştirir ve güçteki değişikliği izler. Eğer güç artarsa, bu yönde artırmaya devam eder; aksi takdirde, gücü ters yönde değiştirir. Bu sürekli gözlem, panellerin maksimum güç noktasını bulana kadar devam eder. Bu teknikte hızlı değişen ışık koşullarında optimum noktanın bulunmasında zorluk yaşanabilir ve maksimum güç noktası civarında salınmalar gözlemlenebilir [11].

Artımsal İletkenlik algoritması güneş panellerinin güç-gerilim eğrisinde eğimin sıfır olduğu grafiğin tepe noktasına ulaşmayı amaçlayarak maksimum güç noktasını bulmaya çalışan tekniktir. Eğim, gerilimin akıma göre değişim hızını temsil eder. Eğer eğim pozitifse, sistem panel gerilimini artırarak maksimum güç noktasına yönlendirilir. Eğer eğim negatifse, sistem panel gerilimini azaltarak maksimum güç noktasına ilerletilir. Eğer eğim sıfıra yakın ise sistemin maksimum güç noktasına yakın olduğu anlaşılır. Belirtilen algoritmanın grafiği Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

Bu teknikte değişimler daha hassas bir şekilde takip edilebilir. Değiştir ve Gözlemle metoduna göre daha kompleks bir yapısı vardır ancak maksimum güç noktası civarında daha az dalgalanma görülür.



Şekil 2.7. Artımsal iletkenlik algoritması prensibi

$$\frac{dP}{dV} > 0, \text{ MPPT noktasının solu}$$

$$\frac{dP}{dV} = 0, \text{ MPPT noktasında}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0, \text{ MPPT noktasının sağı [12]}$$

2.2.2. Doğrudan enerji transferi metodu

DET (Doğrudan Enerji Transferi) yöntemi, yükteki değişim veya güneş panelindeki değişimden bağımsız olarak ana bara gerilimini önceden ayarlanan azami bir değerin altında tutan şönt regülatörlere dayanır. Kullanılan malzeme çeşitliliği ve sayısı az olduğundan dolayı nispeten basit ve hata yapma olasılığı düşük, güvenilirliği yüksek bir sistemdir. Yükün ihtiyaç duyduğu enerji ana baraya veya bataryaya yönlendirilir ve dağıtımı yapıldıktan sonra üretilen gücün fazlası atılır.

Bu topoloji kullanılarak oluşturulmuş çoğu tasarımda birden fazla paralel bağlı katmanlı yapı vardır. Bu katmanlar sıralı çalışır. Bu katlardan yalnızca biri analog olarak veya darbe genişlik modülasyonu kontrolcüsü kullanılarak anahtarlanır. Anahtarlama modunda çalışan katman dışındaki anahtarlar ya tamamen açık ya da tamamen kapalıdır.

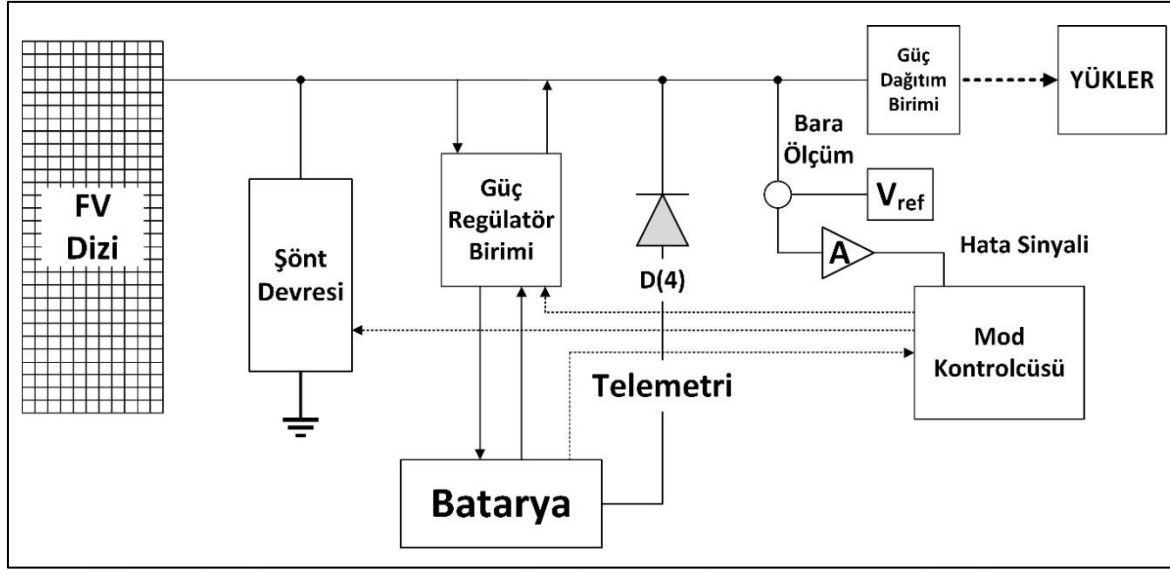
Güç sistemi regülasyon mimarisi açısından incelendiğinde EGS, Doğrudan Enerji Transferi ve Maksimum Güç Noktası Takibi olarak iki ana gruba ayrılır. Bunlardan DET mimarisinde, fotovoltaik taraftan gelen güç arada seri bir eleman bulunmaksızın doğrudan

yüke aktarılır. Bu mimaride tam regüle ve regüle olmayan bara olmak üzere 2 bara sistemi bulunur.

MPPT mimarisinde ise panellerden her zaman maksimum güç çekilmeye çalışılır ve bunu gerçekleştirmek üzere fotovoltaiik hücreler (FV) ve yükler arasında seri bir dönüştürücü bulunur. Bu dönüştürücü her zaman FV hücrelerden maksimum güç çekilecek seviyede tutmak üzere çalışır.

DET sisteminde ana bara gerilimi ölçülerek bir referans ile kıyaslanır. Bu kıyaslamada üretilen hata sinyali mod kontrolcüsü tarafından işlenerek bara gerilimini düzenleyen birimlere komut sinyali gönderilmesi sağlanır. Mod kontrolcüsünün kontrol ettiği üç temel mod bulunur. Bunlar; yük ve batarya grupların enerji ihtiyaçlarından fazla enerjinin üretildiği durum “Şönt Modu”, batarya gruplarında tam şarja ulaşılan veya mevcut şarj seviyesinin korunması istenilen durum “Batarya Şarj Kontrol Modu”, fotovoltaiik kaynaklardan yeterli gücün alınamadığı durum “Deşarj Modu” dur. Buna üç bölge regülasyon mimarisi denir.

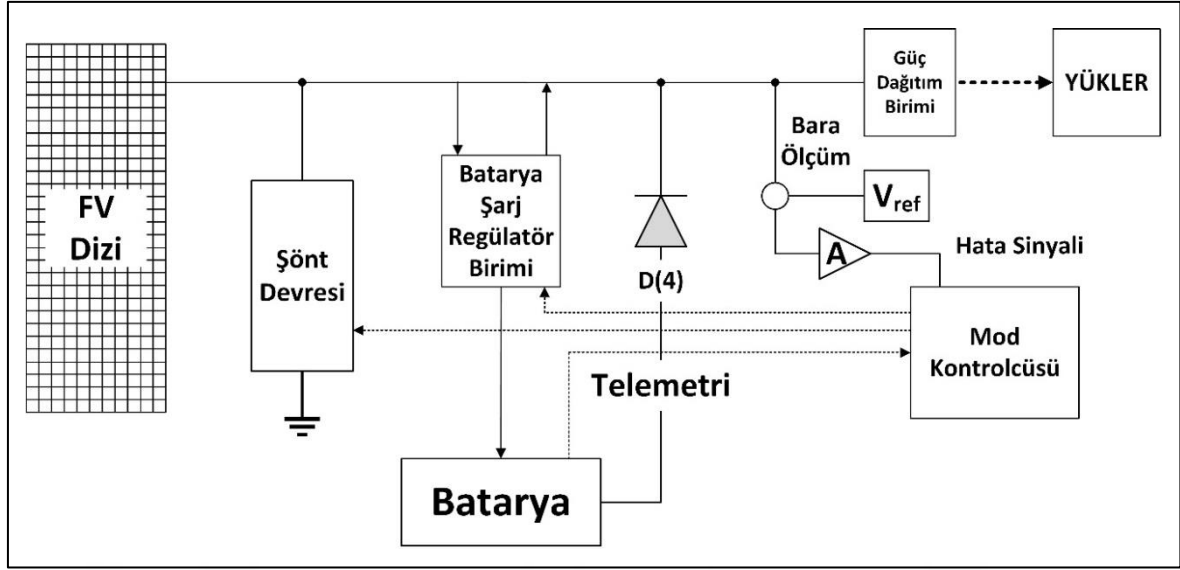
Tam regüle bara düzeninde ana bara gerilimi tüm yörünge boyunca kısıtlı bir tolerans aralığında tutulmaya çalışılır. Literatürde bu tolerans aralığı olarak tepe tepe geriliminin (%2-%5) arasında tutulması önerilmektedir [3]. Bu tez kapsamında izin verilen ana bara gerilimi dalgalanması literatürde önerilen değerden de düşük tutularak, 1% olarak tutulmuştur. Şekil 2.8’de verilen DET mimarisine ait tam regüle bara yapısı diyagramında şönt devresi bulunmaktadır. Bu devreler uydu elektrik güç sistemi açısından kritik bir öneme sahip olup, güneş ışığının yoğun olarak uydu yüzeyine vurduğu dönemlerde ve uydu ticari ömür döneminin başlarında yüklerin ve enerji depolama gruplarının ihtiyaçları karşılandıktan sonraki istenmeyen fazla gücü şönt ederek atımını sağlar. Güç regülatör birimi, bataryanın şarj ve deşarj olmasını sağlayan batarya şarj ve batarya deşarj dönüştürücülerini içerir.



Şekil 2.8. Doğrudan enerji transferi mimarisi tam regüle bara yapısı [3]

Regüle olmayan bara düzeninde ise bara gerilimi sadece güneş ışığı varlığında şönt devresi tarafından regüle edilir, tutulma anlarında ise regüle edilmez. Bu nedenle bu bara sistemine zaman zaman kısmi regüle bara veya güneş-regüle bara sistemi de denir. Tam regüle bara sistemiyle arasındaki en temel fark bu düzende güç regülatör birimi olmamasıdır. Batarya şarj devresi için spesifik tasarım yapılmasına rağmen batarya deşarj devresi için özelleşmiş bir devre kullanımı yoktur.

Bataryanın güneş tutulması anlarında deşarjı için bir deşarj diyodu bulunur. Bu diyotlar doğrudan bataryaya gelen kontrolsüz şarj akımına engel olarak, pil şarj işlevinin batarya şarj regülatörü tarafından gerçekleşmesini sağlar. Bu mimaride güneş tutulması sırasında batarya boşaldıkça bara gerilimi düşer ve güneş ışığı modunda batarya şarj edilirken yeniden yükselir. Ana bara gerilimi değişimleri batarya gerilimiyle aynıdır. Güneş ışığı durumunda gerilim regülasyonu şönt kontrol devreleri ile sağlanır. Bu bara regülasyon sisteminde regülasyon aralığı, tam regüle sistemlere göre oldukça geniştir. Regüle olmayan bara sistemi diyagramı Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Doğrudan enerji transferi mimarisi tam regüle olmayan bara yapısı [3]

Regüle olmayan bara yapısı basit yapısı ile ön plana çıkmaktadır. Ancak baraya bağlı ekipmanlar baranın nominal değerinin yaklaşık %25 salınımla değişebilmesine uyumlu olarak tasarlanmalıdır [3]. Bazı yükler için bu salınım kabul edilebilir ancak birçok yük için bu değişim kabul edilemez. Bu yükler gücün ekipmana dağıtıldığı noktada gerilim ihtiyaç duyarlar.

Tam regüle bara yapısındaki fazladan batarya deşarj dönüştürücü ile regüle olmayan bara yapısındaki deşarj diyodu birbirlerini güç kaybı ve maliyet yönünden kompanze ederler. Regüle olmayan bara sisteminde kablaj ve batarya ağırlığı ile bunlara dayalı sistem maliyetleri tutulma sonrasında en düşük bara geriliminde yüksek akım taşıyacağından dolayı çok fazladır, tam regüle bara sisteminde sabit bara gerilimi sayesinde daha az batarya grubu ve daha hafif kablaj kullanır.

Tam regüle bara sisteminde bara gerilimi sabit olduğundan yükleri besleyen dönüştürücü ağırlıkları da daha düşüktür. Özetle; tam regüle bara sistemi yörünge işlev esnekliği, ağırlık ve maliyet avantajları ile regüle olmayan bara yapısına göre tercih edilebileceği söylenebilir. Bu tez kapsamında bahsedilen avantajlar göz önünde bulundurularak tam regüle bara sistemi kullanılmıştır.

DET yönteminde doğrusal veya anahtarlama şönt devreleri kullanılır. Diğer varyasyonlar arasında kısmi şönt, tam şönt veya sıralı şönt devreler yer alır. Doğrusal şönt devrelerinde,

aktif bölgede çalışan bir güç anahtarı güneş paneli dizisi boyunca yerleştirilir ve dizideki fazla gücü dağıtır. Bazen şönt transistörde harcanan gücü paylaşmak için bir seri direnç kullanılır. Ana hata yükseltici sinyali, ana hata gerilimini referans gerilimle karşılaştırır ve şönt anahtara bir kontrol sinyali gönderir. Bu sistemler basittir ancak gerekli olan anahtara monte edilmiş ağır soğutucular sistemin hacmini artırır [9].

Anahtarlama şönt devrelerinde güneş paneli gücünü kontrol etmek için doğrusal sistemde olduğu gibi bara gerilimi referans gerilimle karşılaştırılır ve bir hata sinyali üretilir. Ancak bu anahtarlama devrelerinde, hata gerilimi daha sonra bir rampa sinyaliyle karşılaştırılır ve elde edilen çıktı, şönt transistörü doyum ve kesim durumları arasında modüle etmek için kullanılır. Transistörler anahtar olarak çalıştırıldığından, güç dağıtımı büyük ölçüde azaltılır ve daha düşük güçlü transistörler kullanılabilir [9].

Şönt devrelerinin kullanım alanlarından olan S3R ve S4R topolojileri DET yöntemi kapsamında incelenecektir.

S3R topolojisi

Uydu elektrik güç sistemlerinde güneş paneli regülatörleri güç sisteminin önemli bir parçasıdır [3, 13-14]. Güneş paneli regülasyonu alt sistemlerinde yüksek verimliliği, düşük kütlesi, basitliği ve yüksek güvenilirliği sebebiyle S3R tekniği sıklıkla kullanılır [15-16]. S3R Sıralı anahtarlama paralel regülatörler (S3R) ilk olarak 1977 yılında D. O'Sullivan tarafından tanıtılmıştır. Daha sonra ESA tarafından sıralı anahtarlama paralel seri regülatör (S4R) topolojisi önerilmiştir [17]. Bu topoloji S3R topolojisinden türetilmiştir [18].

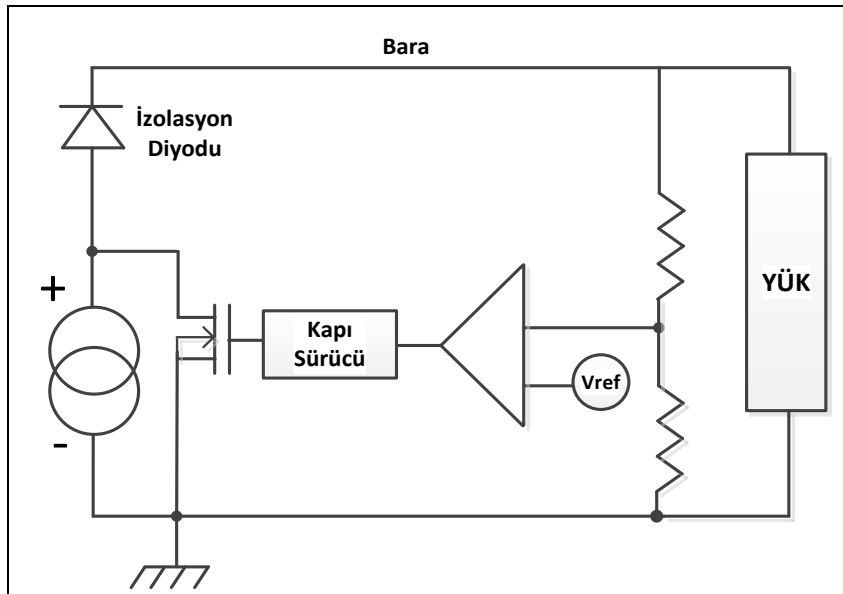
Son yıllarda S3R sisteminin optimizasyonu yönünde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. [19]'da S3R topolojisinde sistem verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. [20-22]'de kontrol döngüsünün optimizasyonu çalışılmıştır. [23-25]'te güneş panellerinin parazitik kapasitansından kaynaklanan negatif etkilerin bastırılması incelenmiştir. [26] ise S3R tasarımının blok diyagramlar üzerinden dinamik analizini gerçekleştirmiştir.

S3R (Sequential Switching Shunt Regulator), sıralı anahtarlama şönt regülatör olarak adlandırılır ve doğrudan enerji transferi (DET) metodunda kullanılır. Şekil 2.10'da bir

S3R hücresinin basit devre yapısı gösterilmiştir. Bu topolojide her bir güneş paneli bölümünün pozitif terminaline bir anahtar koyularak, güneş paneli bölümünün negatif terminaline bağlanır. Pozitif terminal ise bir yalıtım diyotu ile ana baraya bağlıdır. Ana baraya güç iletileceği zaman akım diyot üzerinden akar, bu çalışma durumuna iletim modu denir. Fazla güç atılması gerektiğinde ise şönt anahtar iletime sokulur ve akım bu hat üzerinden akar. Buna şönt modu denir. Gücün hassas ayarlanması gerektiği durumda ise şönt anahtar anahtarlama modunda çalışır [10].

S3R topolojisinde büyük güneş paneli hücre dizileri genellikle her biri yalıtım diyotlarına sahip birden fazla paralel devreye bölünmüştür, böylece hata yapan bir bölüm hatasız çalışan bölümlerden güç çekmeyecektir. Ayrıca bu diyotlar anlık hata durumlarında ana bara geriliminin kaybını önler. Bu diyotlar “DET diyotları” olarak adlandırılır ve bu işlev için genellikle düşük ileri kutuplama gerilimlerine sahip olan schottky diyotlar kullanılır.

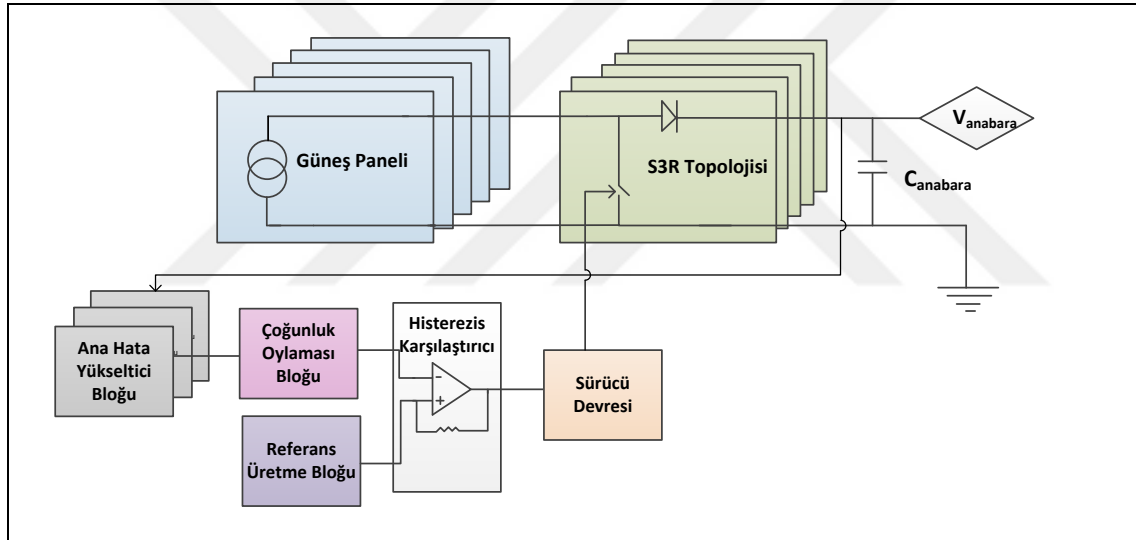
Şönt anahtarı ise uydunun güneş ışığına maruz kaldığı sırada yükün ihtiyacını karşıladıktan sonra, artık kalan gücü atmaya yarar. Özellikle güneş panelinin ömrünün başında güneş paneli çevresel faktörler ve yaşlanmaya daha az maruz kaldığı için daha sık ihtiyaç duyulur [3].



Şekil 2.10. Bir S3R hücresinin basit devre yapısı [3]

S3R topolojisinde birbiri ile birebir özdeş tasarlanan çok katmanlı yapı kullanılır ve bütün katmanlar aynı ana hata yükseltici sinyali tarafından kontrol edilir. Her bir yük ihtiyacı için

hangi katmanın açık veya kapalı olacağı, hangi katmanın anahtarlama yapacağı, anahtarlama gereken doluluk oranının kaç olacağı ana hata yükseltici sinyali ile her katmana giren referans sinyalinin karşılaştırılmasının sonucuna bağlıdır. Anahtarlama modunda çalışacak katman dışındaki katmanlar ya iletim modunda ya da şönt modunda çalışır. İletime ve şönte girecek katmanların sayısı, bu anahtarın doluluk oranı ise ana hata yükseltici devresi tarafından belirlenir [10]. Şekil 2.11’de güç regülasyon devresinin blok diyagramı verilmiştir. $C_{anabara}$ indisi ile gösterilen bara kapasitörü, oluşan DA baranın pozitif ve negatif terminallerine bağlanır ve elektrik enerjisi için bir depolama elemanı görevi görür, ana baradaki gerilim dalgalanmasını filtreler. Ana bara gerilim dalgalanmaları arttığında EMI problemi ortaya çıkacaktır. Ana bara kapasitörü enerjiyi depolayarak veya serbest bırakarak daha kararlı ana bara gerilimi oluşmasını sağlar.



Şekil 2.11. Güç regülasyonu devresinin blok diyagramı

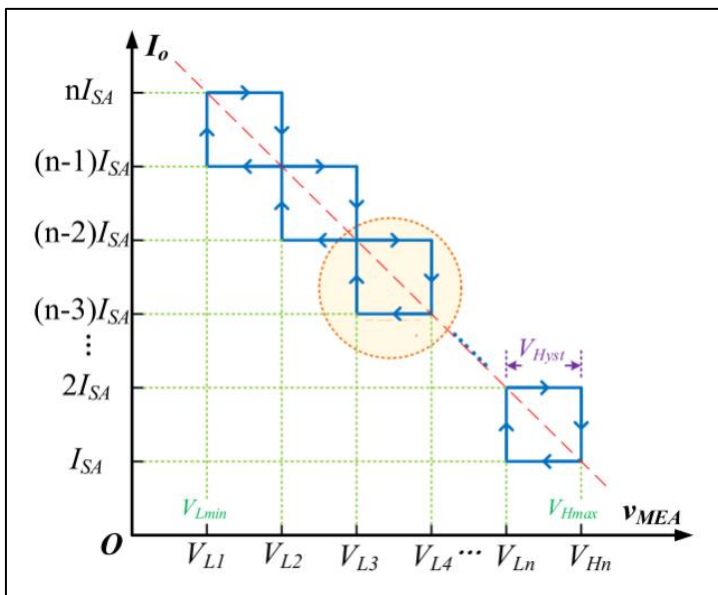
S3R devrelerinde ana baranın regülasyonu ana hata yükseltici (AHY) sinyaliyle sağlanır. Uydunun güneş gördüğü zamanlarda S3R devresi yükleri besler, bataryayı şarj eder ve üretilen gücün fazlasını atar. Tutulma zamanlarında ise batarya deşarj edilerek yükler beslenir ve ana baranın regülasyonu korunur. Uydu elektrik güç sisteminde sistemin birbirinden bağımsız çalışması ve modüler tasarım yapılması avantaj sağlar.

Üretilen güç tüketilecek güçten fazla olduğunda ana bara gerilimi nominal değerin üzerine çıkar. Bu hata sinyalinin değerine göre şönt edilecek hücreler belirlenir. Şönt anahtarı ana hata yükseltici ve referans gerilimler tarafından kontrol edilen bir anahtar tarafından açılıp kapatılır [3].

S3R topolojisi histerezis kontrol altında çalışır. S3R topolojisi üç modda çalışabilir; Barayı besleyebilir, akımı toprağa şönt edebilir veya gereken gücü hassas olarak ayarlayabilmek için anahtarlama modunda çalışabilir. S3R hücrelerinin her bir bölümü bu üç modun birinde regülasyona katkı sağlar. Her bir S3R hücresi, histerezis karşılaştırıcılarla etkileşen ana baranın hata gerilimlerinden türetilmiş sinyallerle kontrol edilir. MEA çıkış gerilimi, hücreler arasındaki modların sıralı değişimini kontrol eder.

Güneş paneli bölümleri, güç barasına kademeli bir akım sağlar. MEA gerilimine göre S3R'ın kademeli akım profili Şekil 2.12'de gösterilmiştir. V_{MEA} ile gösterilen parametre ise ana hata yükseltici çıkış gerilimidir. MEA gerilimine göre S3R'ın kademeli akım profili, bir miktar histerezis içerir. Bu histerezis ardışık güneş paneli bölümlerinin eşikleri arasındaki mesafeye eşit genliklerle çizilir.

Histerezis karşılaştırıcılar sistemin o anki durumunu tanımlayan bir merdiven oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Her bir aralıkta yalnızca bir güneş paneli hücresinin anahtarlama yapmasını sağlamak için ana hata yükseltici sinyalleri şekildeki kademeli akımı sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. V_{L1} en düşük gerilime sahip histerezis referansının alt limitini, V_{Hn} en yüksek gerilime sahip histerezis referansının üst limitini göstermektedir. Örneğin V_{L1} ve V_{L2} arasında n indisine sahip güneş paneli ana hata yükseltici gerilimi referans gerilimine eşitlendiği anda anahtarlama yapılabilir.



Şekil 2.12. S3R topolojisinde histerezis kontrolcü döngüsü

Özetlemek gerekirse, S3R'in üç adet çalışma modu vardır. Güneş paneli gücü yükün güç talebinden fazla ise mosfet iletim konumundadır. Mosfet iletimdeyken, gücüne ihtiyaç duyulmayan mosfet iletime sokulur ve fazla güç mosfet üzerinden şönt edilir. Mosfet kesimdeyken, güneş panellerinden üretilen güç yüke aktarılır. Mosfet anahtarlama modundayken ise panel gücünün toplam değerinden daha düşük hassas ayar gerektiren yüklere anahtarlama yoluyla güç iletilir. Güç iletim ve şönt modu arasında geçiş yapar.

Ana hata yükseltici bloğu

AHY bloğu, ana baranın hata sinyallerinin yükseltilmesinden, S3R hücrelerinin çalışma durumlarının kontrol edilmesinden, anahtarlama modunda çalışacak S3R hücresinin doluluk oranının belirlenmesinden sorumludur. Ana hata yükseltici sistemin ana kontrolünü sağlayan sinyaldir [10].

Ana hata yükseltici sinyali ana baradan alınan ölçüm ile referans gerilimini karşılaştırarak şönt anahtara bir kontrol sinyali gönderir ve bu yükseltilmiş hata sinyali, şönt anahtarları sırasıyla açmak için kullanılır. Hata gerilimi arttıkça, daha fazla S3R hücresi devresini şönt etmek için daha fazla anahtar kapatılır. Her bir güneş paneli dizisi bir anahtara bağlanır ve bu aşamalar, güneş paneli dizisi gücünü kontrol etmek için tekrarlanır [27]. Bu yapı PI kontrolcü yapısı kullanılarak kurgulanmıştır.

S3R'in ana bara gerilimi fotovoltaiik panelden ana baraya sırayla bağlanan veya toprağa şönt edilen birkaç bölüme bölünmesini kontrol eden ana hata yükseltici tarafından düzenlenir. Bir bölümün bağlantısı veya şönt çalışması, faydalı yük güç talebinin ortalama değeri ile belirlenir. AHY çıkış gerilimi güneş paneli bölümlerinin sıralı değişimini kontrol eder, böylece güç barasına kademeli bir akım sağlar [28].

Çoğunluk oylaması bloğu

Ana hata yükseltici sinyalinin düzgün çalışmaması; regülasyonun sağlanamaması, üretilen ve tüketilen gücün dengesinin bozulmasına, yüklerin beslenememesine hatta sistemin uydu görevinin başarısız olmasına sebep olabilir. Bu nedenle AHY bloklarının yedeklenmesi sistem ve uydu açısından kritik öneme sahip olduğu için önemlidir. Bu sinyalin yedekliliği 2/3 çoğunluk oylaması devresi ile sağlanmıştır.

Karşılaştırma devresi bloğu

Güneş paneli hücreleri ana bara hattında ortaklanan birden çok bölüme ayrılmıştır ve her bölüm, önceden belirlenmiş referansla bir histerezis karşılaştırıcısı tarafından kontrol edilen paralel bir anahtara sahiptir. Güneş panelinden üretilen enerjideki ve yüklerin akım talebindeki sapma, ana bara gerilimindeki değişiklikten saptanabilir.

PI kontrolcüsü sinyallerinden elde edilen daha sonra çoğunluk oylamasına sokularak doğruluğu tasdiklenen ana hata yükseltici sinyali, her güneş paneli bölümündeki değeri önceden belirlenmiş referans sinyaliyle histerezis karşılaştırıcılara gönderilir ve buna göre her karşılaştırıcı yanıt verir. Histerezis karşılaştırıcılarının referans değerleri, kararlı durumda her bir çalışma modunda sadece bir bölüm anahtarlayabilecek şekilde ayarlanıp, eşit aralıklarla sıralı olarak dağıtılır. Karşılaştırıcının sabit referans değeri ve buna karşılık gelen bölümü, bara gerilimindeki hata sinyalinin büyüklüğüne bağlı olarak ana baraya bağlanır veya ana baraya akış olmaz. Hassas değerler için ise ilgili hücre anahtarlama modunda çalışır [17].

Akım limitleme

Geçmişte yaygın olarak kullanılan silikon güneş panelleri %18 civarı verime sahipken, daha yüksek güçlere çıkılma ihtiyacı doğduğundan dolayı çok eklemli GaAs tabanlı güneş panellerine geçiş yapılmıştır. Bu yeni nesil güneş panelleri silikon güneş panellerine kıyasla radyasyona daha dayanıklıdır. GaAs tabanlı güneş panellerinde verim %28'lere kadar çıkabilmekte olup, daha yüksek verimli güneş panellerine geçilmesi güneş panellerinin alanının küçülmesine, ekipmanın hacminin ve ağırlığının azalmasına neden olmuştur. Uyduda daha az alan kaplayarak daha yüksek güçlerin üretilebilmesine yol açmıştır [19]. Tarihsel ve teknolojik gelişimi incelendiğinde, güneş hücrelerini üç nesile ayırmak mümkündür [29, 30].

Birinci nesil güneş hücreleri kristal silikon devre plakasına (wafer) dayalıdır. Tekli veya çoklu kristal silikon türlerine ayrılır. İkinci nesil güneş hücrelerinde önceki nesil hücrelerden farklı olarak yüksek maliyetli devre plakası yapılı silikon kristaller yerine ince film (1µm-4µm) silikon tabakaları kullanılır. Amorf silikon, CdTe (Kadmiyum Tellürid), CIGS (Bakır-İndiyum-Galyum-Di Selenid), III-V grubu bileşiklerin (GaAs, GaInP vb.)

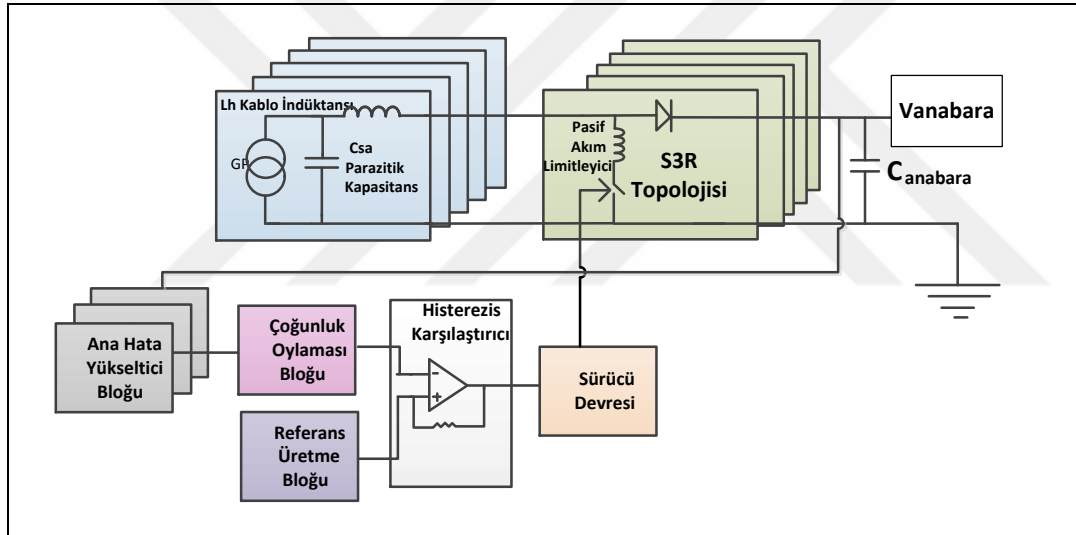
kullanıldığı güneş hücreleri bu gruptadır. Üçüncü nesil güneş hücreleri, en son teknoloji ve hassaslaşmış güneş hücrelerine dayanır. Bu gruptaki güneş hücrelerinde ışığı soğurmaya özelleşen bazı materyallere dayalı tabakalar bulunur. Boyaya hassas hücreler, organik hücreler, kuantum noktalı hücreler, perovskit hücreler ve çok eklemli hücreler bu gruptaki güneş hücreleridir.

Günümüz fotovoltaik panellerinin büyük çoğunluğunda kullanılan hücre teknolojisi monokristal veya polikristal yapıli klasik silikon hücrelere dayalıdır. Bunun temel sebebi ana bileşen olan silikonun doğada bolca bulunması, işleme süreçlerinde kolaylık ve fiyat avantajıdır. Ancak tek eklemli silikona dayalı klasik güneş hücreleri için teorik verim sınırı (Shockley–Queisser sınırı) %33’ler mertebesindedir. Bu durumun esas sebebi yarıiletkenin enerji bant aralığıdır. Yarı iletken tarafından soğurulan ışığın miktarı ve dalga boyu o yarıiletken bileşiğın enerji bant aralığıyla ilgilidir [31-32].

Çok eklemli yarıiletken teknolojisine dayanan güneş hücrelerinde ise birden fazla yarıiletken katmanlı bir yapıda bir araya getirilmiştir ve çoklu enerji bant aralığı söz konusudur. Bu sayede bu tip güneş hücrelerinin ışıktan faydalanma oranı, dolayısıyla verimleri, klasik tek eklemli silisyum tabanlı güneş hücrelerine göre daha yüksektir. Çok eklemli güneş hücrelerinde üstteki katmandaki hücre yüksek enerjili fotonları yakalarken bir alt katmandaki hücre daha düşük enerjili fotonları yakalamaya özelleşmiştir. Buna benzer şekilde katman sayısının artmasıyla hücre üzerine gelen ışıktan faydalanma teorik olarak artacaktır. Güncel durumda bu tip çok eklemli güneş hücrelerinde %45 üzeri rekor verimler elde edilmiştir. Çok eklemli güneş hücreleri yapısında kullanılan yarıiletkenler, periyodik tablonun 3. ve 5. sütununa isabet eden elementlerden seçilmektedir. Bu yarıiletken karışımlarına örnek olarak GaInP(Galyum-İndiyum-Fosfat), GaInAs(Galyum-İndiyum-Arsenik) ve GaAs(Galyum-Arsenik) örnek gösterilebilir. Bu özelliklerinden ötürü bu tip güneş hücrelerine III-V güneş hücreleri de denir. Ayrıca, GaAs yapıli hücreler ile çok ince yapıli ve hafif fotovoltaik hücreler yapmak mümkündür [31, 33-34].

Klasik silisyum tabanlı güneş hücrelerine kıyasla yüksek verimlerine rağmen, çok eklemli güneş hücreleri göre oldukça maliyetli olup üretim yöntemleri de zordur. Bu sebeplerden ötürü bu tip güneş hücrelerinin özellikle uzay uygulamalarında ve insansız hava araçlarında kullanımı yaygındır [33].

Bununla birlikte, silikon tabanlı güneş panellerinden GaAs üçlü bağlantı teknolojisine geçiş güneş panellerinin parazitik kapasitansının artmasına neden olmuştur. Silikon güneş panellerindeki parazitik kapasitans çekilen amper başına yaklaşık 60nF, GaAs bazlı güneş panellerinde ise yaklaşık 210nF'dır [28, 35]. Daha yüksek güneş paneli akımı bu sorunu kötüleştirecektir. Bu durum mosfet iletime girerken akım sıçramalarını artırdığı için S3R tasarımlarını karmaşıklığını artırmıştır. [36]. Anahtar kapandığı zaman parazitik kapasitans deşarj olur ve gerilimi sıfır olur. Ana baranın güç ihtiyacı arttığında mosfet kesime giderken ilgili bölümü baraya bağlaması gerekir. Parazitik kapasitans değeri arttıkça yalıtım diyodunun iletime geçme süresi de buna bağlı olarak artacaktır. Güç regülasyon birimine parazitik kapasitans, kablo endüktansı ve pasif akım limitleme devresi de dahil edildiğinde oluşan blok diyagram Şekil 2.13'te gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Parazitik bileşen ve akım limitleme içeren blok diyagram [37]

Özetle, GaAs tabanlı güneş panellerinin parazitik kapasitansının yüksek olması özellikle yüksek frekanslara çıkıldığında mosfet'lerde akım sıçramalarına yol açtığı için S3R tasarımını zorlaştırmıştır. Parazitik kapasitansın etkileri elimine edilemezse anahtarlamalar esnasındaki di/dt oranı yükselecek ve MIL-STD-461 standardına göre elektromanyetik uyumsuzluk görülecektir [38].

Daha yüksek parazitik kapasitans diyodun iletime girme gecikmelerinde artışa yol açacaktır. Bu da güneş panellerinden gelen akımın ana baraya iletilmesindeki gecikme demektir. Daha yüksek akımlarda daha yüksek gecikmeler olduğu zaman iki veya daha fazla S3R hücresi aynı anda anahtarlama yapmasına yol açarak çift bölümlleme (double-

sectioning) hatasına yol açabilir. Bu hata, yük akımı güneş panelinin çıkış akımının tam katına yakın olduğunda ortaya çıkma olasılığı daha yüksektir. Bu da ana bara dalgalılığını arttırır ve daha yüksek anahtarlama kayıplarına yol açar. Bu sorun akım sınırlama devresi ile çözülür.

Bu başlıkta güneş paneli parazitik kapasitansından kaynaklanan problemler ve akım sınırlama devresinin kullanılması gerekliliği üzerinde durulmuştur. Literatürde aktif ve pasif limitleme teknikleri mevcuttur. Aktif akım limitleme tekniğinin avantajları akım limitinin hassas olarak ayarlanabilmesi, hafiflik ve iletim modunda ana baranın oluşmasında meydana gelen gecikmenin kısa olmasıdır. Ancak aktif akım limitleme devresinin neden olduğu daha yüksek güç kaybı; yüksek gerilim, yüksek parazitik kapasitans, yüksek bölüm akımı ve yüksek frekanslı uygulamalarda kabul edilemez seviyelerdedir [39]. Bu nedenle güneş panelinin parazitik kapasitansının etkilerini limitlemek için kullanılan pasif sınırlama tekniğinden bahsedilmiştir. Pasif limitleme devresinin avantajı düşük güç kaybına neden olması ve basit yapılı olmasıdır. Bu nedenle bu tez kapsamında pasif akım limitleme devreleri incelenecektir.

S4R Topolojisi

Avrupa Uzay ajansı tarafından bulunan ve patenti alınan S4R topolojisi; ana baranın ve ana baraya ek olarak batarya şarj akımının beslenmesine ve kontrol edilmesine yarar, bu şönt konsepti bataryaya ek bir bağlantı ile genişletilmiş bir S3R topolojisine benzer. İlk amaç güç kontrol modülündeki kayıpların giderilmesini kolaylaştırmak ve gerekli uyduların yüzeyinde ısıyı dağıtmak için kullanılan radyatör alanını minimuma indirmek için en fazla verimi elde edebilmektir [17].

S4R tekniği, güneş enerjisi dizisinin işlevini genişletir ve doğrudan şarj işlevini ekler. S4R tekniği, güçlü bir şarj genişleme kapasitesine ve uyarlanabilirliğe sahiptir. Bu nedenle, prensip olarak çeşitli yörüngelerde uzay aracı güç sistemlerinin uygulama gereksinimlerini karşılayabilir. S4R tekniğinin birincil güç kaynağı sistemine dahil edilmesi, birincil güç kontrolünün karmaşıklığını azaltabilir ve güç sisteminin etki alanları arası dinamik yanıt kapasitesini iyileştirebilir. S3R ile karşılaştırıldığında, S4R, güç kontrol ünitesinin ağırlığını, ısıl güç tüketimini azaltabilir. Ancak bu teknik sadece maksimum batarya geriliminin bara geriliminden daha yüksek olmadığı güç sistemi için geçerlidir. Bataryaları

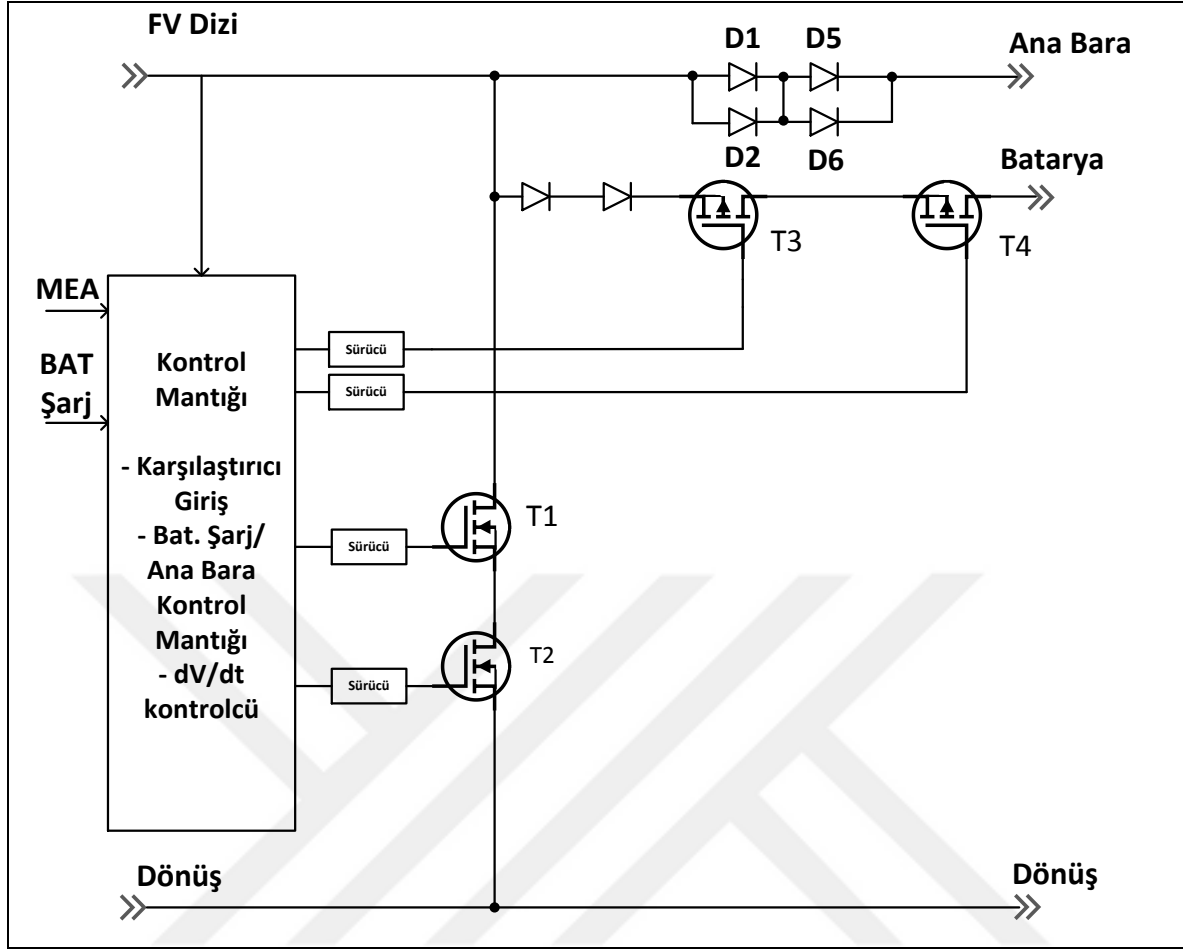
şarj etmek için S4R tekniğini kullanırken, güneş paneli dizisinin maksimum güç noktasında çalışmaması, şarj sırasında fotovoltaik panelin 100V bara için %30 civarında enerji kaybına ve toplamda hücre dağıtım alanının tüm uyduda %5 artmasına neden olacaktır [40].

S4R devresi, bataryaları şarj etmek için seri olarak bir anahtar eklenerek, güneş enerjisi dizisinin bataryaları başka bir şekilde doğrudan şarj edebilmesi için S3R devresinden geliştirilmiştir. Güneş hücreleri tarafından üretilen akımın yönü, ana hata yükseltici, batarya hata yükseltici ve mantık kontrol devresi tarafından ortaklaşa kontrol edilir ve kararlaştırılır. Kontrol mantığına göre, ana baraya giden güç kaynağı yolu en yüksek önceliğe sahiptir, bunu bataryaya giden şarj yolu ve ardından toprağa giden şönt yolu takip eder [41].

S4R ısı kontrol üzerindeki baskıyı ve güç regülasyon biçiminin hacmini ve ağırlığını azaltan bir yöntemdir. S4R tekniğinin devre şeması Şekil 2.14'da gösterilmiştir. Güneş enerjisi dizisinden gelen çıkış enerjisi sistemin yük ihtiyacı varken D1, D2, D5, D6 diyotları aracılığıyla ana barayı şarj eder. Ana baranın güce ihtiyacı yoksa T3 ve T4 mosfet'leri aracılığıyla bataryayı şarj eder. T3 ve T4 mosfet'leri batarya şarjını kontrol etmek için şarj anahtarları olarak kullanılır. Ana baranın ve bataryanın güç ihtiyacı yoksa T1 ve T2 üzerinden fazla güç şönt edilir. T1 ve T2, şönt anahtarları olarak kullanılmıştır. Blok şemada görülebileceği üzere S4R tasarımı aşağıdaki tekil nokta hatalarının hepsi için alınan önlemleri kapsamaktadır:

- Güneş paneli dizisinin gücünü kaybetmemek
- Ana barayı aşırı yüklememek veya kısa devre etmemek
- Bataryayı kısa devre etmemek
- Bataryayı sürekli olarak şarj etmemek

Kontrol devrelerinin elektronik kısmı ana bara kontrol ve şarj akımı kontrol karşılaştırıcılarını, dV/dt kontrolünü ve öncelik mantığı devresini içerir. Öncelik mantığı devresi ana baranın beslenmesini önceliklendirmek içindir. Literatürdeki bazı çalışmalarda S4R'ın bu yapısındaki güç kayıplarını ve komponent sayısını azaltmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır [17].



Şekil 2.14. S4R devresi blok diyagramı

S4R sayısı, şarj ve yedeklilik ihtiyacı baranın tepe gücü ve yedeklilik gereksinimine göre belirlenir. Tutulma zamanlarında bara batarya deşarj düzenleyici tarafından enerjilendirilir. Bu regülasyon özellikle yüksek güçlü sistemlere uygundur. Regülasyon her bir S4R hücresi ana hata yükseltici (AHY) ve batarya hata yükseltici (BHY) tarafından kontrol edilir. Bara güneş paneli bölümünden gelen akıma ihtiyaç duymadığında, AHY tarafından kontrol edilen güneş paneli bölümü seri anahtarı iletime girer [41].

Şarj şönt devresinin işlevi, güneş panellerinin doğrudan aşırı gücünü engellemek için, batarya şarj talebini karşıladıktan sonra kalan güneş enerjisi dizisinin fazla gücünü şönt etmektir. Buna göre, şönt güç cihazının ve şarj güç cihazının çalışmasını koordine etmek için bir mantık kontrol devresine ihtiyaç vardır. Güneş panellerinden gelen güç fazla olduğunda, batarya hata yükseltici (BHY) bir şarj talep sinyali verecektir. Bu batarya hata yükseltici sinyali, şarjın gerekli olduğunu gösterir. Bu durumda, sürme devresi şarj güç cihazını açacak ve şönt güç cihazını kapatacaktır. Batarya hata yükseltici çıkışı 0

olduğunda, sürme devresi şarj güç cihazını kapatacak ve şönt güç cihazını açacaktır. Güneş paneli dizisi gücü yetersiz olduğunda, batarya hata yükseltici sinyalinin güç cihazından bağımsız olarak hem şarj güç cihazı hem de şönt güç cihazı kapatılmalıdır.

Batarya hata yükseltici sinyali, bir batarya grubunun hata yükseltme sinyalidir. Batarya hata yükseltici devresinin, akım sınırlayıcı kontrol ve gerilim sınırlayıcı kontrol olmak üzere iki şekilde batarya şarjını kontrol etmesi beklenir. Şarjın başlangıcında, gerilim kontrolcüsünün çıkışı normalden yüksek seviyededir. Akım kontrolcüsünün çıktıları, bir akım sınırlayıcı modülasyon sinyalidir. Akım kontrolcüsünün çıkışından etkilenen batarya hata yükseltici, bataryalara sabit akım şarjı sağlar. Batarya gerilimi kademeli olarak önceden belirlenen değere yükseldikçe; batarya hata yükseltici, gerilim kontrolcüsünün kontrolü altında bataryalara gerilim sınırlayıcı şarj sağlayacaktır. Gerilim sınırlayıcı şarj sırasında şarj akımı sürekli olarak azalacaktır.

S4R topolojisinin ana avantajı, ana bara regülatöründe endüktör ihtiyacı olmaması ve batarya şarj düzenleyiciye ihtiyaç duyulmamasıdır. Geleneksel darbe genişlik modülasyonu dönüştürücülere göre kütle daha düşüktür ancak sisteme ikinci bir anahtar eklenir. Batarya şarj düzenleyiciye duyulan ihtiyacı gidermek için S4R her bir güneş paneli bölümünü üç farklı pozisyonda çalıştırabilir [42]. Her bir S4R hücresi iki adet anahtar içerir. Güneş panelinin her bölümü bu üç modun birinde çalışır.

- Bataryayı besleyebilir.
- Ana barayı besleyebilir.
- İlgili bölümün akım dönüşünü şönt eder [43].

Şarj sonu regülasyonu hücre paketinin gerilim geri beslemeli yapısına dayanır. Kullanılan donanımı minimize etmek için üç adet hücre paketi kullanılır. Standart analog oylama ortak mod etkisinden kurtulmak için bataryanın ortasında bulunan üç hücre paketinin orta değerini seçer. Bu seçim işlemi hücre paket geriliminin çok düşük veya çok yüksek olmasını engeller.

Oylama işlevi, seçilmiş orta değerdeki geri besleme gerilimi ile ayarlanabilir şarj sonu gerilim referansı arasındaki farka dayanır, bu batarya hata sinyali tekrar oylamaya sokulur. Böylece güvenilir bir batarya hata yükseltici sinyali oluşturulur [41].

S4R bang-bang kontrol yöntemi ile çalışır. Bu kontrol tekniği değişken anahtarlama frekansına yol açar. Güneş paneli dizisi akımı her bir S4R hücresinin üç durumlu bir anahtarı tetikleyen, histerezis karşılaştırmacılarla etkileşime giren batarya ve ana bara gerilimlerinin hataları tarafından belirlenir.

Sistem batarya döngüsü ve bara döngüsü olmak üzere iki döngüden oluşur. Her döngünün kendine ait döngüleri vardır. İkisi de güç kaynaklarına bağlıdır. İkinci kontrol döngüsünde bataryalar kullanılmayan panellerden şarj olurken ve enerjinin harcanması gerekmezken, güç barasını dengelemek için kullanılır. Şönt edilen güç hücreleri sisteme enerji vermez [43].

2.2.3. Regülasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması ve Topoloji Seçimi

MPPT tekniğinde güneş panelleri ile batarya arasına seri bir regülatör yerleştirilir. MPPT algoritması tarafından kontrol edilen güneş panellerinden maksimum enerji verimliliği sağlama amacıyla kullanılan, anahtarlama DA/DA dönüştürücü ile fotovoltaiik sistemlerin kullanımına dayanır. Bu yöntemde artık enerji oluşmaz çünkü bu teknikte güç ihtiyacı azaldıkça maksimum tepe noktasından uzaklaşarak çalışılır. MPPT tekniğinde seri bir PWM kontrollü regülatör kullanıldığı için PWM kontrolcü de tasarıma eklenir. Bu kontrolcüler anahtarlama sırasında geçici durum ve gürültülere sebep olabildiğinden, EMI kaynaklı gürültüleri bastırmak için filtre kullanımı gerekir. Bu durum uydu ekipmanlarına boyut ve ağırlık eklemektedir [6]. Ayrıca araya seri eklenen dönüştürücü hacim kaplar ve anahtar kayıpları da sisteme eklenir.

MPPT sistemleri, S3R topolojisine kıyasla daha fazla karmaşıklık ve özel donanım gerektirir. Uzun koşulları için tasarlanan sistemlerin hata olasılığının düşük, olabildiğince az malzemeli ve basit yapılı olması istenir. S3R teknolojisine kıyasla daha fazla malzeme içerdiği için maliyeti de daha yüksektir. MPPT sistemlerinin kontrolü daha zordur ve izlenebilirlik gerektirir. Bu da uzayda çalışacak bir ekipman tasarımı için bazı zorlukları beraberinde getirir. Çünkü bu analog bir şekilde kontrol edilmeyen sistemde kontrol döngülerinin, bağlantıların ve yazılımların izlenip, gerek duyulduğunda güncelleme ihtiyacı doğurabilmesi demektir.

MPPT topolojisiinde araya seri bir dönüştürücü koyulduğundan dolayı kayıpları yüksektir. Bu anahtarlamalı devrenin kayıpları uydu gövdesi içinde birikir ve ısı olarak problem oluşturur. Ancak S3R sistemlerinde şönt modunda ihtiyaç fazlası güç panelin kısa devre akımı çekmesiyle güneş paneli üzerinde harcanır ve ısıya ekipman dışında kalması sağlanır.

Şönt düzenleme işlevi açısından, S3R ve S4R hem basit ve güvenilir devre hem de yüksek verimlilik avantajlarıyla aynıdır. Yüksek yörüngeli uydular için, uzun güneşlenme süresi, kısa güneş tutulması süresi ve şarj gücünün toplam uydu gücüne oranının küçük olması nedeniyle S4R devresinin kullanılması gerekli değildir. Ek olarak, yüksek yörüngeli bir uydudaki batarya grubunun deşarj derinliği büyük olduğundan, şarj ve deşarj sürecindeki gerilim değişimi aralığı oldukça geniş olacak ve güneş enerjisi dizisinin şarj edilmesinin güç kullanım oranı oldukça düşük olacaktır. Ayrıca S4R maksimum batarya geriliminin bara geriliminden yüksek olmadığı uygulamalarda kullanılır. S3R; MPPT ve S4R'a göre daha basit, az malzemeli, hata yapma ihtimali düşüktür. S3R devrelerinde hücre başına tek anahtar kullanılması, S4R'da ise anahtar sayısının fazla olması nedeniyle devrenin kontrolü zorlaşmakta ve hata yapma ihtimali de yükselmektedir. Sıralanan nedenlerden ötürü bu tez kapsamında S3R devresi tercih edilmiştir [40].

3. ANALİZLER

S3R tasarımı yapılırken sistemin ısı ve elektriksel olarak tepkileri dikkate alınmalı ve boyutlandırma yapılırken analize yer verilmelidir. Kablonun endüktansı ve güneş panelinin parazitik kapasitansı arasındaki rezonans durumu da sistemin karakteristiğini etkilemektedir.

3.1. Ana Hata Yükseltici Parametrelerinin Hesaplanması

Ana hata yükseltici (AHY) sinyali PI kontrolcüsü kullanılarak üretilmiştir. Regülasyonu sağlamak için ana bara, gerilim bölücü kullanılarak belirli bir değere düşürülür. Bu değer önceden bilinen sabit bir gerilim referansı ile karşılaştırılır. Bir hatadan dolayı regülasyon bozulursa veya karşılaştırıcı girişleri arasında gerilim farkı oluşursa bu hata yükseltici devre oransal kazanca ve integral kazanca göre yükseltilir.

Parazitik kapasitans, kablo endüktansı ve akım limitleyici endüktörler yüzünden sistemin tepkisinde yavaşlamalar gözlemlenebilir. Şönt modunda yaşanan gecikmeler komponentlerden kaynaklanırken, güneş panellerinin parazitik kapasitansı ana bara oluşumunda gecikmelerine yol açar. Ayrıca pasif limitleyici endüktörün değeri çok büyük seçilirse bu gecikmeler de artar. Bu yüzden sistem tasarlanırken akım limitleme zaman gecikmesi hususları da dikkate alınmalıdır. [26]. Sistem gereksinimleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Tasarımı yapılacak sistem 400W güce ve 28V ana bara gerilimine sahiptir. 80W güce sahip güneş paneli hücreleri kullanılmaktadır. Buradan hareketle her bir güneş panelinin akımı 2,86A olarak hesaplanmıştır. Kablonun endüktansı literatür araştırılarak 1 μ H olarak alınmıştır [26]. GaAs güneş panellerinde Amper başına düşen parazitik kapasitans 210nF’tır [35]. Buna göre tasarımda bulunan güneş paneli akımı değerine göre parazitik kapasitans 572 nF olarak hesaplanmıştır. Bölüm 1’de de bahsedildiği gibi tam regüle bara yapısındaki izin verilen ana bara dalgalanması toleransı 1% olarak alınmıştır. Beş S3R hücresinin kontrolü için farklı referans değerleri kullanılmıştır. Bu değerlerden en düşük referans geriliminin alt limiti ve en yüksek referans geriliminin üst limiti çizelgeye eklenmiştir. PI kontrol devresinde referans gerilimi olarak 5V kullanılmıştır. S3R anahtarlama frekansı 5 kHz olarak kabul edilmiştir. Pratikte kapasitörler için PCB’de

yeteri kadar alan bulunmadığında frekans artırılarak ana bara kapasitörü değeri düşürülebilir.

Çizelge 3.1. Sistem gereksinimleri

Ana bara Gerilimi (V_{bus})	28 V
Güneş Paneli Akımı (I_{FV})	2,86 A x5
Güç (P_{Bara})	400 W
Panel Gücü (P_{FV})	80 W
Kablo Endüktansı (L_H)	1 μ H
Parazitik Kapasitans (C_{FV})	572 nF x 5
Gerilim Dalgalanması	1%
Referans gerilimi alt limiti (V_{UTP5})	7V
Referans gerilimi alt limiti (V_{LTP1})	3 V
Referans Gerilim(V_{ref})	5 V
Dalgalılık frekansı (f_{sw})	5 kHz
S3R hücresi elektronik gecikmeleri (τ_e)	1 μ s

Her bir katman 80W olacak şekilde tasarlanmıştır, sistemin güç ihtiyacı ise 400W olarak Çizelge 3.1’de verilmiştir. Kullanılacak katman sayısı “N” ile gösterilir. Eş. 3.1’deki gibi hesaplanır.

$$N = \frac{P_{Bara}}{P_{FV}} \quad (3.1)$$

$$N = \frac{400}{80} = 5$$

Aşama 1 – Hücrenin şönt modundaki gecikmeleri temel olarak elektroniklerden

kaynaklanmaktadır. Ana barada oluşan gecikmeleri ise güneş panelinin parazitik kapasitansının şarjı oluşturur. Tasarım parametreleri belirlenirken gecikmeler de dikkate alınmalıdır.

S3R hücrelerin bölümlerinin sayısı iki katına çıkarsa panel akımı yarıya düşer. Şönt modu gecikmeleri güneş paneli akımına bağlı olmadığı için gecikmeler de değişmez. İletim modu gecikmelerinde ise gecikme parazitik kapasitansın akıma oranına bağlıdır. Akımla doğru orantılı olarak parazitik kapasitans da değiştiği için gecikmeler sabit kalır.

Şönt modu gecikmeleri τ_{on} ile iletim modu gecikmeleri τ_{OFF} ile gösterilmiştir. S3R hücresinde şönt modunda ve iletim modunda oluşan gecikmeler Eş. 3.2'deki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned}\tau_{on} &= \tau_{e^-} = 1\mu s \\ \tau_{OFF} &= \tau_{e^-} + \frac{C_{FV}V_{bara}}{I_{FV}} + 2\sqrt{L_H C_{FV}} \\ \tau_{OFF} &= 1\mu s + \frac{(572.10^{-9}).(28)}{2,86} + 2\sqrt{(1.10^{-6}).(572.10^{-9})} = 8\mu s\end{aligned}\tag{3.2}$$

Aşama 2 – En yüksek frekans için ana bara gerilim dalgalanması Eş. 3.3'teki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned}\Delta V_{\text{ripple},fmax} &= \frac{I_{FV}}{4C_{bara}f_{sw}} \\ \Delta V_{\text{ripple},fmax} &= \frac{2,86}{4.(0,4.10^{-3}).(5.10^3)} = 0,357\text{ V}\end{aligned}\tag{3.3}$$

Aşama 3- Yapılacak analizlerde mosfet 'in açılma ve kapanma gecikmeleri ayrı ayrı hesaba katılmamıştır. Buna göre mosfet açılma ve kapanma gecikmeleri ihmal edildiğinde isterlere uygun olarak ana bara gerilim dalgalanması Eş. 3.4'teki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned}\Delta V_{\text{ripple}} &= \Delta V_{\text{ripple},fmax} - \frac{I_{FV}}{2C_{bara}}(\tau_{OFF} + \tau_{ON}) \\ \Delta V_{\text{ripple}} &= 0,357 - \frac{2,86}{2(0,4.10^{-3})}(8.10^{-6} + 1.10^{-6}) = 0,32\text{ V}\end{aligned}\tag{3.4}$$

Aşama 4- Ana hata yükseltici tasarımı için oransal integral kontrolcü tasarlanır. Referans gerilimi ana hata yükselticinin bant genişliği referansıdır. K kazancı, ana bara geriliminin direnç bölücüsünü temsil eder. Eş. 3.5 ile hesaplanır.

$$K = \frac{V_{ref}}{V_{bus}} \quad (3.5)$$

$$K = \frac{5}{28} = 0,179$$

Aşama 5- Analizlerde, AHY kazancının hiçbir integral alıcı bileşen içermediği varsayılmıştır. Buna göre A oransal kazancı skaler kabul edilmiştir. Çünkü düşük frekanslarda AHY sinyalinde oransal kazanç integral kazancına ağır basmaktadır ve integral kazancı S3R'ın akım tepkisi üzerinde önemli bir etkisi yoktur, bu nedenle integral kazancı ihmal edilmiştir. Bu nedenle A, ana hata yükseltici kazancı olur. AHY sinyalinin oransal kazancı Eş. 3.6'daki gibi hesaplanır.

$$A \leq \frac{V_{UTP5} - V_{LTP1}}{K \left(\Delta V_{ripple} \Big|_0 + (N-1) \frac{I_{FV}}{C_{bara}} \tau_{OFF} \right)} \quad (3.6)$$

$$A \leq \frac{(7-3)}{(0,179) \left(0,32 + (5-1) \frac{(2,86)}{0,4 \cdot 10^{-3}} (8 \cdot 10^{-6}) \right)} = 40,72$$

Aşama 6 –AHY gerilim aralığı için her bir bölümdeki pozitif ve negatif gerilimler arasındaki histerezis aralığı hesaplanır. Histerezis geriliminin maksimum değeri Eş. 3.7'deki gibi hesaplanır.

$$V_{hyst} = K \cdot A \cdot \Delta V_{ripple} \Big|_0 \quad (3.7)$$

$$V_{hyst} = (0,179) \cdot (40,72) \cdot (0,32) = 2,3 \text{ V}$$

Aşama 7 –Sıralı bölümlerde iki pozitif veya iki negatif gerilim arasındaki mesafe Eş. 3.8 ile hesaplanır.

$$\Delta V_{th} = \frac{(V_{UTP5} - V_{LTP1}) - V_{hyst}}{N-1} \quad (3.8)$$

$$\Delta V_{th} = \frac{(7-3) - (2,3)}{(5-1)} = 0,4 \text{ V}$$

Aşama 8- G parametresi aktarım iletkenliği ile ifade edilir ve S3R akımının Ana hata yükseltici gerilimine oranına eşittir. Aktarım iletkenliği değeri hesabı Eş. 3.9 ile gösterilmiştir.

$$G = \frac{I_{FV}}{\Delta V_{th}}, \quad (3.9)$$

$$G = \frac{(2,86)}{(0,4)} = 7,15 \text{ A/V}$$

Aşama 9 – Ana bara empedansının minimum değeri Eş. 3.10 ile hesaplanır.

$$Z_{S3R}^- = \frac{1}{KAG} = 20 \text{ m}\Omega \quad (3.10)$$

$$Z_{S3R}^- = \frac{1}{(0,179)(40,72)(7,15)} = 20 \text{ m}\Omega$$

Aşama 10 – Ana bara empedansının maksimum değeri Eş. 3.11 ile hesaplanır.

$$Z_{S3R}^+ = \frac{1,5}{KAG} \quad (3.11)$$

$$Z_{S3R}^+ = \frac{1,5}{(0,179)(40,72)(7,15)} = 30 \text{ m}\Omega$$

Aşama 10 – AHY devresinin sıfır noktasındaki frekansı Eş. 3.12. ile hesaplanır [26].

$$\frac{1}{\tau_{OFF}} = (125 \cdot 10^3)(2\pi) \text{ rad} \quad (3.12)$$

$$\frac{1}{8 \cdot 10^{-6}} = (125 \cdot 10^3)(2\pi) \text{ rad}$$

$$\omega_{zero} = 785398 \text{ rad}$$

Bara kapasitansı Eş. 3.13. ile hesaplanır [21].

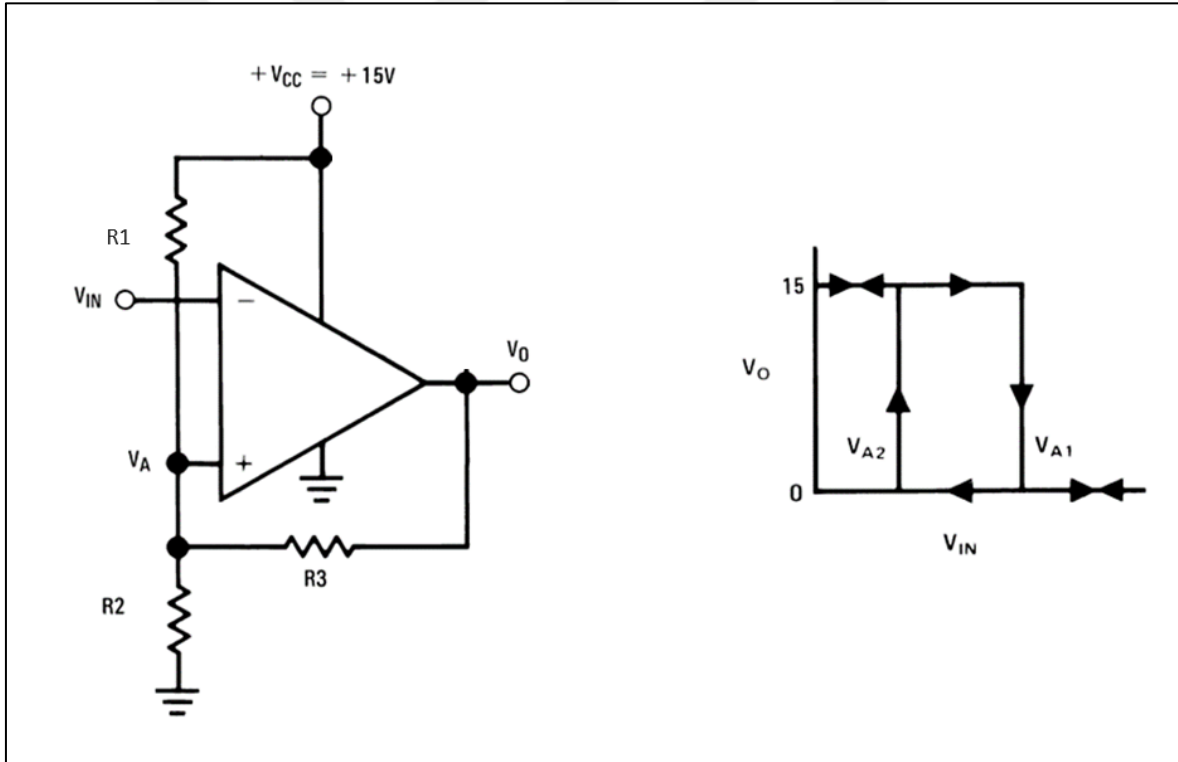
$$C_{bara} = \frac{I_{FV}}{4\Delta V_{\text{ripple, fmax}} f_{sw}} \quad (3.13.)$$

$$C_{bara} = \frac{2,86}{4 \cdot (0,357) \cdot (5 \cdot 10^3)} = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ F}$$

3.2. Histerezis Karşılaştırmalı Dirençlerinin Hesaplanması

S3R da ana hata yükseltici sinyalinin gerilimine göre değişen ve histerezis içeren devre Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Bu histerezis aralığı referans gerilimi oluşturulurken belirlenen eşik gerilimleri arasındaki farka eşittir. Belirtilen devre histerezise sahip, eviren bir karşılaştırmalıdır.

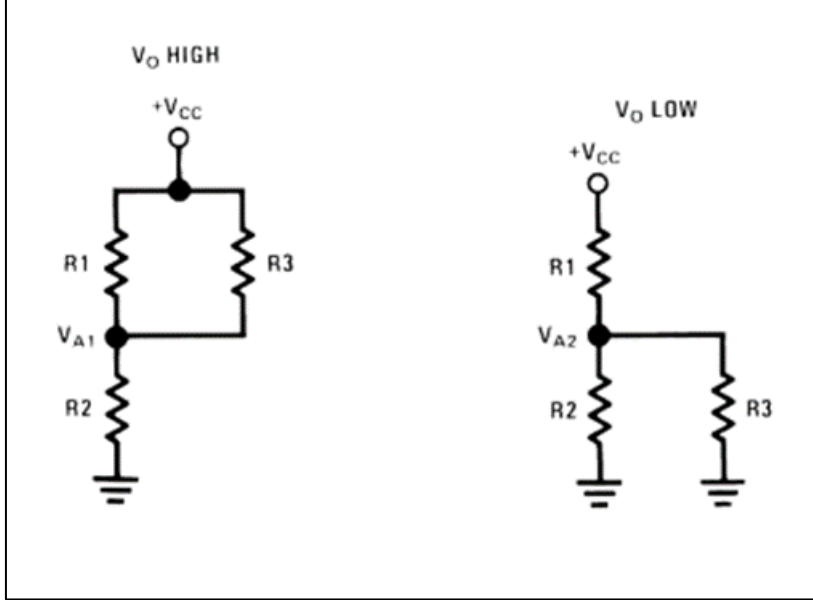
Histerezisi karşılaştırmalıının geri besleme döngüsüne koymak, dalgalanmayı azalmaktan başka işlevlere de sahiptir. Önceden ayarlanan tetikleme noktalarıyla Schmitt tetikleyicisi olarak işlev görür. Çıkış geriliminin durumu değiştiğinde referans geriliminin kaydırılmasıyla histerezis elde edilir.



Şekil 3.1. Eviren histerezis karşılaştırmalı

Karşılaştırmalıının yüksekten düşüğe ve düşüktən yükseğe geçiş yapacağı zaman için anahtarlama eşikleri seçilir. V_{LTP} , karşılaştırmalı çıkışının düşük seviyeye geçmesi için gerekli giriş gerilimidir ve V_{UTP} , karşılaştırmalıının yüksek çıkış yapması için gerekli giriş gerilimidir. Histerezis grafiğine Şekil 3.1’de yer verilmiştir. Karşılaştırmalıının belirlenen histerezis aralığında çalışabilmesinin hesaplanabilmesi için iki çalışma durumu için

dirençlerin eşdeğerleri Şekil 3.2’te verilmiştir. Bu hat yalnızca üç direnç gerektirir ve karşılaştırıcının pozitif beslemesi $+V_{CC}$ ’ye referanslıdır. Bu ağ $+V_{CC}$ ile toprak arasında, R_1 ve R_2 ’den oluşan bir direnç bölücü, alternatif olarak $+V_{CC}$ ’ye veya toprağa bağlanan üçüncü direnç olan R_3 ile modellenebilir.



Şekil 3.2. Histerezis karşılaştırıcı direnç konfigürasyonları

Bu devreyi analiz etmek için, evirici girişindeki giriş geriliminin (V_{IN}) V_A ’dan düşük olduğunu varsayalım. Karşılaştırıcının çıkışı yüksek olacaktır ($V_o = +V_{cc}$). Üst eşik gerilimi V_{A1} Eş. 3.14 ile tanımlanır.

$$V_{A1} = +V_{CC} \cdot \frac{R_2 \parallel R_3}{R_2 + R_1 \parallel R_3} \quad (3.14)$$

$$V_{A1} = +V_{CC} \cdot \frac{R_2(R_1 + R_3)}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

Giriş gerilimi V_{IN} referans geriliminin üzerine çıktığında ($V_{IN} > V_{A1}$), çıkış gerilimi toprağa çekilir. ($V_o = GND$). Alt eşik gerilimi V_{A2} Eş. 3.15 ile tanımlanır.

$$V_{A2} = +V_{CC} \cdot \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + R_2 \parallel R_3} \quad (3.15)$$

$$V_{A2} = +V_{CC} \cdot \frac{R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

Giriş gerilimi V_{IN} , V_{A2} 'ye veya daha düşük bir değere düştüğünde çıkış tekrar $+V_{CC}$ olur. Bu yapı tarafından sağlanan toplam histerezis (ΔV_A) Eş. 3.16 ile tanımlanır.

$$\Delta V_A = V_{A1} - V_{A2} \quad (3.16)$$

$$\Delta V_A = \frac{+V_{CC}R_1R_2}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}$$

Bu denklemler kullanılarak direnç değerleri Eş. 3.17 ve Eş 3.18. ile belirlenir.

$$n = \frac{\Delta V_A}{V_{A2}} \quad (3.17)$$

$$n = 0,105$$

$$R_3 = 50.10^3 \Omega \text{ seçilmiştir.}$$

$$R_1 = nR_3 \quad (3.18)$$

$$R_1 = 5,25.10^3 \Omega$$

Histerezis gerilimi 1V olacak şekilde R2 direnci Eş 3.19. kullanılarak hesaplanır. Op-amp 15V ile beslenmiştir ve op-amp'ın pozitif besleme gerilimi $+V_{CC}$ ile gösterilmiştir [44].

$$\Delta V_A = +V_{CC} \cdot \frac{R_1R_2}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3} \quad (3.19)$$

$$1 = 15 \cdot \frac{(5,25.10^3)(R_2)}{(5,25.10^3)(R_2) + (5,25.10^3)(18,77.10^3) + (R_2)(18,77.10^3)}$$

$$R_2 = 1,8.10^3 \Omega$$

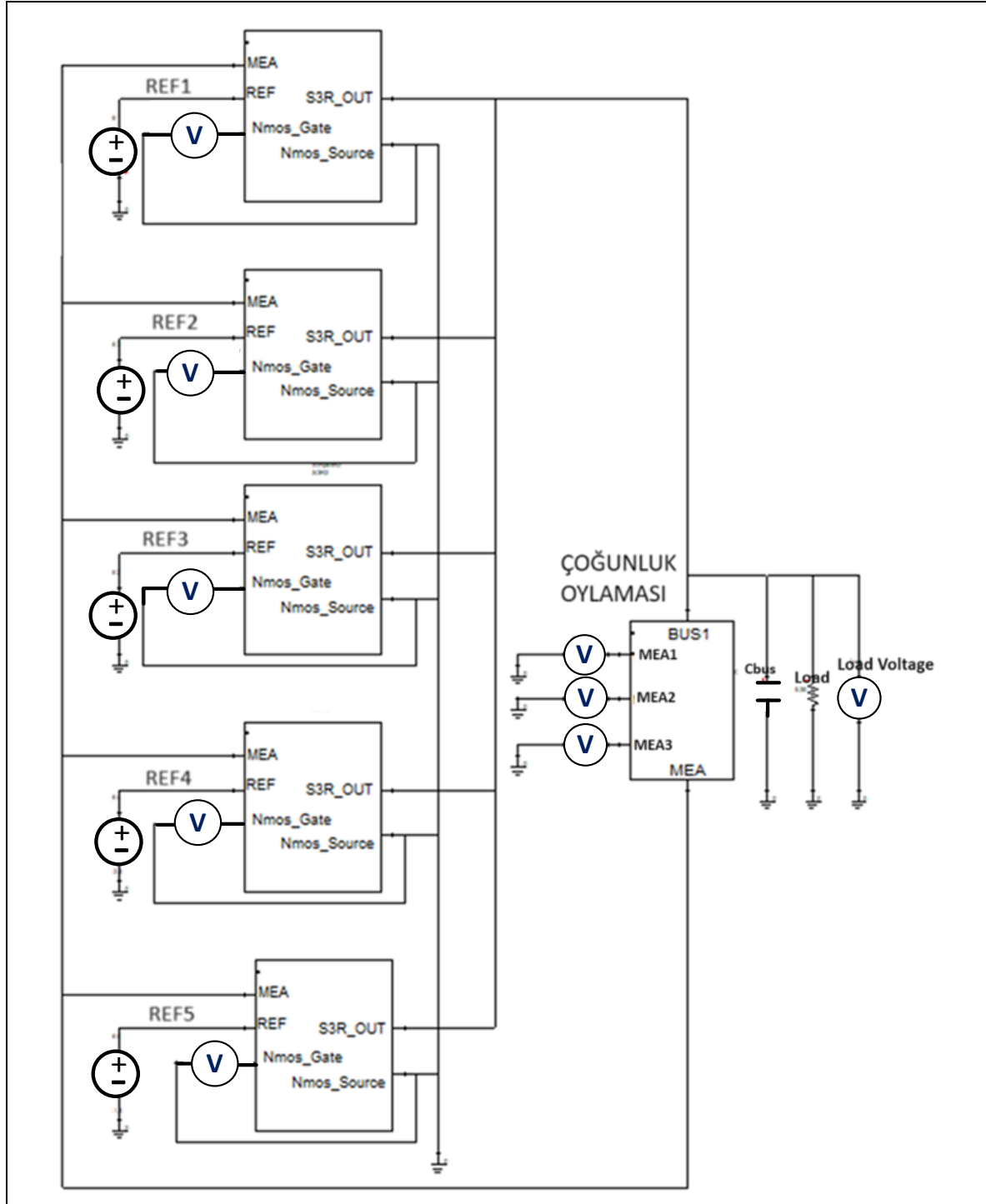
4. S3R TASARIMI

Bu bölümde tasarımı yapılan S3R sistemine ait bloklarının tanıtımı benzetim programındaki bloklar üzerinden yapılacak olup, sonrasında bloklara ait detaylar her bir ilgili bloğun iç yapısına ait görseller üzerinden verilecektir.

S3R topolojisi sıralı olarak çalışan, birbirine paralel bağlanan birden çok katmana sahiptir. Katmanlar sırayla çalışır. Hücrelerin biri dışında hepsi ya iletim ya şönt modunda çalışır. Anahtarlama modunda çalışma ise yüklerin ihtiyaç durumuna göre katmanların yalnızca birinde gerçekleşir.

Bu bölümde 400W güce ve 28V regüle ana baraya sahip bir uydu için ana bara güç regülasyon sisteminin benzetim çalışması Şekil 4.1'deki gibi kurgulanmıştır. Beş adet S3R devresi birbirine paralel bağlanmıştır ve bu bloklar sıralı olarak çalışacaktır. Her bir blok 80W olacak şekilde toplamda 400W olarak tasarım yapılmıştır.

Çoğunluk oylaması bloğundan gelen ana hata yükseltici sinyali ile her katmana farklı değerlerde giren referans sinyali kontrol işaretini üretmektedir. S3R topolojisinde kullanılan mosfet anahtarının kapı ve kaynak gerilimlerini izleyebilmek için bu sayfaya voltmetre de eklenmiştir. Her bloktaki S3R_OUT sinyali diyotlarla ortaklanmış ana barayı göstermektedir.

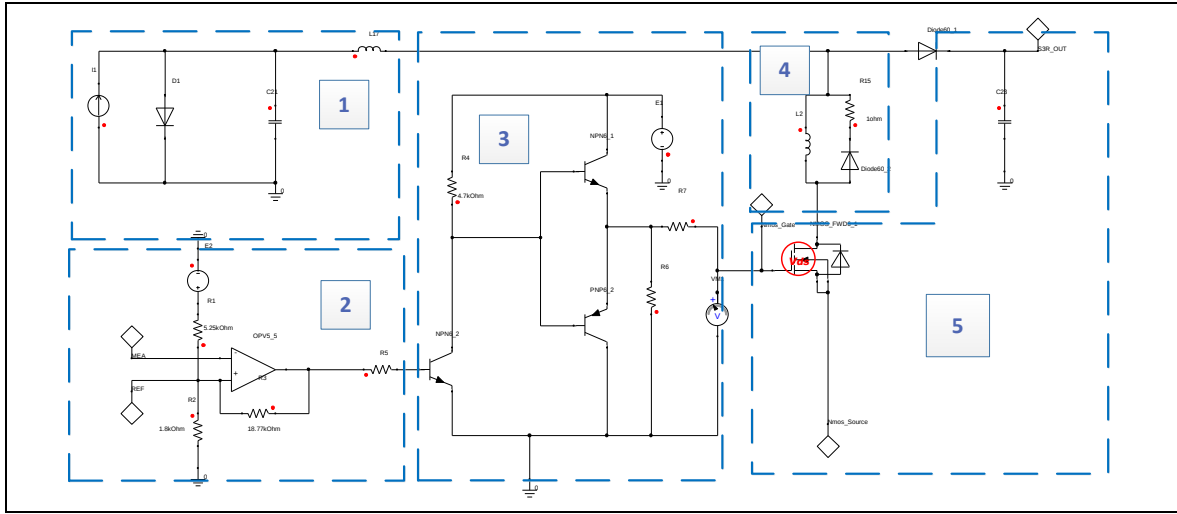


Şekil 4.1. Ana bara güç regülasyon sisteminin bloklar halindeki tasarımı

Şekil 4.2’de beş bloklı S3R sisteminin bir bloğunun tasarımı gösterilmiştir. 1 numara ile gösterilen bölüm güneş panelinin eşdeğer devresi, 2 ile gösterilen bölüm histerezis karşılaştırıcısı, 3 ile gösterilen bölüm kapı sürücü devresi, 4 ile gösterilen bölüm pasif akım sınırlama devresi, 5 ile gösterilen bölüm S3R devresidir. Bu sayfada gösterilen devreler beş adet olmak üzere ve özdeş olarak tasarlanmıştır. Sistem şönt elemanlar tarafından açma

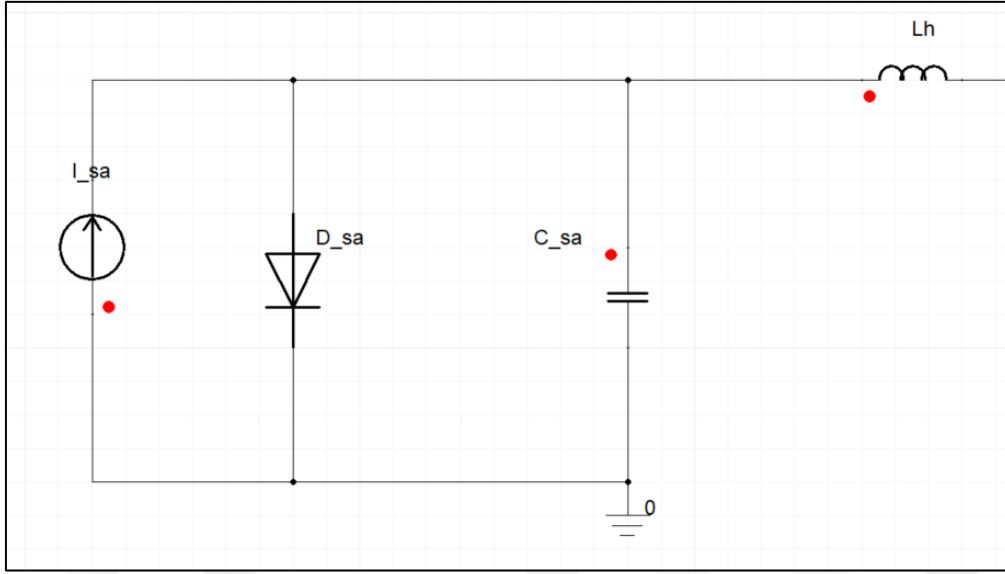
kapama anahtarlama şeklinde kontrol edilen beş bölüme ayrılmış bir güneş paneli dizisine sahiptir.

S3R hücreleri sayısının artması her bir hücre başına düşen akımı azaltır, bu da ana baradaki akım dalgalanmalarını azaltarak daha düzgün bir akım profili elde edilmesine neden olur. 5 numaralı bölgede gösterilen kapasitör ana bara kapasitörüdür, bara gerilimini üzerinde tutar. Ana bara gerilimi ana bara kapasitörü tarafından filtrelenir ve yüklerle sağlanır.



Şekil 4.2. Bir S3R bloğunun şematik tasarımı

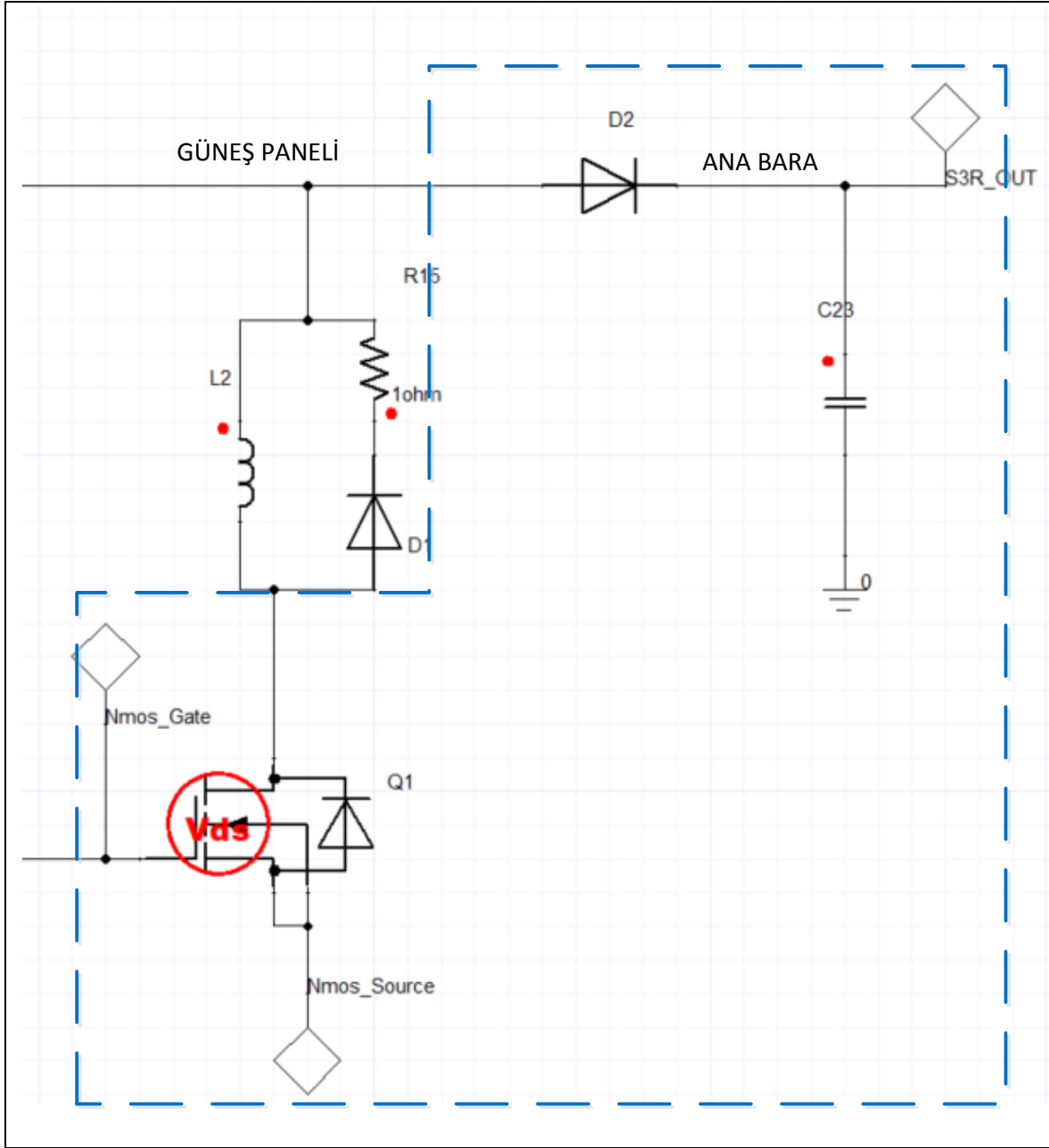
Güneş paneli; akım kaynağı (I_{sa}), akım kaynağına paralel bir diyot (D_{sa}) ve güneş panelinin parazitik kapasitansını modelleyen kapasitör (C_{sa}) kullanılarak eşdeğer devre gösterimi ile modellenmiştir. Güneş paneli ideal kabul edilmiştir [43, 45]. Kablajdan kaynaklanan endüktif etki ise endüktans (L_h) ile modellenmiştir. Her bir güneş panelinin kendine atanmış bir mosfet anahtarı vardır. 2,86 Amperlik sabit akım kaynağının akım değeri hesaplanırken 400W'lık sabit güç, ana bara gerilimine bölünmüştür. Hesaplanan toplam akım beş devre için hesaplanmıştır.



Şekil 4.3. Güneş panelinin modellenmesi

Şekil 4.4 S3R dönüştürücünün devre konfigürasyonunu göstermektedir. Güneş paneli beş bölüme ayrılmıştır ve her bölüm paralel olarak şönt anahtara bağlıdır. C_sa kapasitörü güneş panellerinin parazitik kapasitansını modellemek için eklenmiştir. Q1 anahtarı iletimdeyken, güneş paneli toprak ile kısa devre olur. Regülatör fazla enerjiyi ısıya çevirir ve bu ısıyı güç kaynağı kutusu veya ısı borusu aracılığıyla uydunun ısı radyatörüne iletir [46]. Bu durumda D2 diyodu ters kutuplama modundadır ve iletime geçemez. Q1 anahtarı açık olduğunda D2 diyodu ileri kutuplama modundadır. Güneş panelinden gelen enerji ana barayı besler.

Ayrıca D2 diyodu, Q1 anahtarı kapalıyken ana baranın bara kapasitörü üzerinden deşarj olmasını engeller ancak iletim kayıplarını arttırır. Fotovoltaik panellerin çıkışları “veya” bağlantısı ile ortaklanmıştır.

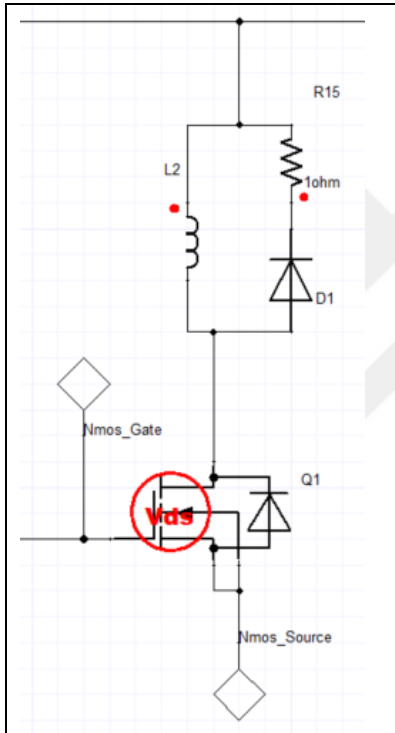


Şekil 4.4. S3R hücresi şematik gösterimi

Parazitik kapasitansın etkisini azaltmak ve EMI problemini azaltmak için Şekil 4.5'te gösterildiği üzere bir akım sınırlama devresi tasarlanmıştır. Bu devre ile anahtarlama kaybında çok az bir artışla şönt elemanın akım değişim oranını (di/dt) kontrol eden bir akım sınırlama devresi geliştirilmiştir. Pasif akım limitleyici olarak endüktör kullanılmıştır ve endüktör şönt yoluna yerleştirilmiştir. Parazitik kapasitansta depolanan enerji akım sınırlama endüktörüne ve kablo endüktansına aktarılır, bu endüktör yardımıyla akım sınırı ayarlanabilir.

Mosfet açıldığında hattaki akıma yol vermek için tasarıma endüktöre paralel serbest dolaşım diyodu eklenmiştir. Mosfet kesim moduna geçse bile endüktör üzerindeki akım birden kesilmez ve endüktör üzerinde enerji birikir. Mosfet iletimden kesime geçtiğinde ters EMK etkisinden dolayı serbest dolaşım diyodu iletime girerek, birikmiş enerji 1 ohm direnç üzerinde harcanır.

Pasif akım limitleme endüktörü pratikte güneş paneli akımının 3,5-4,5 katına yakın olacak şekilde koyulur. Bölüm 6’ da şönt hattın geçen akımı gösteren grafiklere yer verilecektir.

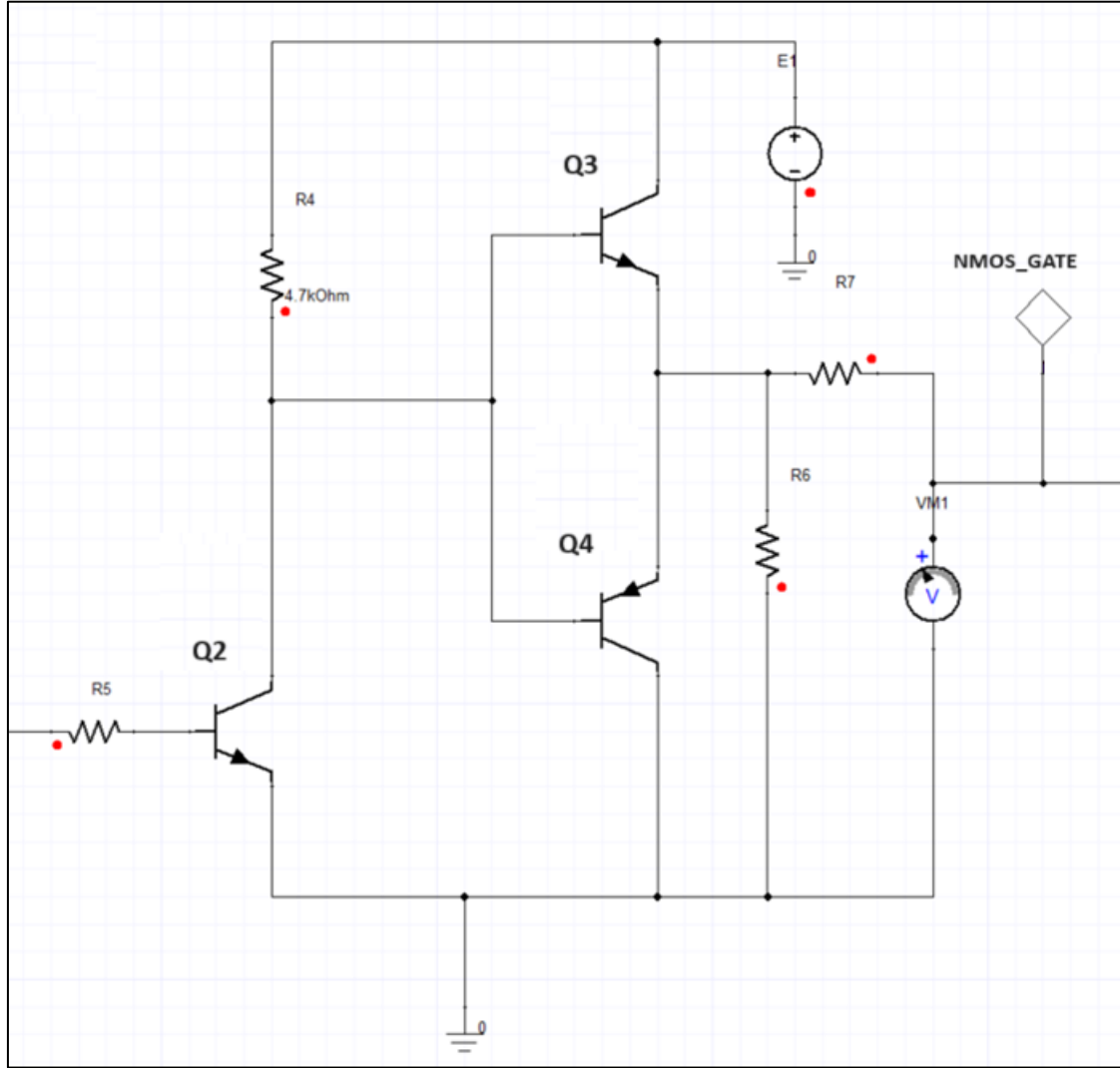


Şekil 4.5. Akım sınırlandırma devresi şematik gösterimi

S3R devresindeki şönt mosfet’i sürebilmek için Şekil 4.6’da gösterildiği üzere push-pull tipi sürücü kullanılmıştır. Çünkü AHY sinyali ile referans sinyal karşılaştırılarak üretilen kontrol sinyalin akımı, şönt mosfet’in gate-source ve gate-drain kapasitörlerini şarj/deşarj etmeye yetmez.

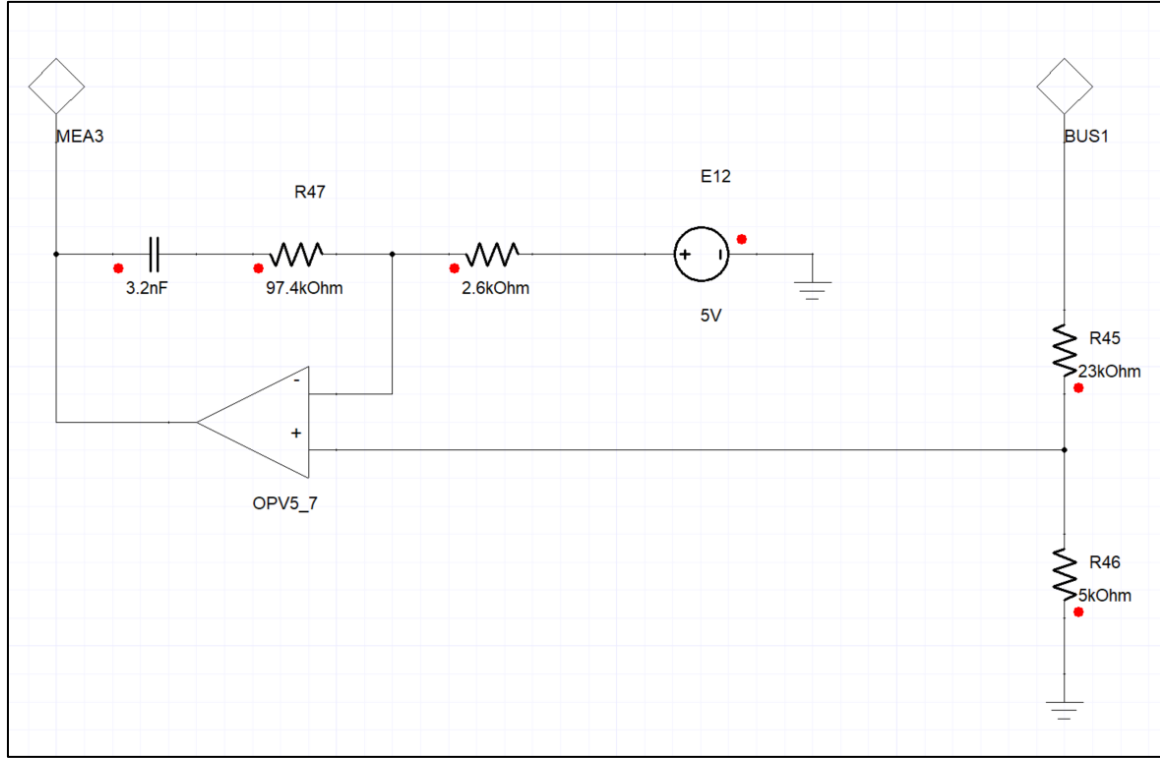
Referans sinyali MEA sinyalinden küçük olduğunda Q2 transistörü kesimde kalır. 15V besleme gerilimi Q3 transistörünün base terminaline gelerek transistörü iletime geçirir. Mosfet’in giriş kapasitörleri şarj edilir, Mosfet’in iletime girmesinde gecikme olmaz. Referans sinyali MEA sinyalinden büyük olduğunda Q2 ve Q4 transistörü iletime girer.

Önceden şarj olmuş mosfet'in giriş kapasitansı deşarj olur böylelikle mosfet iletimden çıkar. Sadece tek darbe ile iki BJT de kontrol edilir. Bu devreye push-pull yükseltici de denir. Çünkü akım ile mosfet'in giriş kapasitansları şarj ve deşarj edilir.



Şekil 4.6. Sürücü devresi şematik gösterimi

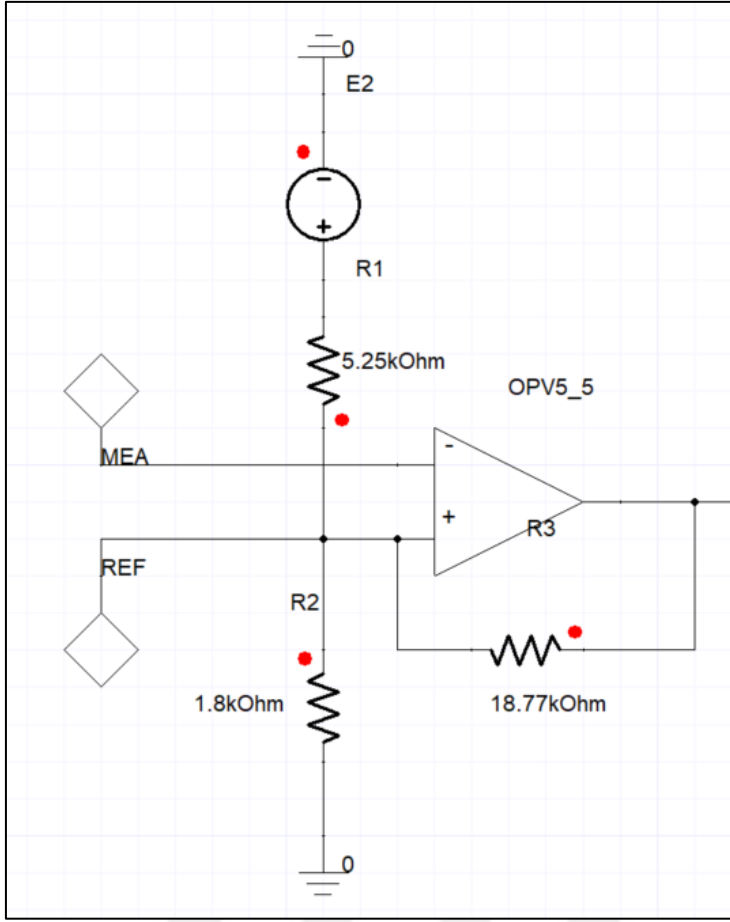
Ana hata yükseltici devresi olarak oransal-integral kontrol devresi kullanılmıştır. Sistemin bara gerilimi olan 28V gerilim bölücü kullanılarak 5V'a düşürülür. Girişlerden diğerinde ise sabit 5V referans vardır. K faktörü ile ana bara örneklenir. Bu iki giriş arasındaki fark hesaplanarak hata gerilimi üretilir ve PI devresinin kazancı oranında bu sinyal yükseltilir. Bu hata gerilimi ana baranın gerilimini kontrol eder. Devrenin çıkış sinyali histerezis kontrol devresine girer.



Şekil 4.7. Ana hata yükseltici devresi şematik gösterimi

Şekil 4.8 ile gösterilen histerezis kontrol devresi için kullanılan referanslar beş adet S3R hücresini kontrol etmek için beş farklı seviyeye bölünmüştür. Bu yapıda eviren tipte histerezis karşılaştırıcı kullanılmıştır. Bu devre REF ve MEA sinyallerinin hangisinin büyük veya küçük olduğuna karar verilmesi amacıyla kurgulanmıştır. REF sinyali MEA sinyalinden büyük olduğu zaman totem pole sürücü kullanılarak oluşturulan devrenin çıkışı n kanal mosfet'i süremez. Enerji S3R topolojisiinde kullanılan diyot yardımıyla yüklere aktarılır. REF sinyali MEA sinyalinden küçük olduğu zaman ise mosfet ilettime geçerek fazla enerjiyi atar. REF sinyali MEA sinyaline eşitse, ilgili regülasyon kesimi anahtarlama modunda çalışır.

Şönt anahtarların sürme sinyallerini oluşturmak için her biri için farklı referans gerilimleri ile önceden belirlenmiş bir hata sinyali gerilimi eşliğinde histerezis ile açılıp kapanacağı şekilde kontrol eder, bu referans gerilimleri bölümlerin her biri kademeli olacak şekilde düzenlenir. Farklı histerezis karşılaştırıcılarının referans gerilimleri farklı seviyelerde belirlendiğinden MEA histerezis bantları sırayla artar. Bu nedenle, kararlı durumda yalnızca bir bölüm anahtarlama modunda çalışır, diğerleri ise sürekli olarak açık veya kapalı kalır.



Şekil 4.8. Histerezis kontrolcü devresi şematik gösterimi

Üç hata yükselticisinden gelen üç hata yükseltici sinyali sırasıyla AHY1, AHY2 ve AHY3 olarak temsil edilir. Hata olmadığı durumda üç hata yükseltici sinyali aynı değerde olması beklenir. Ancak arıza durumunda hata yükseltici sinyallerinden biri diğer ikisinden farklı olacaktır.

Şekil 4.9’da birbiri ile özdeş üç adet hata yükseltici devresi mevcuttur. AHY devresi uydunun güç regülasyonu için kritik bir öneme sahip olduğu için çoğunluk oylaması kullanılarak güvenilir bir sinyal elde edilir. Negatif geri beslemeye sahip op-amp’lara bu hata sinyalleri ikiyeşerli olarak girer.

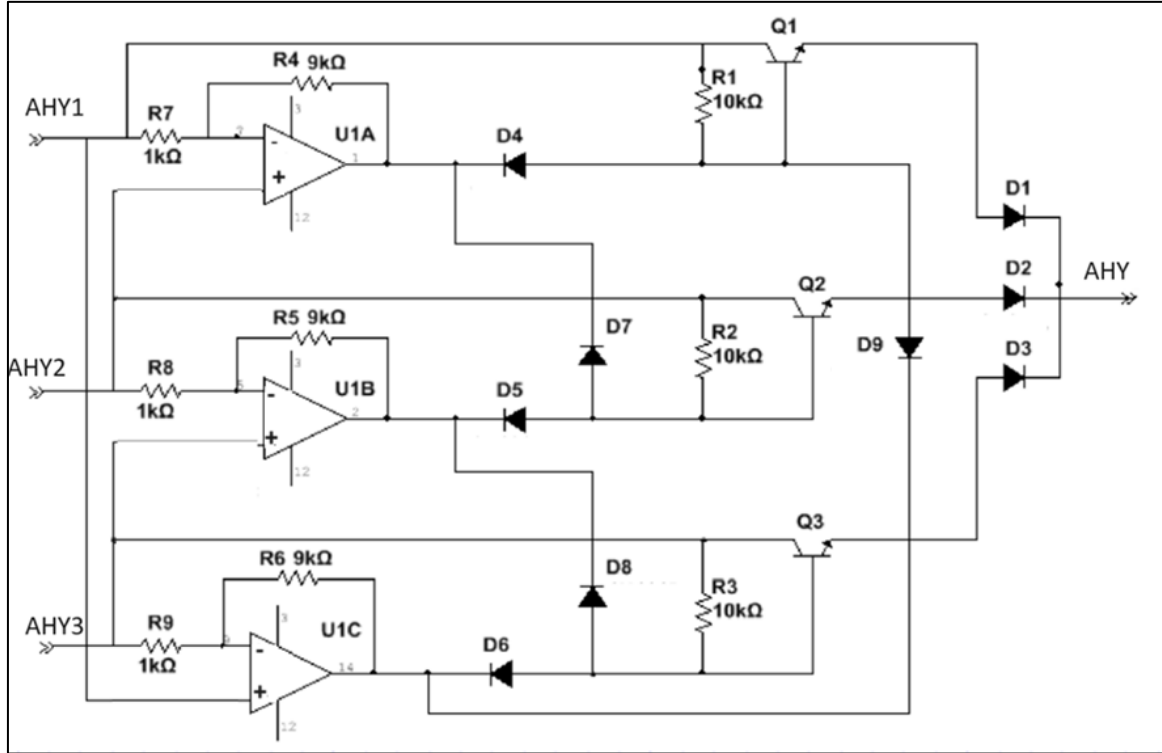
Şekil 4.9’a bakıldığında U1A op-amp’ının eksi ve artı girişlerine sırasıyla AHY1 ve AHY2 girmektedir, U1B op-amp’ına AHY2 ve AHY3, U1C op-amp’ına ise AHY3 ve AHY1 girmektedir. Op-amp’lar +15V ve -15V ile beslenmiştir. Op-amp’lar negatif geri beslemeye sahip olduğu için op-amp’ın negatif girişi ile pozitif girişteki gerilimleri eşit

olmalıdır. Bu kuraldan hareketle op-amp'ın pozitif ucundaki sinyal negatif girişe eşitlenerek geri besleme direncinden geçen akımın yönü ve büyüklüğü belirlenir, bu şekilde çıkış gerilimi hesaplanır. Op-amp'ın karakteristiğinin rail to rail yapıda olduğu varsayılmaktadır.

Devrenin çalışma mantığını açıklamak için AHY1'e 9V, AHY2'ye 9V değerini verip, AHY3'e kasıtlı olarak hata yaptırılmış ve 4V olarak kabul edilmiştir. U1A op-amp'ında iki girişe de 9V girdiği için op-amp'ın negatif girişindeki dirençlerde bir gerilim farkı oluşmaz ve çıkışta 9V gözlemlenir. D4 ve D7 diyotları iletime geçemez. AHY1 sinyali R1 üzerinden Q1 transistörünü iletime geçirir ve AHY1 sinyali çıkışa aktarılır.

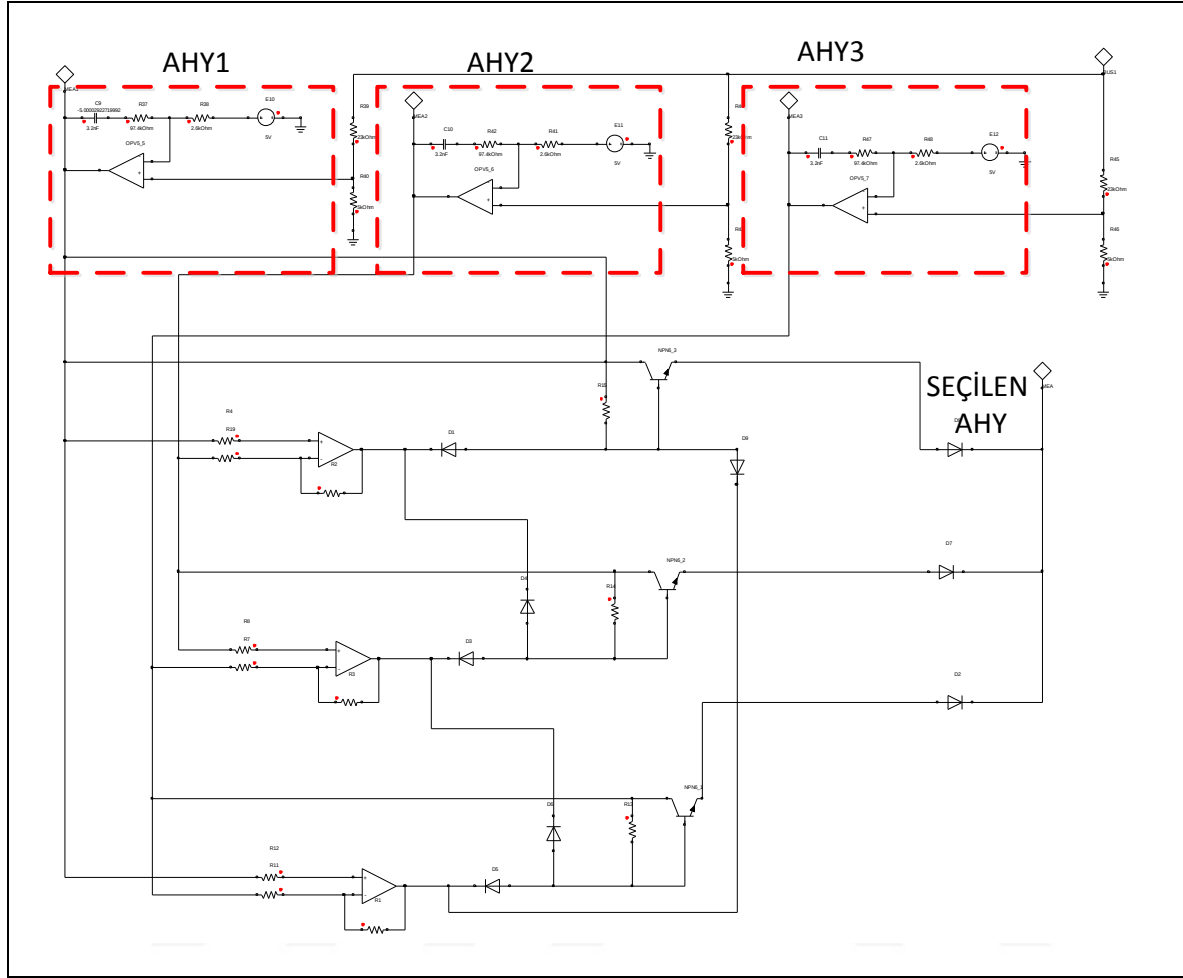
U1B op-amp'ında ise pozitif girişe 4V, negatif girişe ise 9V girmektedir. AHY2 girişi ile R8 ve R5 dirençlerin orta noktası arasında 5V gerilim farkı oluşmaktadır ve arada 1k Ω değerine sahip R5 direnci vardır. Sağa doğru 5mA akmaktadır. Op-amp'ın girişleri çok yüksek empedansa sahip olduğu için 5mA'nın tamamı geri besleme direnci olan R5 direnci üzerinden akar. 5mA 9k Ω 'a sahip direnç üzerinden akar. Op-amp'ın çıkışı op-amp +/-15V ile beslendiği için en fazla -Vcc sınırına dayanabilir ve çıkışta -15V gözlemlenir. D5 ve D8 diyotları iletime geçer ancak Q2 transistörü npn tipte olduğu için negatif gerilimle iletime geçemez. AHY2 sinyali çıkışa aktarılmaz.

U1C op-amp'ında ise pozitif girişe 9V, negatif girişe ise 4V girmektedir. AHY3 girişi ile R9 ve R6 dirençlerinin orta noktası arasında 5V gerilim farkı oluşmaktadır ve arada 1k Ω değerine sahip R6 direnci vardır. Sola doğru 5mA akmaktadır. Op-amp'ın girişleri çok yüksek empedansa sahip olduğu için 5mA'nın tamamı geri besleme direnci olan R6 üzerinden akar. 5mA akımının tamamı 9k Ω 'a sahip direnç üzerinden akar. Op-amp çıkışı op-amp +15V ile beslendiği için +Vcc sınırına dayanır ve çıkışta 15V gözlemlenir. U1C op-amp'ının çıkışı pozitif olduğu için D6 ve D8 diyotları iletime giremez. U1B op-amp'ının çıkışı -15V olduğu için D8 üzerinden Q3 transistörünün base terminaline -14V ulaşır ve negatif gerilimle npn transistör iletime giremez, dolayısıyla AHY3 sinyali çıkışa iletilemez. Sadece hatasız bir sinyal olan AHY1 sinyali çıkışa iletilmiş olur.



Şekil 4.9. Çoğunluk oylaması devresi şematik gösterimi

Şekil 4.10 çoğunluk oylaması devresinin benzetim ortamındaki devresini göstermektedir. AHY1, AHY2 ve AHY3 olarak tanımlanan sinyaller ana hata yükseltici sinyallerinin üretildiği PI kontrolcülerin çıkışını belirtir. Seçilen AHY ifadesi ise en az iki tane AHY sinyalinin eşit olduğu durumun çıktısına göre edilen sinyali göstermektedir. Devrenin çalışma mantığı Şekil 4.9 üzerinden açıklanmıştır.



Şekil 4.10. Çoğunluk oylaması devresi benzetim gösterimi [20]

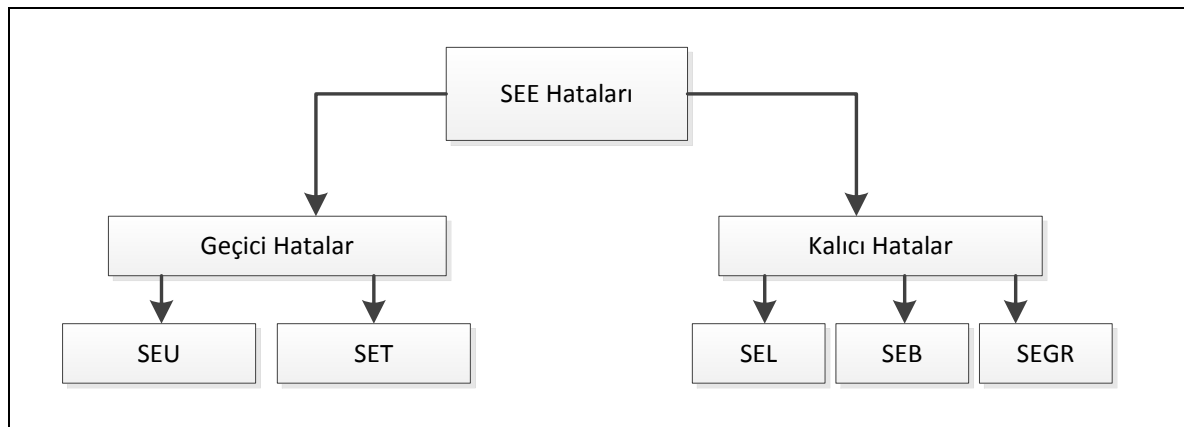
5. KAYIPLAR VE VERİM

Bu bölümde benzetim çalışmasında verilen beş durum için ayrı ayrı olarak güç kayıpları hesaplanacaktır. Analizlerde mosfet, diyot ve endüktör üzerindeki güç kayıpları analiz edilmiş, diğer kayıplar ihmal edilmiştir.

Devrede kullanılan mosfet, diyot ve endüktör gibi yarıiletken malzemelerin güvenli bir şekilde çalışabilmeleri için akım ve gerilim değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yarı iletken malzemeler seçilirken akım ve gerilim değerleri, çalışma sıcaklıkları, frekans gibi parametreler dikkate alınmalıdır. Bu yüzden malzeme seçiminde ürün kataloğu dikkatle incelenmelidir.

Özellikle anahtarlama gerçekleşecek bölümler için parazitik kapasitans ve kablo endüktansı gibi faktörler akımın ve gerilimin aşırı yükselmesine neden olabileceğinden güç değeri düşürme kurallarına göre malzeme seçimi yapılması önemlidir.

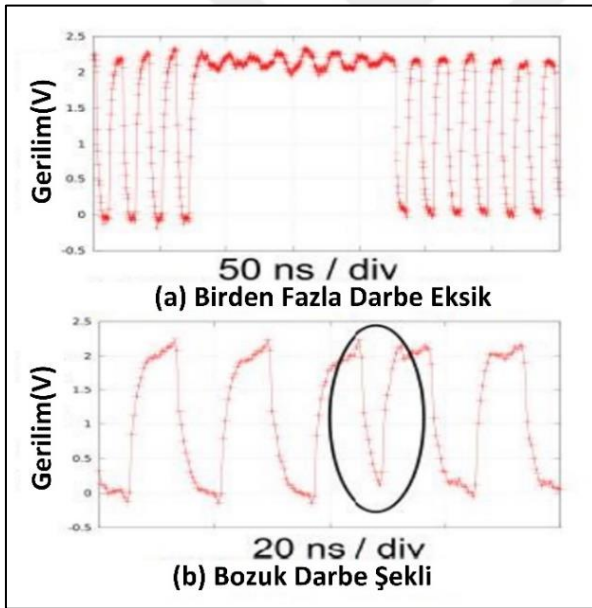
Uzayda kullanılacak malzemelerde radyasyonun kümülatif etkilerine ve tekil olay etkileri (Single Event Effect-SEE) göz önünde bulundurulmalıdır. TID (Total Ionize Dose) parçacık üzerinde uydunun görev yaptığı süre boyunca kümülatif olarak biriken ve elektronik komponentlerin karakteristiğini ve yapısını bozabilen etkilerdir ve kRad cinsinden ifade edilir. SEE etkileri ise iyon çarpması nedeniyle devrede meydana gelen ölçülebilir hatalara denir ve geçici ve kalıcı hatalar olarak sınıflandırılabilir, hataların sınıflandırılmasına Şekil 5.1’de yer verilmiştir.



Şekil 5.1. SEE hatalarının sınıflandırılması

SEU (Tekil Olay Bit Değişimi), Bir cihazdaki kozmik ışın veya proton gibi enerjik bir parçacık tarafından tetiklenen durum veya geçici durum değişikliğine denir. Protonlar veya kozmik ışınlar ortamdan geçerken enerjisini kaybederler ve arkalarında delik çifti bırakırlar. Sayısal, analog ve optik bileşenlerde oluşurlar. Bu hatalar, cihazın resetlenmesi ile düzelmesi nedeniyle yumuşak hatalardır ve tahribat yaratmazlar.

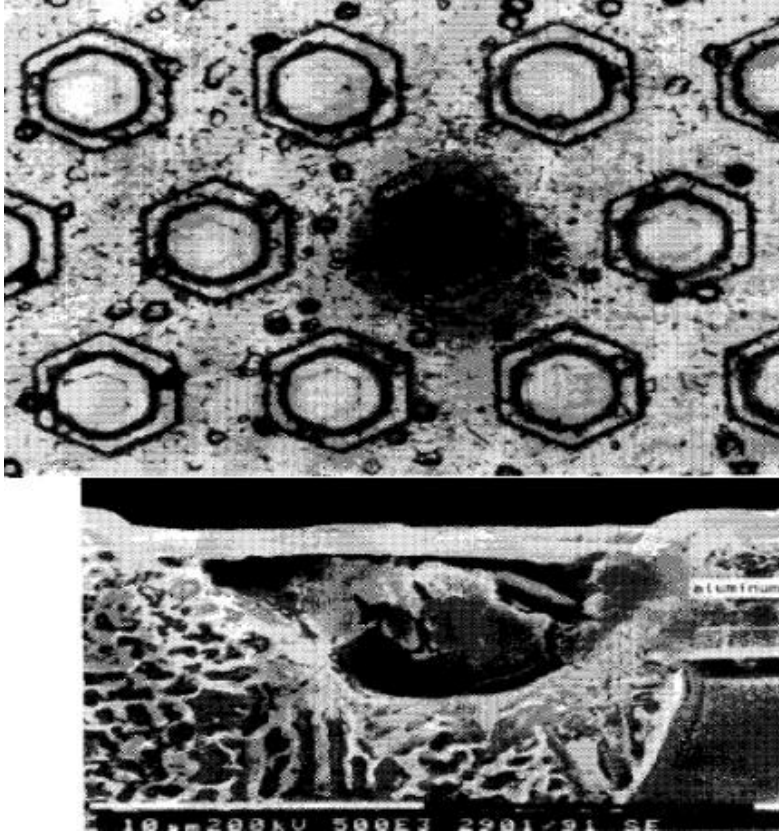
SET (Tekil Olay Anlık Değişimi), Referans gerilimlerinin maruz kaldığı ışımlar yumuşak yol verici (soft start) devrelerini etkileyerek sistemde ani akım ve gerilimlere neden olur. Geçici hatalardır. Dalga frekansı arttıkça SET gerçekleşmesi ve diğer devrelere yayılması olasılığı artar. SET hatası dalgaların durum geçiş sürelerinin artmasına yol açabilir. SET hatasının neden olduğu bozucu etkilerden olan durumlar arasında geçiş sinyallerinin kaybı veya bozunuma uğramış dalga şekli örneğine Şekil 5.2’de yer verilmiştir.



Şekil 5.2. SET hatası [47]

SEL (Tekil Olay Parazitik Kısa Devre), Yüksek akım nedeniyle cihazın fonksiyonelliğinin kaybına yol açabilen bir tekil hata durumudur. SEL arızaları geçici veya kalıcı olabilir. SEL akımından yalnızca sistemin yeniden enerjilendirilmesiyle kurtulmak mümkündür. Bu etki sıcaklıkla yükselir. Tasarım yapılırken SEL etkisine karşı duyarlı malzeme seçiminden olabildiğince kaçınmak gerekir. SEL hatası gücün kısa devre olmasına yol açabilir bu nedenler SEL etkisine karşı önlem almak için akım sınırlayıcı devreler eklenebilir.

SEB (Tekil Olay Yanması), Güç anahtarlarında yüksek akım sonucunda komponentin yanmasına yol açan hata durumudur. Kalıcı arızalardır ve mosfet, bipolar eklem transistör, IGBT ve FET gibi anahtarlar SEB etkisine karşı duyarlıdır.



Şekil 5.3. Güç mosfet'i SEB hatası [48]

SEGR (Tekil Olay Kapı Yırtılması), Güç mosfet'lerinde kapı oksidinde yüksek elektrik alandan kaynaklı olarak iletken bir yol oluşmasına neden olabilecek tek bir iyonun neden olduğu duruma denir [49].

LET (Lineer Enerji Transferi), Enerjili bir parçacık bir malzeme içinde ilerlerken birim uzunluk başına transfer edilen enerjinin ölçüsüdür. LET, SEE hataları için referans birimidir. Ortak LET birimi $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 / \text{mg}$ 'dır [50]. NASA'ya göre seçilen malzemenin eşik LET değeri $100 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 / \text{mg}$ 'den büyükse bu malzeme SEE etkilerine karşı bağışıktır ve analiz gerektirmeden kullanılabilir [49]. ESA'ya göre seçilen malzemenin eşik LET değeri $60 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 / \text{mg}$ 'den büyükse bu malzeme SEE etkilerine karşı bağışıktır ve analiz gerektirmeden kullanılabilir [50].

Malzeme seçimi yapılırken LEO platform koşulları dikkate alınmıştır. Ayrıca, S3R

topolojisinde yük değişimi durumunda güç anahtarı bir durumdan diğerine hızla değişmektedir. Bu bölümde ele alınan güç anahtarı türü bir mosfet'tir. Transistör, IGBT gibi başka güç anahtarları da kullanılabilir, ancak sürücü devreleri düşünüldüğünde, maliyet ve performans açısından çoğu durumda mosfet en yaygın seçimdir. Bu uygulamada n kanallı mosfet kullanılmıştır.

Mosfet için 100V, 8A özelliklerine sahip International Rectifier firmasının “IRHE7130” parça kodlu elemanı kullanılabilir.

Seçilen mosfet’te güvenlik payı yüksek tutulmuştur. Mosfet’in üzerinde geçen akımla birlikte ısınma olacağı öngörülmektedir. Ayrıca uzay koşullarında güç değeri düşürme faktörlerinin yüksek tutulması radyasyon etkilerine karşı da koruma sağlar. Hem de uzayda atmosferik hava koşulları olmadığı için komponentin soğutulması da dikkat edilmesi gereken hususlardandır. Bu nedenle güvenlik payının yüksek seçilmesi avantaj sağlamaktadır. Dezavantajı ise akım ve gerilim dereceleri arttıkça kullanılan malzemelerin paketi büyümekte ve maliyeti artmaktadır. Ancak sistemin güvenilirliği artmaktadır.

Ayrıca mosfet seçerken $R_{ds(on)}$ direncinin düşük seçilmesi de kayıpları azaltır. Sistemin kayıpları Çizelge 3.1’de girdileri verilen tasarım kriterlerine göre hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1. Mosfet teknik özellikleri [51]

Özellik	Gösterimi	Değer
Akım yükselme zamanı	t_{ri}	32 ns
Gerilim düşme zamanı	t_{fu}	25 ns
Gerilim yükselme zamanı	t_{ru}	40 ns
Akım düşme zamanı	t_{fi}	40 ns
Açık durumda seri direnç	R_{ds_on}	180 mohm
Ters toparlanma şarj değeri	Q_{rr}	0,8 μC
Ters toparlanma zamanı	t_{rr}	270 ns
Ters toparlanma akımı	I_{rr}	32 A

Mosfet’lerde anahtarlama kayıpları ve iletim kayıpları Eş. 5.1 ile Eş. 5.4 arasındaki gibi

hesaplanmaktadır. Anahtarlama kayıpları hesaplanırken, önce kayıp enerjiler hesaplanmaktadır, ardından anahtarlama frekansı ile çarpılarak anahtarlama sırasında kayıp olan güç değeri elde edilmektedir.

En kötü durum analizi yapılacak olursa mosfet'in açılma ve kapanma kayıpları Eş. 5.1. ile Eş. 5.2 ile hesaplanmıştır [52].

$$E_{on_M} = V_{bus} \cdot I_{FV} \frac{t_{ri} + t_{fu}}{2} + \quad (5.1)$$

$$E_{on_M} = (28) \cdot (2,86) \frac{(32 \cdot 10^{-9} s + 25 \cdot 10^{-9})}{2}$$

$$E_{on_M} = 2,28 \cdot 10^{-6} J$$

$$E_{off_M} = V_{bus} \cdot I_{FV} \frac{t_{ru} + t_{fi}}{2} \quad (5.2)$$

$$E_{off_M} = (28) \cdot (2,86) \frac{(40 \cdot 10^{-9} s + 40 \cdot 10^{-9})}{2} = 3,2 \cdot 10^{-6} J$$

S3R anahtarlama modunda çalışırken mosfet'in anahtarlama kayıpları dikkate alınır. Anahtarlama frekansı (f_{sw}) 5 kHz değerindedir. Mosfet üzerindeki anahtarlama kaybı Eş. 5.3 ile hesaplanır.

$$P_{sw_M} = (E_{on_M} + E_{off_M}) \cdot f_{sw} \quad (5.3)$$

$$P_{sw_M} = (2,28 \cdot 10^{-6} + 3,2 \cdot 10^{-6}) (5 \cdot 10^3)$$

$$P_{sw_M} = 0,0274 W$$

Mosfet üzerinde oluşan iletim kayıpları S3R kesim modunda çalışırken mosfet üzerinde görülen R_{DS_on} direnci üzerinden açığa çıkan güçtür. Şönt mosfet'in iletim kayıpları Eş. 5.4'te gösterildiği gibi hesaplanır.

$$P_{con_M} = I_{FV}^2 \cdot R_{DS_on} \quad (5.4)$$

$$P_{con_M} = (2,86)^2 \cdot (180 \cdot 10^{-3})$$

$$P_{con_M} = 1,5 W$$

Diyot için 60V, 16A özelliklerine sahip International Rectifier firmasının "16SCYQ060C" parça kodlu ürünü kullanılabilir. Ürünün teknik dokümanından ileri kutuplama düşümü

0,63V olarak hesaplanmaktadır [53]. Diyodun ileri kutuplama gerilimi V_F ile ifade edilir. S3R iletim modunda çalışırken diyodun iletim kayıpları dikkate alınır. Diyot üzerindeki iletim kaybı Eş. 5.5 ile hesaplanır.

$$P_D = V_F \cdot I_{FV} \quad (5.5)$$

$$P_D = (0,63)(2,86)$$

$$P_D = 1,8 \text{ W}$$

Uzayda kullanılacak güç endüktörlerinde önemli bir kriter olan gaz yayılımı (outgassing) yapmayan malzeme seçimine dikkat edilmiştir. Gaz yayılımı, malzemelerin içerdikleri gazı vakum ortamında salarak uydunun ömrünü kısaltan etkilere sahiptir. Bu etkiyi gözlemlemek için fırlatmadan önce uydular test edilir.

Tasarımda Şekil 5.4’de yer alan Coilcraft firmasının 15 μH endüktansına sahip “AE526PGA153MSZ” parça kodlu ürünü kullanılabilir. Standart bir değer olması açısından 15 μH tercih edilmiştir. Şekil 4.5’te gösterilen akım sınırlayıcı endüktörün DCR direncinin neden olduğu kayıp Eş. 5.6 ile hesaplanır. Endüktörün DCR direnci Şekil 5.4’te belirtildiği üzere maksimum 28,2 $\text{m}\Omega$ ’dur. DCR direnci R_{DCR} ile gösterilmiştir. Endüktörün iletim durumundaki kaybı Eş. 5.6 ile hesaplanmıştır.

$$P_{con_ind} = I_{FV}^2 \cdot R_{DCR} \quad (5.6)$$

$$P_{con_ind} = (2,86)^2 \cdot (28,2 \cdot 10^{-3})$$

$$P_{con_ind} = 0.23 \text{ W}$$

AE526PGA Series										
Part number ¹	Inductance ² ±20% (µH)	DCR (mOhms) ³		SRF (MHz) ⁴		Isat (A) ⁵			Irms (A) ⁶	
		typ	max	min	typ	10% drop	20% drop	30% drop	20°C rise	40°C rise
AE526PGA221MS_	0.22	1.1	1.3	100	125	17.8	28.5	38.0	16.5	21.8
AE526PGA471MS_	0.47	1.5	1.8	60	75	13.8	22.0	29.5	15.0	19.5
AE526PGA681MS_	0.68	2.0	2.3	48	60	12.5	19.6	26.5	13.1	17.0
AE526PGA102MS_	1.0	2.5	2.9	36	46	11.0	17.2	23.0	12.3	16.5
AE526PGA122MS_	1.2	2.9	3.4	32	41	9.8	15.1	20.5	12.0	16.1
AE526PGA152MS_	1.5	3.3	3.8	32	41	8.9	13.8	18.3	11.5	15.2
AE526PGA182MS_	1.8	3.8	4.3	28	35	8.4	12.8	16.9	11.0	14.8
AE526PGA222MS_	2.2	4.3	4.8	24	30	7.9	12.1	16.0	9.4	12.9
AE526PGA332MS_	3.3	5.9	6.5	19	24	6.6	10.1	13.4	9.1	12.5
AE526PGA472MS_	4.7	9.1	10.1	15	19	5.1	7.8	10.2	7.4	10.1
AE526PGA562MS_	5.6	10.6	11.7	13	17	4.8	7.3	9.6	6.8	9.5
AE526PGA682MS_	6.8	12.7	14.0	12	16	4.5	6.8	8.9	6.4	8.6
AE526PGA822MS_	8.2	15.2	16.8	11	14	4.1	6.2	8.1	5.6	7.6
AE526PGA103MS_	10.0	18.5	20.4	11	14	3.6	5.5	7.3	5.0	6.8
AE526PGA123MS_	12.0	22.0	24.2	10	13	3.4	5.1	6.7	4.6	6.2
AE526PGA153MS_	15.0	28.2	31.1	8	11	2.9	4.4	5.8	4.1	5.6
AE526PGA183MS_	18.0	33.9	37.3	8	10	2.8	4.2	5.5	3.5	4.8
AE526PGA223MS_	22.0	42.6	46.9	7	9	2.5	3.9	5.1	3.2	4.4
AE526PGA333MS_	33.0	63.1	69.5	5	7	2.0	3.1	4.0	2.7	3.7
AE526PGA473MS_	47.0	97.0	107.0	4	6	1.6	2.5	3.2	2.0	2.8

Şekil 5.4. AE526PGA serisi gaz yayılımı yapmayan güç endüktörleri [54]

S3R şönt modunda çalışırken güneş paneli akımı şönt mosfet'in ve akım sınırlayıcı pasif endüktörün üzerinden aktığı için bu modda mosfet'in ve endüktörün iletim kayıpları dikkate alınır. Şönt modunun kayıpları Eş. 5.7 ile hesaplanmıştır.

$$P_{\text{şönt}} = P_{\text{con}_M} + P_{\text{con}_{ind}} \quad (5.7)$$

$$P_{\text{şönt}} = 1,5 + 0,23$$

$$P_{\text{şönt}} = 1,73W$$

S3R'ın bütün çalışma modları için hesaplanan kayıplar Çizelge 5.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.2. Kayıp güç çizelgesi

Malzeme	Kayıp Türü	Kayıp
Mosfet	S3R İletim Modu	0W
	S3R Şönt Modu	1,5W
	S3R Anahtarlama Modu	27,4mW
Diyot	S3R İletim Modu	1,8 W
Endüktör	S3R Şönt Modu	0.23W

Çizelge 5.3'te her bir S3R çalışma modunda gerçekleşen toplam kayıplar verilmiştir.

Çizelge 5.3. Her bir S3R çalışma modunun kayıpları

S3R Çalışma Modu	Kayıp
İletim Modu	1.8W
Şönt Modu	1,73W
Anahtarlama Modu	27,4mW

Bölüm 5’te detaylı olarak anlatılacak olan beş farklı güç değeri için çalışma modlarının ve sistem veriminin yer aldığı hesaplar yapılmıştır. Bu senaryolar için sistem verimi Eş. 5.8’de tanımlanan denklem ile hesaplanabilmektedir.

$$\eta = \frac{P_{bus}}{P_{bus}+P_{kayıp}} \times 100 \quad (5.8)$$

Çizelge 5.4 önceki bölümlerde bahsedilen beş katmanlı S3R bloklarının ana baranın farklı güç ihtiyaçları durumlarında çalışma modlarını göstermektedir. S3R topolojisi sıralı çalışmaya dayandığı için ana baranın güç ihtiyacı karşılanana kadar güneş panelleri sırayla ana barayı beslemektedir. Bir S3R bloğunun sağlayabileceği güç kapasitesi 80W’tır. Daha sonra hassas ayarlama gerektiren bölüm anahtarlama modunda çalıştıktan sonra, ana baraya 0-80W arasında bir güç sağlar. Kalan bölümler ise şönt modunda çalışarak ihtiyaç fazlası gücün atılmasını sağlar. Yükün güç ihtiyacı azaldıkça verimin düştüğü gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.4. Farklı çalışma modları için güç kayıpları

Anahtar Adı	Güç Değeri				
	350W	280W	200W	100W	60W
Bölüm 1	İletim Modu	İletim Modu	İletim Modu	İletim Modu	Anahtarlama Modu
Bölüm 2	İletim Modu	İletim Modu	İletim Modu	Anahtarlama Modu	Şönt Modu
Bölüm 3	İletim Modu	İletim Modu	Anahtarlama Modu	Şönt Modu	Şönt Modu
Bölüm 4	İletim Modu	Anahtarlama Modu	Şönt Modu	Şönt Modu	Şönt Modu
Bölüm 5	Anahtarlama Modu	Şönt Modu	Şönt Modu	Şönt Modu	Şönt Modu
Toplam Kayıp	7.2W	7.13W	7,06W	7W	6,92W
Verim	%98	%97.5	%96,5	%93,5	%90

6. BENZETİM ÇALIŞMALARI

S3R topolojisi kullanılarak beş katmanlı olarak tasarlanan 400W bir sistemin belirli yük değişim koşulları altında verdiği tepkiler incelenecektir. Her bir katman 80W olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında ANSYS® Twin Builder Simplorer 2022 programı kullanılmıştır.

Sistemin yük ihtiyaçlarına göre bölümlerden sırasıyla 80W çekmesi beklenmektedir. 0-80W arası ince ayar sağlanması gereken bölümde ise şönt mosfet'i anahtarlama yapacaktır, anahtar açılıp kapanarak 80W'tan küçük güçleri de yüke aktaracaktır. Sistemin güç ihtiyacı karşılandıktan sonra diğer bölümlerde güneş panellerinden gelen enerji mosfet üzerinden şönt edilecektir ve artık enerji sistemden uzaklaştırılacaktır. Sabit bir yük aralığında aynı anda sadece bir mosfet'in anahtarlama yapabileceği hususuna dikkat edilmelidir ve benzetim çalışmasıyla doğrulanmalıdır.

Sistemin dinamik yük tepkisini doğrulayabilmek için her kademenin sırasıyla anahtarlama yapabileceği aralıklarda yükler seçilmiştir. Bu çalışma durumlarını sağlamak için,

- 400W-320W arasında bir değer olarak 350W,
- 320W-240W arasında bir değer olarak 280W,
- 240W-160W arasında bir değer olarak 200W,
- 160W-80W arasında bir değer olarak 100W
- 80W-0W arasında bir değer olarak 60W seçilmiştir.

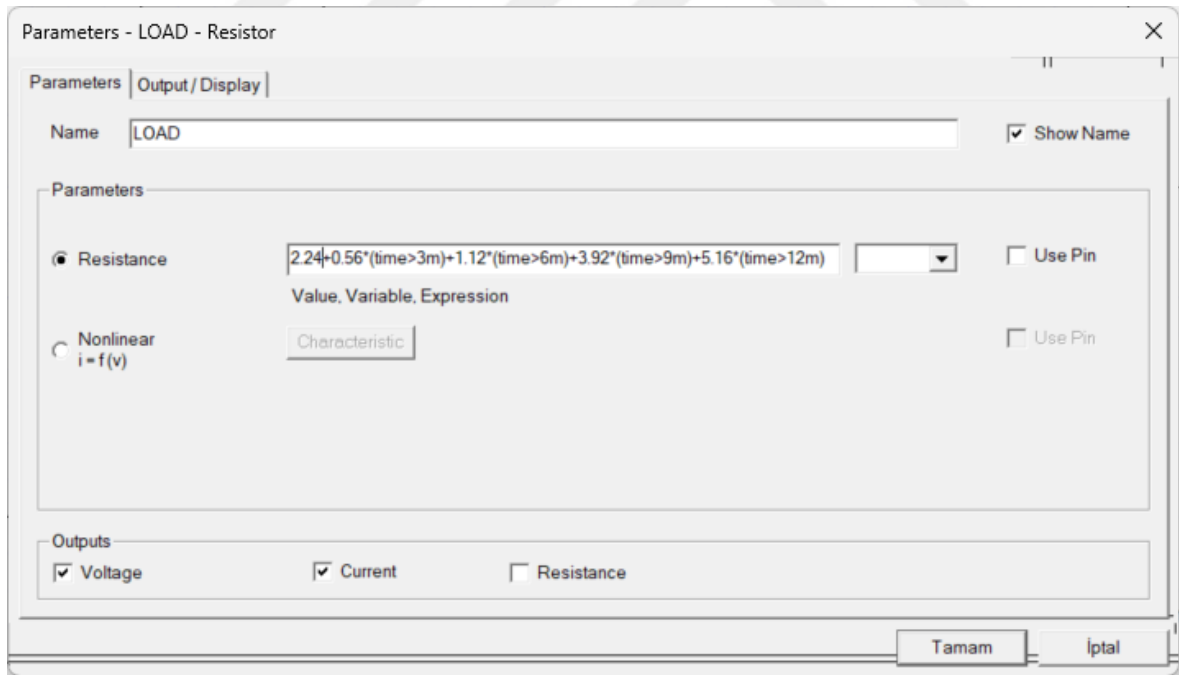
Dirençler, her güç değeri için ayrı ayrı olarak regüle 28V için Eş. 6.1 ile hesaplanmıştır. Çizelge 6.1'de değişen direnç değerleri verilmiştir.

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (6.1)$$

Çizelge 6.1. Yüklerin hesaplanması

Yükün İhtiyaç Duyduğu Güç (W)	Yük Direnci (Ω)
350	2.24
280	2.8
200	3.92
100	7.84
60	13

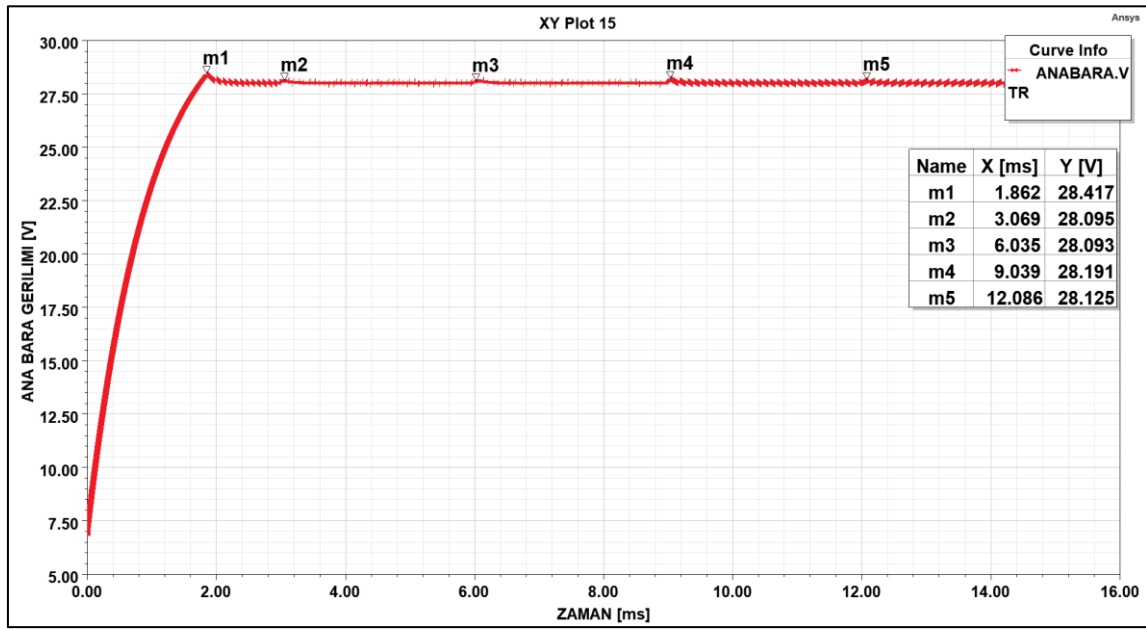
S3R'ın çıkış akımını azaltmak ve 3 ms'de tamamlanan bir yük değişimlerini simüle edebilmek için başlangıçta 2.24 Ω yük devreye girmektedir. 3. ms'de bir önceki yüke ek olarak 0.56 Ω direnç eklenmektedir. 6. ms'de 1.12 Ω yük daha devreye girer. 9. ms'de 3.92 ve 12. ms'de sisteme 5.16 Ω daha eklenir. Şekil 6.1.'de ise direnç değerlerinin benzetim ortamına aktarıldığı arayüz verilmiştir.



Şekil 6.1. Yük değişimlerinin benzetim programında gösterilmesi

Sistemde yük değişimlerinin regülasyon üzerindeki etkisini hesaplayabilmek için değişken direnç üzerinden gerilim izlenmiştir. Sistemde ana bara geriliminin yük değişimlerinden kaynaklanan akım değişimleri için regülasyonun korunmuştur. Benzetim süresi boyunca gerilim dalgalanmalarının gösterildiği gibi kabul edilebilir seviyede olduğu izlenmiştir.

Sistem %1’lik gerilim değişimine izin verilecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 6.2 yük üzerindeki en küçük ve en büyük gerilimlerden örneklemeler göstermektedir. Sistem ilk ayağa kalkarken ana bara gerilimi 28,4V olmuştur. Daha sonra ise yük değişse dahi ana bara geriliminin isterlerde yer alan toleransı geçmediği ve regülasyonun korunduğu gözlenmiştir. Ana bara gerilimi bara kapasitansı şarj olduktan sonra yaklaşık iki ms sonra oluşmuştur.



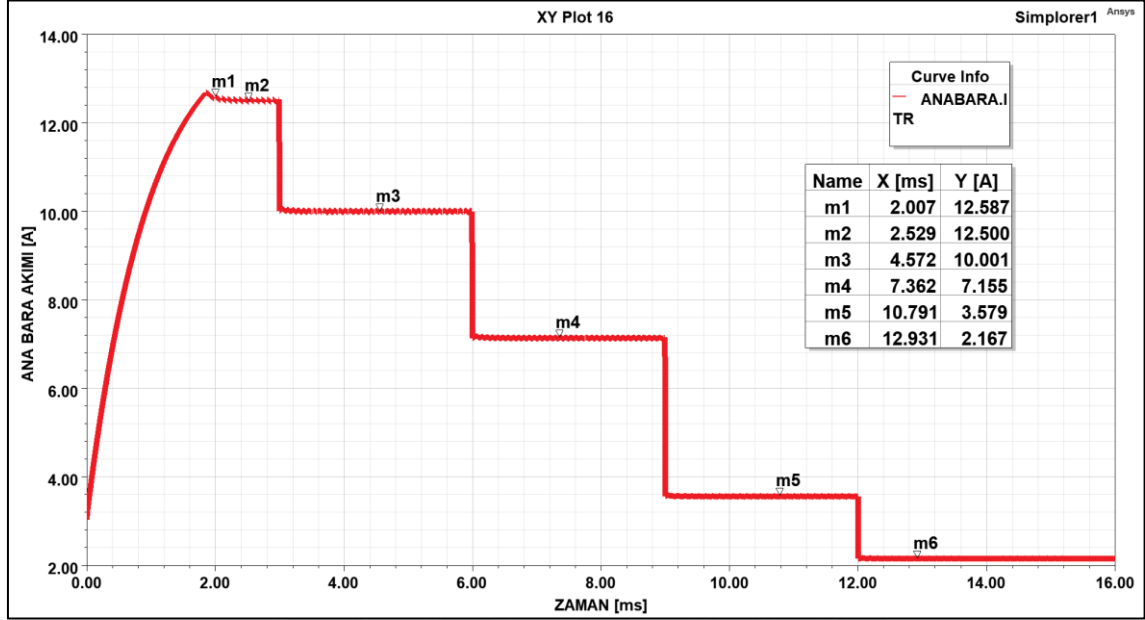
Şekil 6.2. Yük değişimlerine ana bara geriliminin dinamik tepkisi

Çizelge 6.2 her bir yüke karşılık hesaplanan ve benzetim çalışmalarında gözlemlenen akım değerlerini göstermektedir. Sapma miktarı sütunu ise hesaplanan ve benzetim çalışmasında gerçekleşen arasındaki sapma miktarını yüzdesel olarak göstermektedir. Sapma miktarlarının yüzde 1’den düşük olduğu doğrulanmıştır.

Çizelge 6.2. Hesaplama ve benzetimlerde ölçüm değerleri karşılaştırılması

Yükün İhtiyaç Duyduğu Güç (W)	Yük Direnci (Ω)	Hesaplanan Akım Değeri(A)	Okunan Akım Değeri(A)	Sapma Miktarı
350	2.24	12.5	12.50	%0
280	2.8	10	10	%0
200	3.92	7.14	7.155	%0.24
100	7.84	3.57	3.579	%0.04
60	13	2.154	2.167	%0.6

Şekil 6.3.'te yüke göre orantılı olarak değişen akım değerleri benzetim ortamında gösterilmiştir. Yük direnci arttıkça çekilen akım azalmıştır.



Şekil 6.3. Değişken yüke karşı akımın tepkisi

Çizelge 6.3'e bakıldığında yük bu çalışmadaki gibi kademeli değiştirildiğinde S3R hücrelerinin sıralı olarak değiştiği ve aynı anda sadece bir mosfet'in anahtarlama yaptığı gözlemlenmiştir. Yünün kademeli her artışında iletimde bulunan bir S3R hücresinin daha şönt moduna geçtiği gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. Katmanların çalışma modları

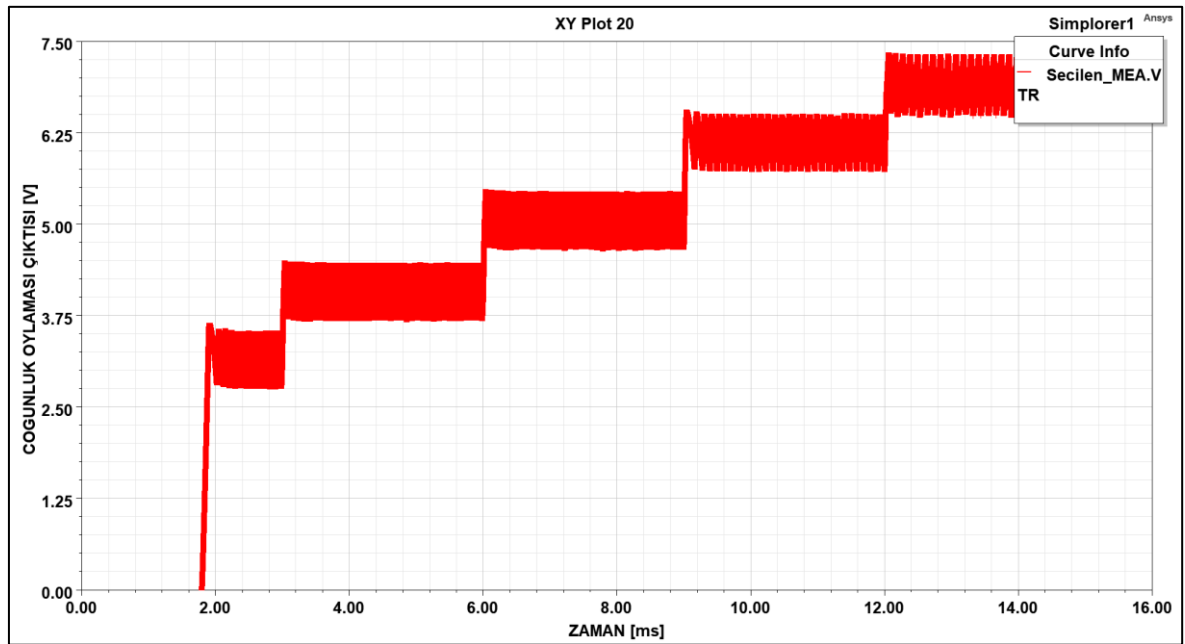
S3R Hücreleri	Güç Değeri				
	350W (0ms-3ms)	280W (3ms-6ms)	200W (6ms-9ms)	100W (9ms-12ms)	60W (12ms-15ms)
Bölüm 1	İletim Modu	İletim Modu	İletim Modu	İletim Modu	Anahtarlama Modu
Bölüm 2	İletim Modu	İletim Modu	İletim Modu	Anahtarlama Modu	Şönt Modu
Bölüm 3	İletim Modu	İletim Modu	Anahtarlama Modu	Şönt Modu	Şönt Modu
Bölüm 4	İletim Modu	Anahtarlama Modu	Şönt Modu	Şönt Modu	Şönt Modu
Bölüm 5	Anahtarlama Modu	Şönt Modu	Şönt Modu	Şönt Modu	Şönt Modu

Çizelge 6.4 yük ihtiyacının S3R hücrelerinden hangi oranlarda karşılandığını göstermektedir. S3R hücrelerinin 80W olarak tasarlanması sonucu hücrelerden yük ihtiyacı karşılanana kadar sıralı olarak hücrelerden 80W çekilmektedir. 0-80W arasında bulunan son kademe güç ihtiyacı ise anahtarlama modunda çalışan S3R hücresinden karşılanır.

Çizelge 6.4. S3R hücrelerinde güç paylaşımı

S3R Hücreleri	Güç Değeri				
	350W	280W	200W	100W	60W
Bölüm 1	80W	80W	80W	80W	60W
Bölüm 2	80W	80W	80W	20W	0W
Bölüm 3	80W	80W	40W	0W	0W
Bölüm 4	80W	40W	0W	0W	0W
Bölüm 5	30W	0W	0W	0W	0W

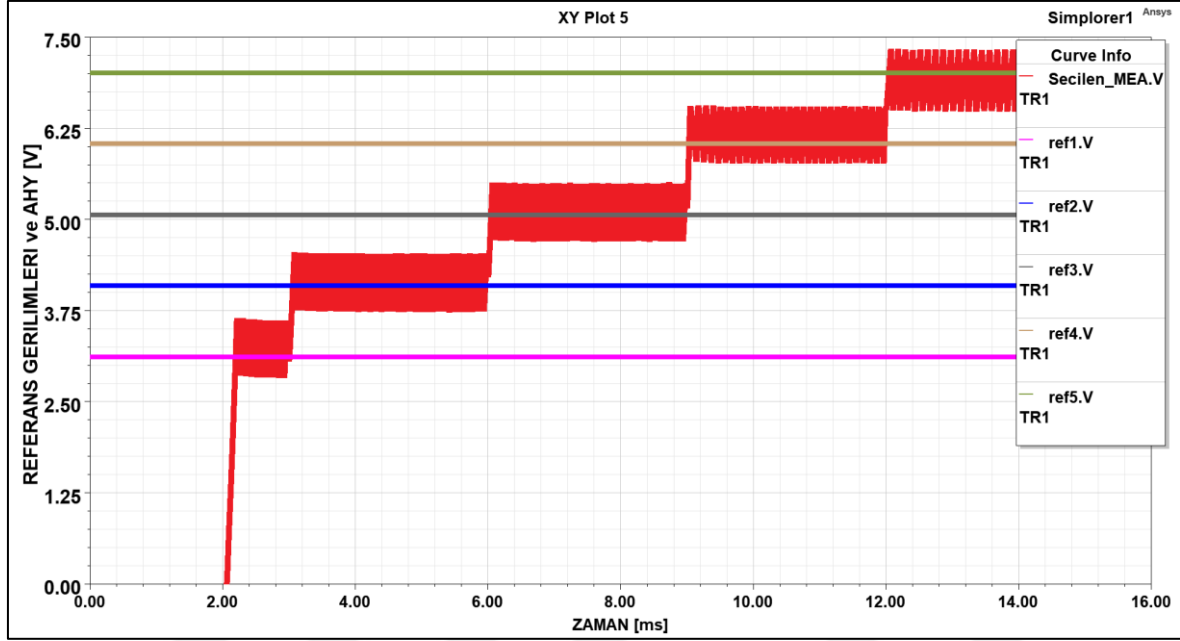
Şekil 6.4 ana hata yükseltici sinyallerini göstermektedir. Gerilim aralığı her bölgede sadece bir ana hata yükseltici sinyalinin çalışacağı şekilde ayarlanmıştır. Referans gerilimleri farklı noktalara ayarlandığı için AHY histerezis bantlarının referans sinyallerine uygun olarak sırasıyla artırılmıştır.



Şekil 6.4. Ana hata yükseltici sinyalleri

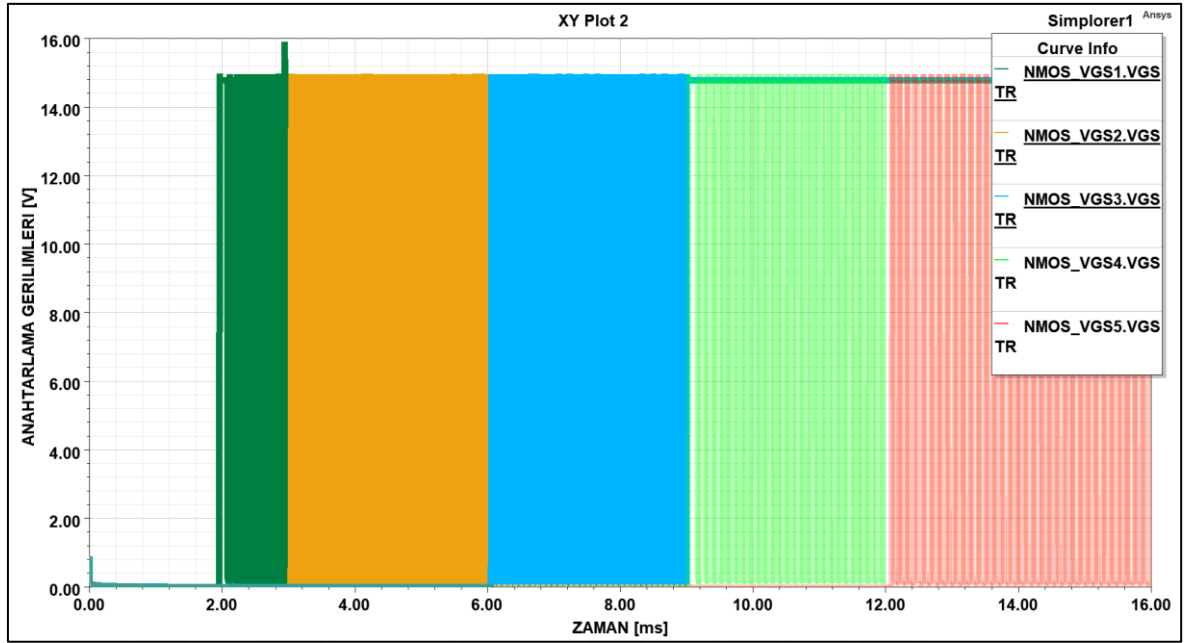
Şekil 6.5 referans gerilimleriyle ana hata yükseltici gerilimlerini göstermektedir. Her bir

zaman aralığında referans sinyali ile o MEA sinyali karşılaştırılmaktadır. Referans sinyali MEA sinyalinin büyük olduğu zaman mosfet kesimdedir, referans sinyali MEA sinyalinin büyük olduğu zaman mosfet ilettime girer. Ana hata yükseltici gerilimi hangi referans sinyaline eşitse o anda o S3R hücresi anahtarlama yapmaktadır.



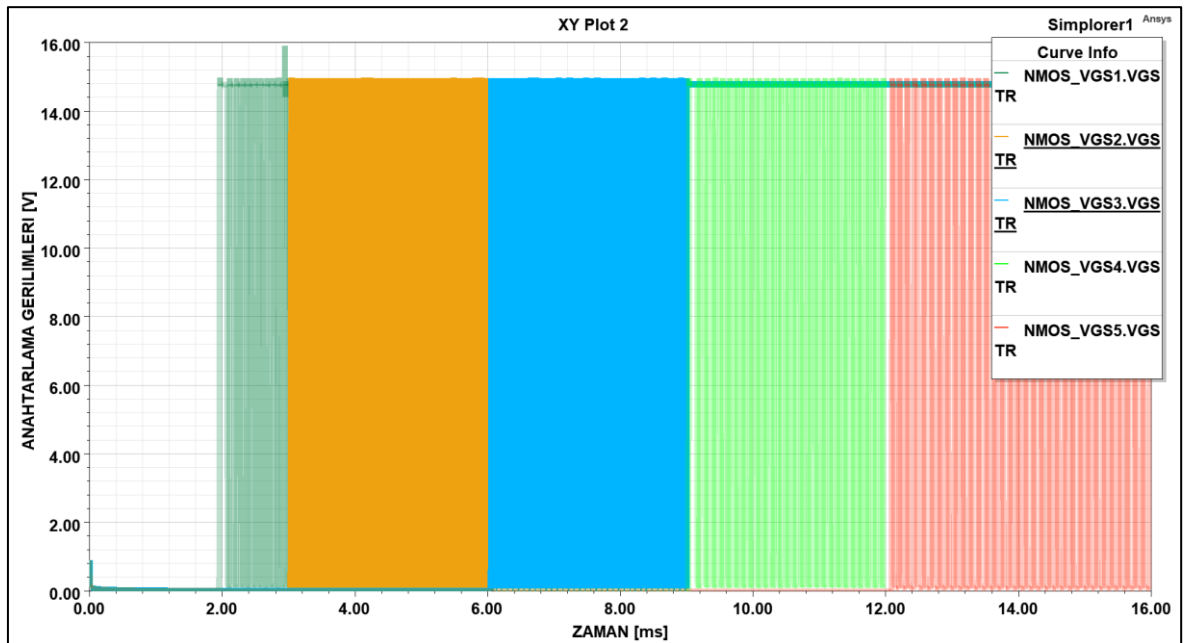
Şekil 6.5. Referans sinyallerine karşılık gelen hata sinyalleri

Şekil 6.6 ile Şekil 6.10 arasında beş farklı senaryo için beş farklı mosfet'in anahtarlama sinyalleri gösterilmiştir. Aynı anda sadece bir mosfet'in anahtarlama yaptığı, diğer mosfet'lerin daha önceki bölümlerde de gösterildiği üzere iletim ya da şönt modunda çalıştığı doğrulanmıştır. Yükler kademeli olarak artırıldığı için dalga şekilleri benzer davranış göstermektedir. Anahtarlama anına kadar mosfet'ler şönt modunda çalışmaktadır. Anahtarlama anından sonrasında ise ilgili mosfet ilettime geçmektedir. Yük ihtiyacı 350W iken koyu yeşil renk ile gösterilen anahtarlama sinyali ana bara oluştuktan sonra 0-3 ms arasında anahtarlama yapmaktadır. Sonrasında ilgili mosfet iletim modunda çalışmaktadır ve fazla güç anahtar üzerinden şönt edilmektedir. İlk mosfet'in Vgs gerilimi Şekil 6.6. ile gösterilmektedir. Vgs gerilimi pozitifken mosfet iletim modunda, sıfır iken mosfet kesim modunda çalışmaktadır.



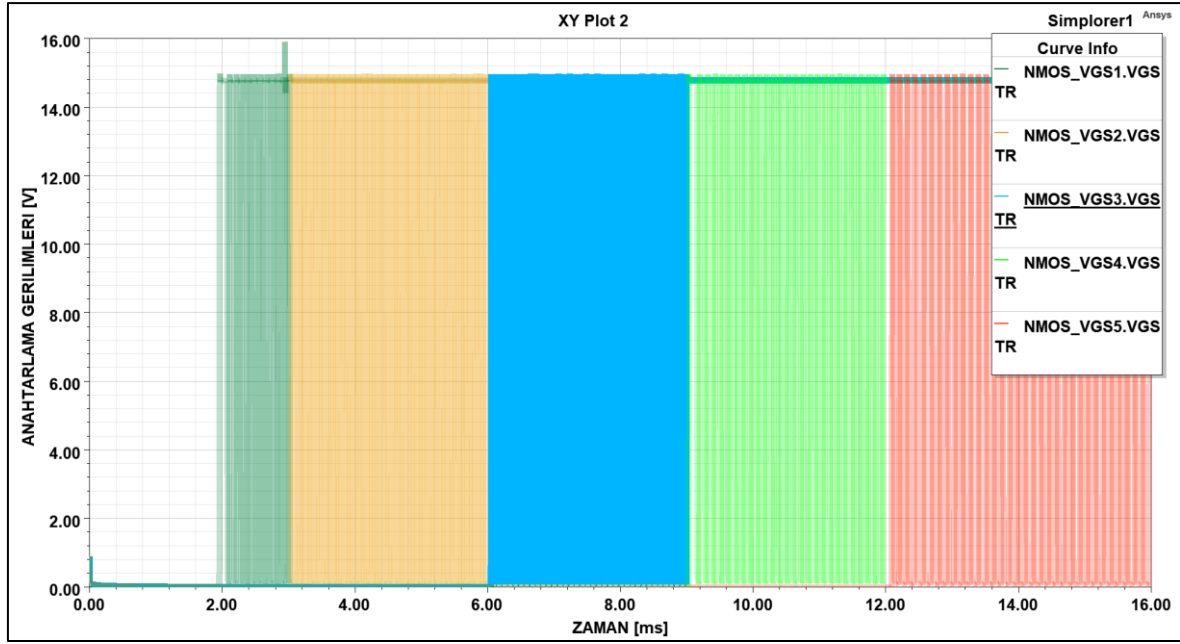
Şekil 6.6. İlk katmandaki mosfet'in anahtarlama sinyali grafiği

Yük ihtiyacı 280W iken turuncu renk ile gösterilen anahtarlama sinyali ana bara oluştuktan sonra 3-6 ms arasında anahtarlama yapmaktadır. Sonrasında iletim modunda çalışmaktadır ve fazla güç anahtar üzerinden şönt edilmektedir. 3-6 ms arasında sadece bir mosfetin anahtarlama yaptığı, diğer mosfet'lerin ise Çizelge 5.3'te tanımlanan modda çalıştığı doğrulanmıştır. 2. mosfet'in anahtarlama sinyali Şekil 6.7 ile gösterilmektedir.



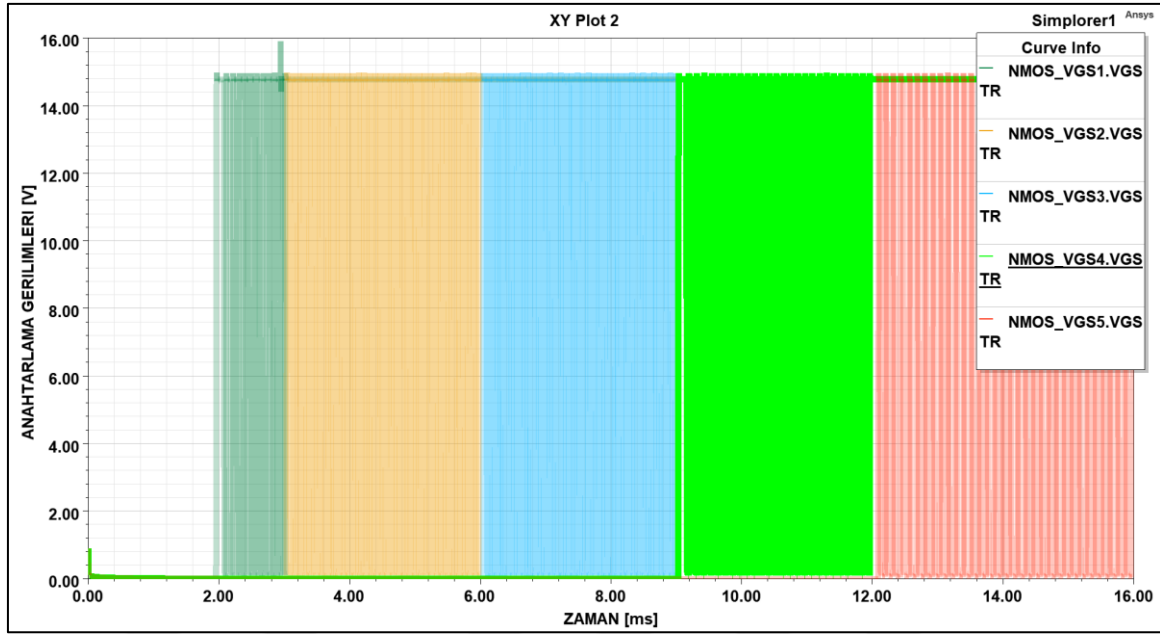
Şekil 6.7. İkinci katmandaki mosfet'in anahtarlama sinyali grafiği

Yük ihtiyacı 200W iken mavi renk ile gösterilen anahtarlama sinyali 6-9 ms arasında anahtarlama yapmaktadır. Sonrasında iletim modunda çalışmaktadır ve fazla güç anahtar üzerinden şönt edilmektedir. 6-9 ms arasında sadece bir mosfetin anahtarlama yaptığı, diğer mosfet'lerin ise Çizelge 5.3'te tanımlanan modda çalıştığı doğrulanmıştır. 3. mosfet'in anahtarlama sinyali Şekil 6.8 ile gösterilmektedir.



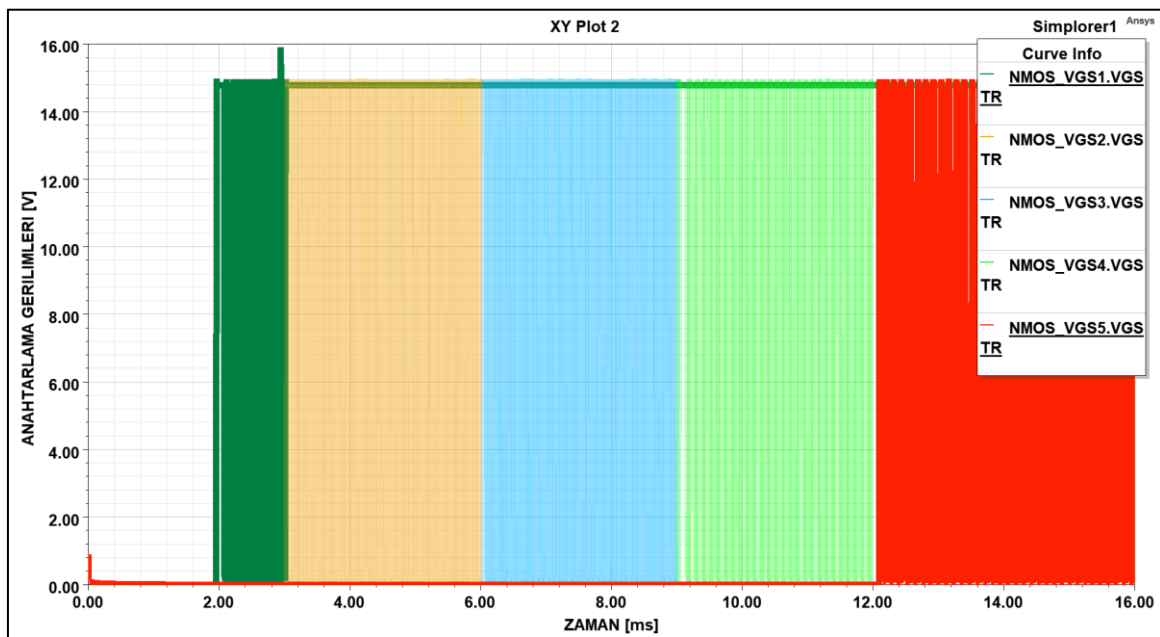
Şekil 6.8. Üçüncü katmandaki mosfet'in anahtarlama sinyali grafiği

Yük ihtiyacı 100W iken açık yeşil renk ile gösterilen anahtarlama sinyali 9-12 ms arasında anahtarlama yapmaktadır. Sonrasında iletim modunda çalışmaktadır ve fazla güç anahtar üzerinden şönt edilmektedir. 9-12 ms arasında sadece bir mosfetin anahtarlama yaptığı, diğer mosfetlerin ise Çizelge 5.3'te tanımlanan modda çalıştığı doğrulanmıştır. Dördüncü mosfet'in anahtarlama sinyali Şekil 6.9 ile gösterilmektedir.



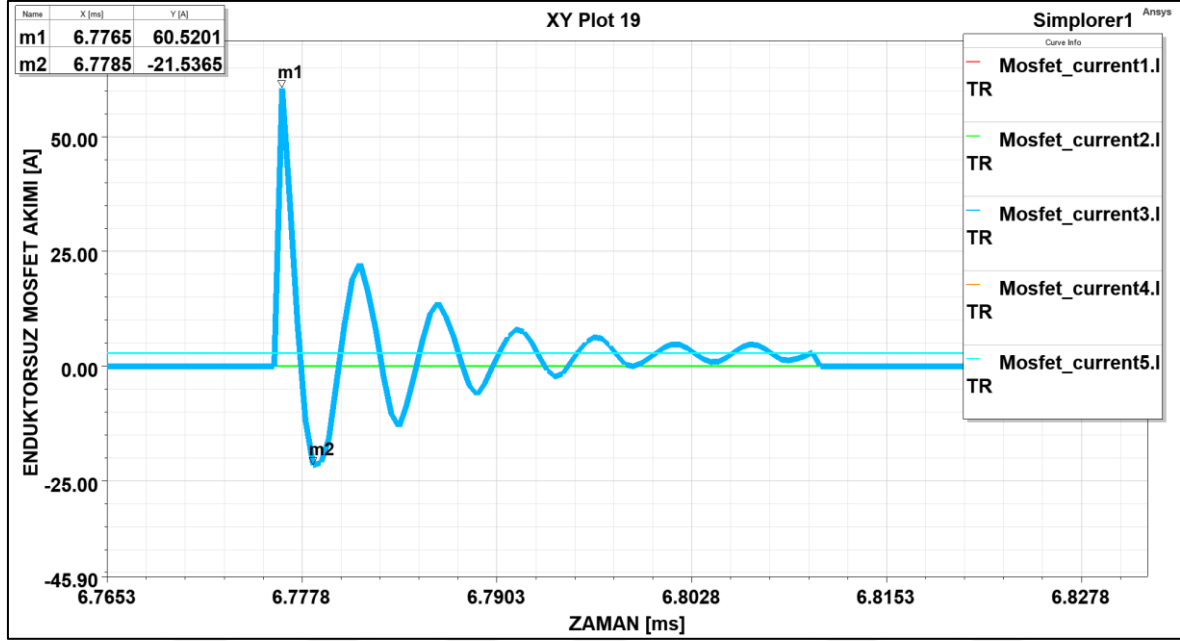
Şekil 6.9. Dördüncü katmandaki mosfet'in anahtarlama sinyali grafiği

Yük ihtiyacı 60W iken kırmızı renk ile gösterilen anahtarlama sinyali ana bara oluştuktan sonra 12. ms'den sonra anahtarlama yapmaktadır. Sonrasında iletim modunda çalışmaktadır ve fazla güç anahtar üzerinden şönt edilmektedir. 12. ms'den sonra sadece bir mosfetin anahtarlama yaptığı, diğer mosfetlerin ise Çizelge 5.3'te tanımlanan moda çalıştığı doğrulanmıştır. Beşinci mosfet'in anahtarlama sinyali Şekil 6.10 ile gösterilmektedir.



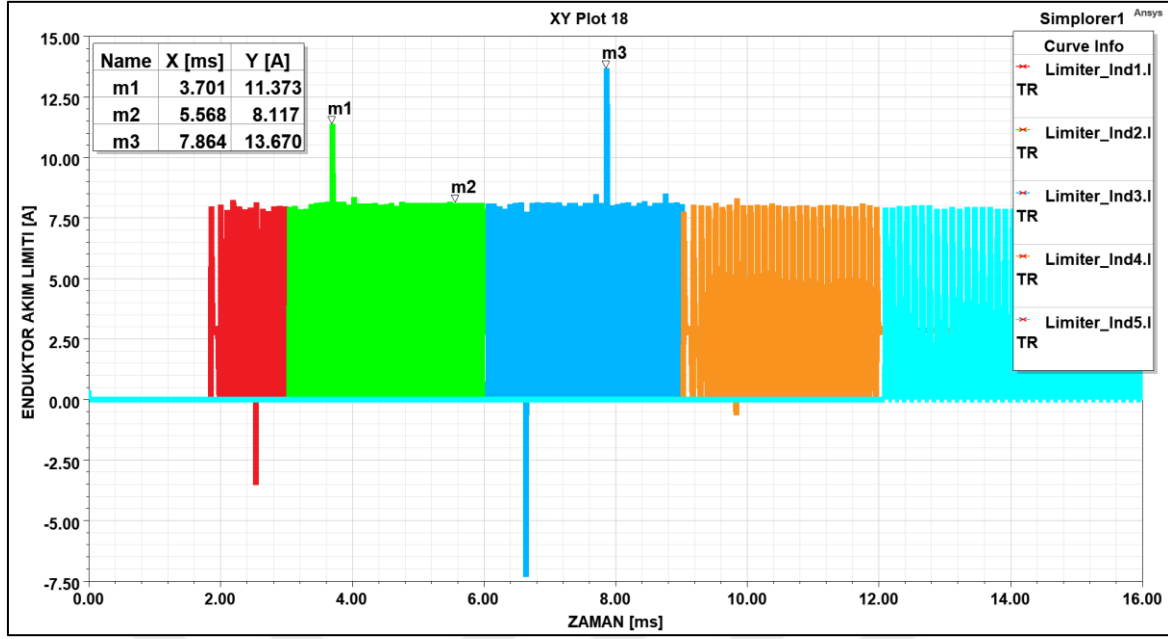
Şekil 6.10. Beşinci katmandaki mosfet'in anahtarlama sinyali grafiği

Akım limitleme amaçlı şönt yoluna eklenen endüktör için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Farklı endüktans değerlerine sahip endüktörler deneme yapılmadan önce akım limitleme devresinin etkisinin gözlemlenebilmesi ve karşılaştırma yapılabilmesi için endüktör kaldırılarak şönt mosfet üzerinden ölçülen akım değeri Şekil 6.11 ile gösterilmiştir.

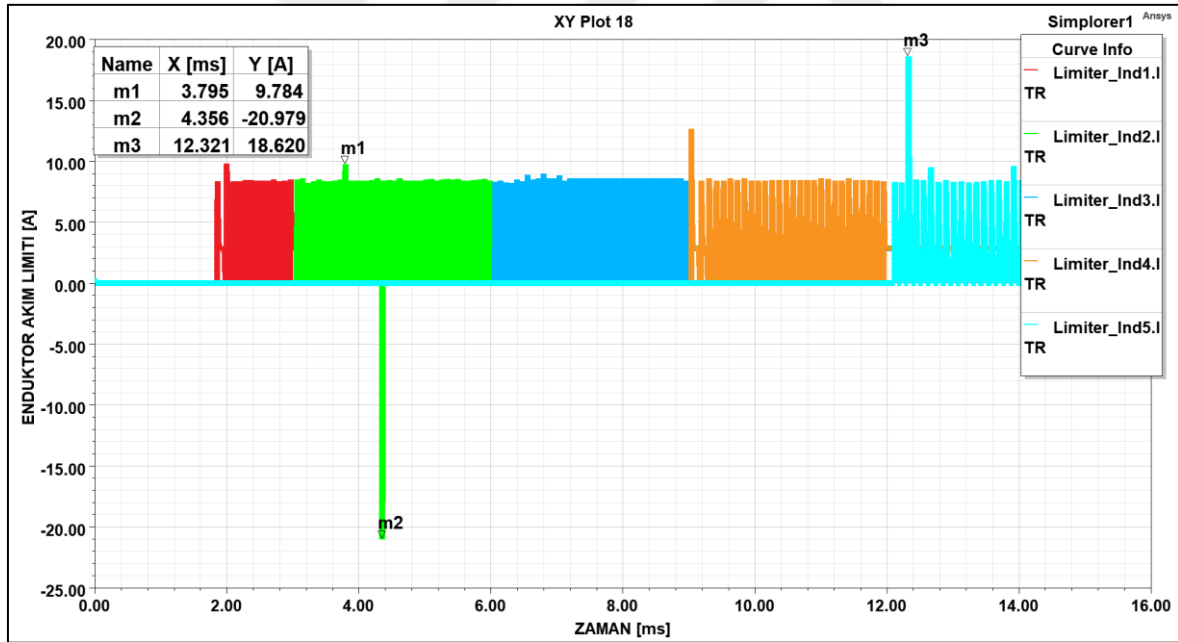


Şekil 6.11. Akım sınırlanmadan önce mosfet üzerinden geçen akım

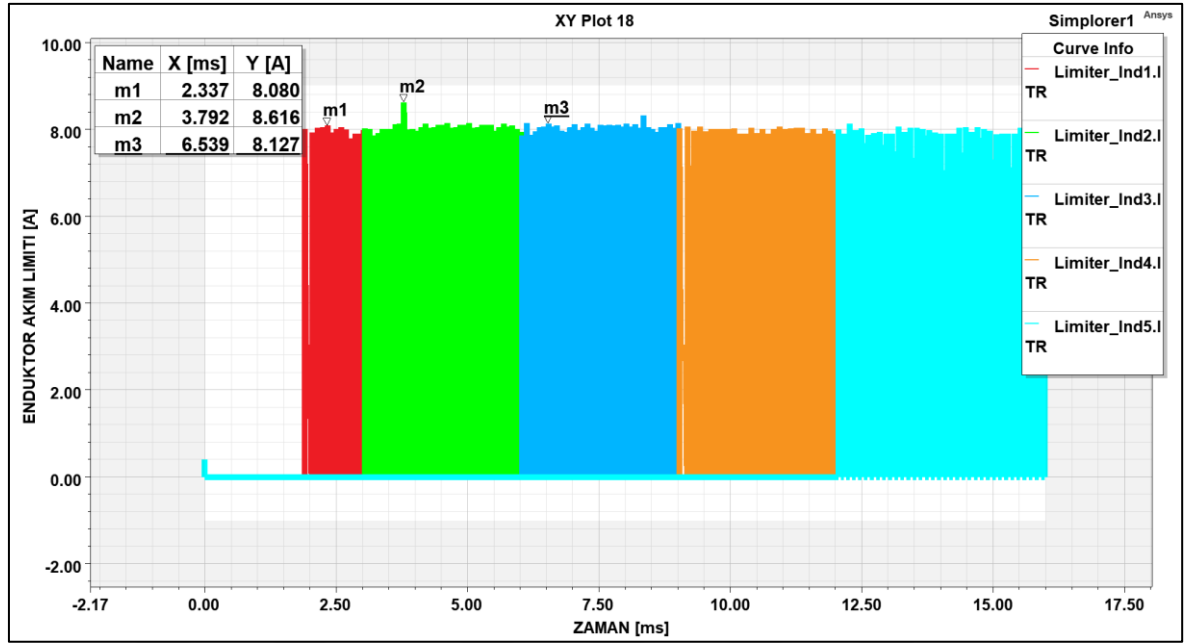
Şekil 6.12 ile Şekil 6.16 arasında farklı endüktans değerleri için şönt mosfet'ten geçen akımlar incelenmiştir. Bu değerlere bakılarak pasif akım limitleme endüktörü seçilmiştir. Uygulamada mosfet akımının sınırı, güneş paneli akımının yaklaşık 3,5 ila 4,5 katı civarına koyulur.



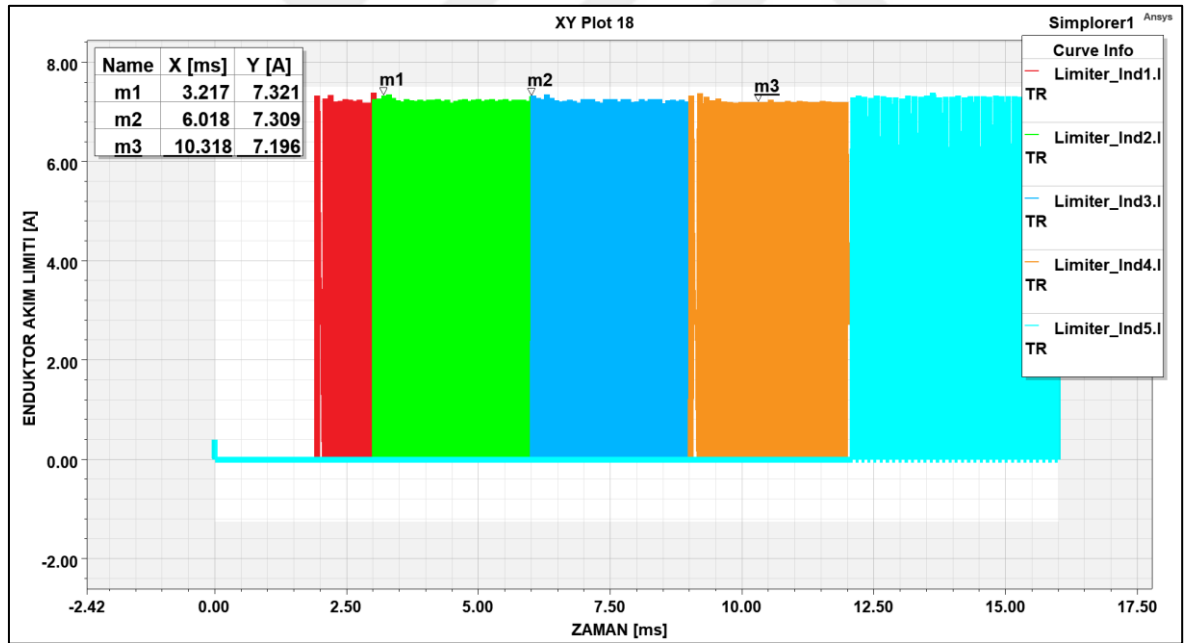
Şekil 6.12. $L=6.5 \mu\text{H}$ iken endüktör akımı



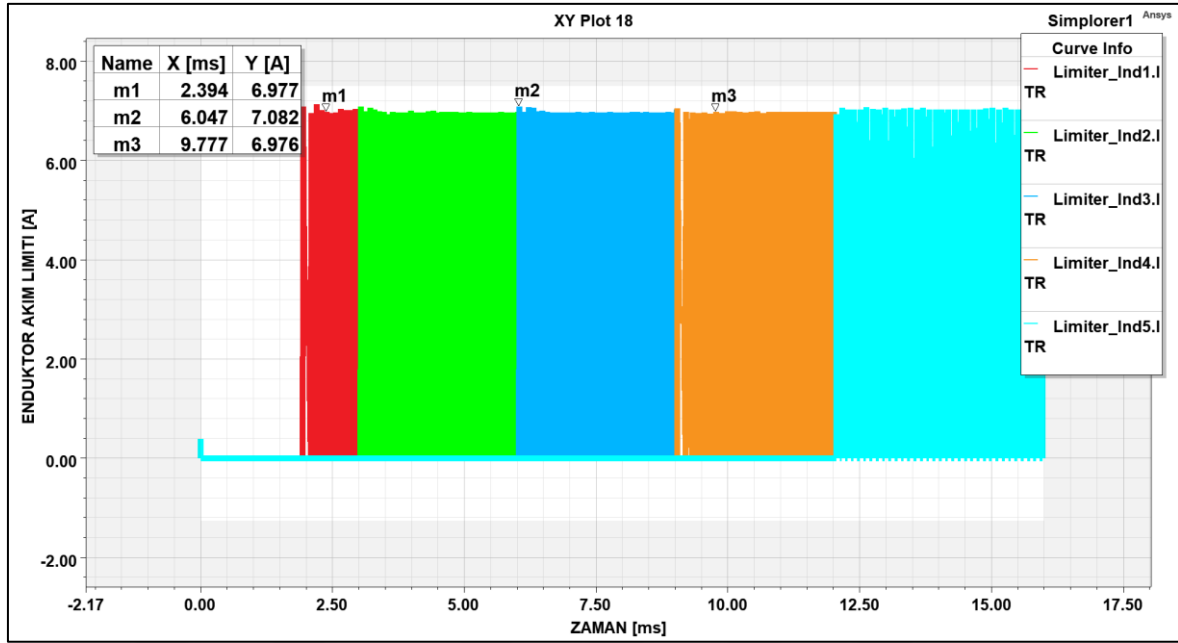
Şekil 6.13. $L=13 \mu\text{H}$ iken endüktör akımı



Şekil 6.14. $L=16 \mu\text{H}$ iken endüktör akımı



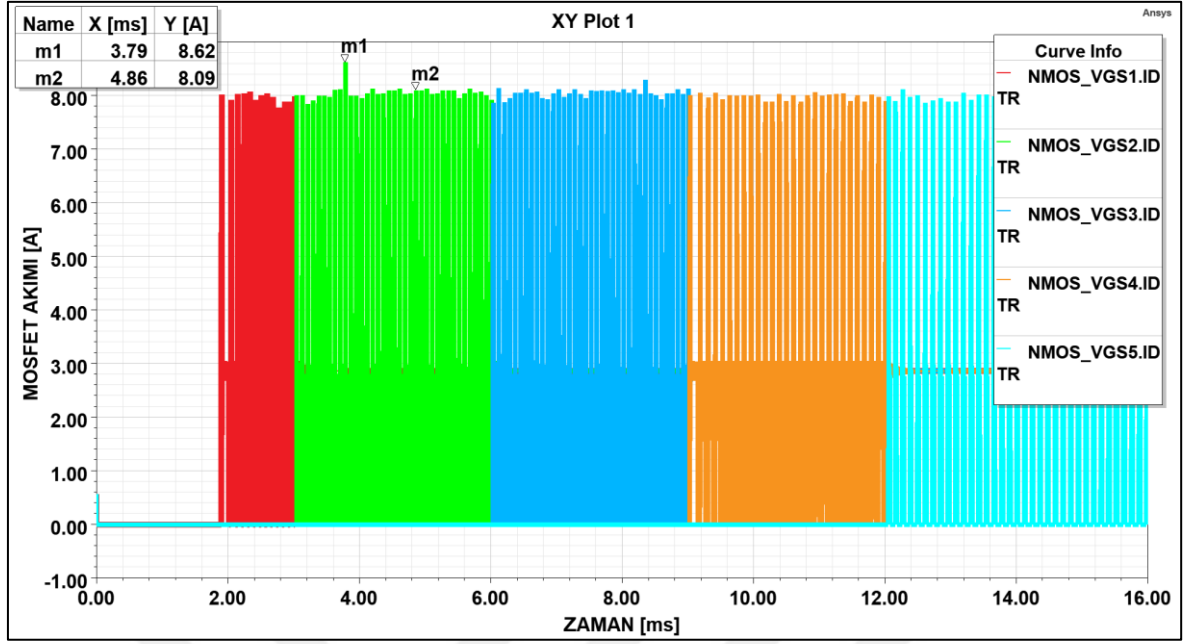
Şekil 6.15. $L=22 \mu\text{H}$ iken endüktör akımı



Şekil 6.16. $L=25 \mu\text{H}$ iken endüktör akımı

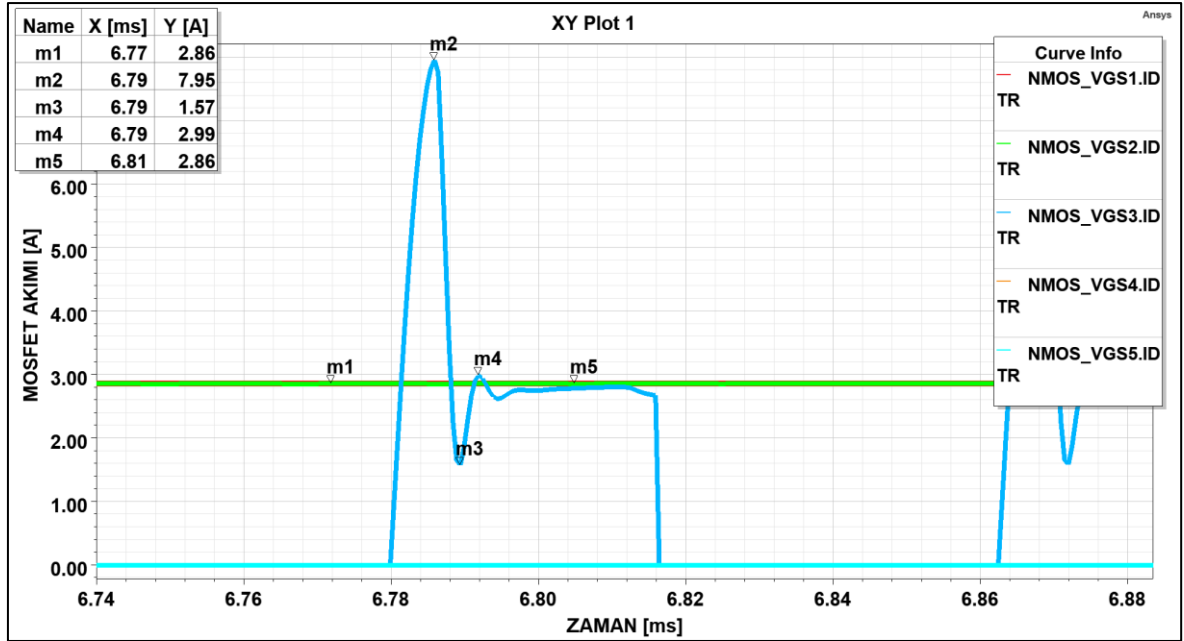
Standart bir değer olması nedeniyle $15 \mu\text{H}$ endüktans değeri kullanılacaktır. Güneş panellerinin akımı $2,86 \text{ A}$ olduğundan yaklaşık 8A 'e akım limiti koyulmuştur. $16 \mu\text{H}$ endüktans değeri akım limitleme endüktörüne seri bağlanan $1 \mu\text{H}$ kablağının modellenmesinden kaynaklı endüktansı da içerir.

S3R topolojisindeki şönt mosfet'in akımı Şekil 6.17'de gösterilmiştir. Mosfet akımı ile Şekil 6.14'te verilen akım sınırlayıcı endüktör akımının seri bağlı olduklarından dolayı eşit olduğu doğrulanmıştır.



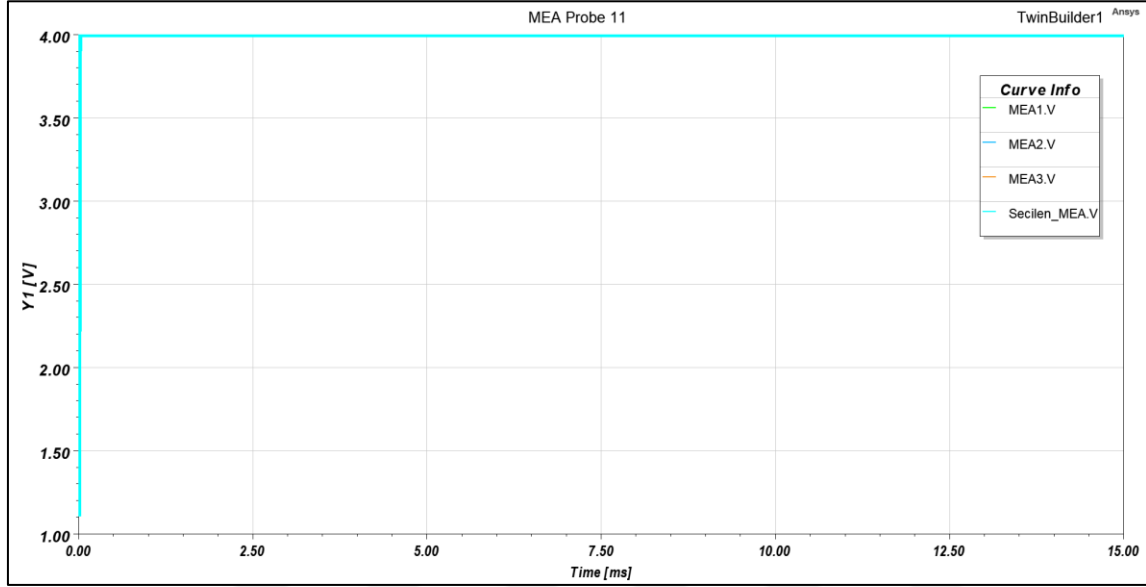
Şekil 6.17. Mosfet üzerinden geçen akım

Mosfet üzerinden geçen akım Şekil 6.18’de yakından gösterilmiştir. Akımın anahtar iletim modundayken tepe değerinde 7,95A’ye ulaştığı, sonrasında ise osilasyonlardan sonra 2,86A değerine ulaştığı gözlemlenmiştir.



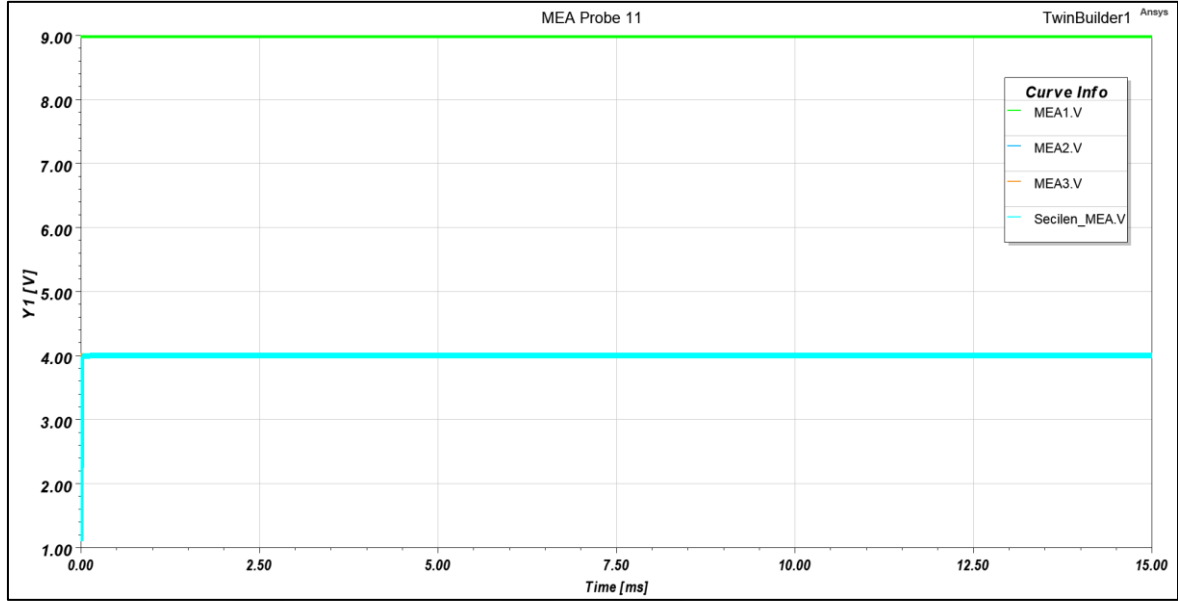
Şekil 6.18. Mosfet ve endüktör üzerinden geçen akımının yakından gösterimi

Yapılan benzetim çalışmalarında çoğunluk oylaması devresinde karşılaştırılacak üç sinyalin birbiriyle aynı olduğu durum için çıkış sinyali Şekil 6.19'da gösterilmiştir. Karşılaştırılan üç sinyalin birbiriyle eşit olduğu durum için çıkışa aktarılan sinyalin de aynı olduğu doğrulanmıştır.



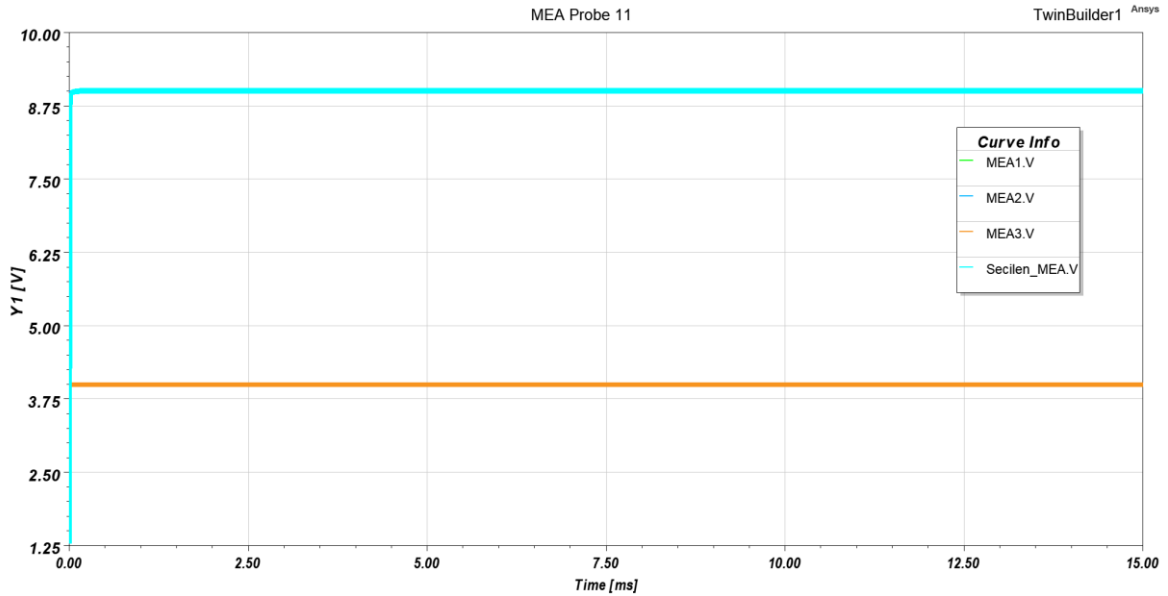
Şekil 6.19. MEA1 4V, MEA2 4V, MEA3 4V iken çıkış sinyali

Bütün girişlerin aynı olduğu durum incelendikten sonra girişlerden birine kasıtlı olarak hata yaptırılmıştır, Giriş sinyallerinin sırasıyla 9V, 4V ve 4V olduğu durum incelenmiştir. Devrenin hatalı sinyal yerine iki adet birbiri ile aynı değerde gelen sinyali çıkışa aktardığı ve devrenin amacına ulaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.20. MEA1 9V, MEA2 4V, MEA3 4V iken çıkış sinyali

Bütün girişlerin aynı olduğu durum incelendikten sonra girişlerden birine kasıtlı olarak hata yaptırılmıştır, Giriş sinyallerinin sırasıyla 9V, 9V ve 4V olduğu durum incelenmiştir. Devrenin hatalı sinyal yerine iki adet birbiri ile aynı değerde gelen sinyali çıkışa aktardığı ve devrenin amacına ulaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.21. MEA1 9V, MEA2 9V, MEA3 4V iken çıkış sinyali

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında uydularda bulunan elektrik güç sistemlerinde güneş panellerinden üretilen dengesiz güç ile yüklerin ihtiyaç duyduğu gücün tüketiminin yönetilmesi ve ana baranın uydunun yükleriyle uyumlu çalışabilmesi için güvenilir ve modüler bir regülasyon sistemi tasarlanmıştır. Uydularda kullanılan malzemelerin radyasyon dayanımlı ve yüksek maliyetli olmasından dolayı ana baranın regülasyonunun sağlanması büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda uydu elektrik güç sistemi için literatürde yer alan iki ana yöntem olan Maksimum Güç Noktası Takip (MPPT) ile Doğrudan Enerji Transferi (DET) karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Basit yapısı, güvenilirliği, maliyeti ve kontrol kolaylığı sebebiyle DET yöntemi bu tezde araştırılarak ana bara regülasyon yöntemi olarak seçilmiştir. Daha sonrasında DET yöntemleri arasında yer alan S3R ve S4R topolojileri incelenmiş ve aralarında karşılaştırma yapılmıştır.

Daha basit yapısı, daha az malzeme kullanımı ve buna bağlı olarak daha az hata yapma olasılığı, analog ve otonom olarak çalışabilmesi, kontrolünün kolay olması sebeplerinden ötürü ana baranın regülasyonu için S3R yöntemi tercih edilmiştir. S3R yönteminin çalışma prensibi ve ana özellikleri özetlenmiştir. Daha sonra sistemin kontrol algoritmasına yer verilmiş, sistemin matematiksel analiz ve tasarım çalışması yapılmıştır. Sonrasında benzetim çalışmalarına yer verilmiştir. Elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Benzetim çalışmalarında yük değişimlerine yer verilerek, sistemin dinamik yük koşulları altındaki tepkisi incelenmiştir ve regülasyonun yük değişiminde de korunduğu doğrulanmıştır. Sistemin modüler yapıda tasarıma elverişli olması güç ihtiyacı çok daha geniş ölçekteki uydularda paralel yapıda kullanılarak genişletilebilme imkânı sağlamaktadır. Bu da uydu güç ihtiyaçlarının giderek arttığı günümüz koşullarında tasarım esnekliği sağlamaktadır. Bu tez kapsamında yukarıda belirtilen literatür taraması, analizler ve benzetim çalışmalarıyla S3R topolojisi hakkında ilgili halihazırda kısıtlı literatüre katkı sağlanmıştır. Her ne kadar bu tez çalışmasında alçak yörünge uydu elektrik güç sistemi ele alındıysa da tasarlanan sistem, uyduların güç ihtiyaçları ve radyasyon değerleri göz önünde bulundurularak gelecek çalışmalarda başka yörüngeler için de uyarlanabilir.



KAYNAKLAR

1. İnternet: Türkiye Uzay Ajansı Resmî İnternet Sitesi. Web: <https://www.tua.gov.tr/tr> , Son Erişim Tarihi: 20.02.2024.
2. İnternet: Türkiye Uzay Ajansı. (2022). Milli Uzay Programı Strateji Belgesi 2022-2030. Web: <https://cdn.tua.gov.tr/63da672cab079.pdf> , Son Erişim Tarihi: 20.02.2024.
3. Patel, Mukund R. (2005). *Spacecraft power systems*. (1. Baskı). Florida: CRC Press, 3-368.
4. Mourra, O., Fernandez, A., Tonicello, F. ve Landstroem, S. (2012). *Multiple port DC DC converter for spacecraft power conditioning unit*. Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Orlando, 1278–1285.
5. İnternet: Avrupa Uzay Ajansı. (2020). Types of orbits. Web: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits, Son Erişim Tarihi: 28.11.2024.
6. Eakman, D., Lambeck, R., Mackowski, M. ve Slifer, L. (1994). Small spacecraft power and thermal subsystems. *NASA Raporu*. Maryland, 1-129.
7. Kuwajima, S., Sato, T., Tsuya, N., Kobayashi, M., Okamura, T. ve Honda, Y. (1988). *Digital sequential shunt regulator for solar power conditioning of engineering test satellite (ETS-V)*. 19th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Kyoto, 619-625.
8. Kamel, A.M., Abouzayed, U.R., El-Wakeel, A.S. ve Wahballah, W.A. (2018). *Intelligent sequential switching shunt regulation for satellite solar arrays*. 2018 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, 1-6.
9. Hyder, A.K., Wiley, R.L., Halpert, G., Flood, D.J. ve Sabripour, S. (Editörler). (2003). *Spacecraft power technologies*. (2. Baskı). Singapur: Imperial College Press, 71-149.
10. Chen, Q., Liu, Z., Zhang, X. ve Zhu, L. (Editörler). (2020). *Spacecraft power system technologies*. (1. Baskı). Singapur: Springer, 1-321.
11. Demirel, S. (2017). *Haberleşme uydusunun elektrik güç sisteminin modellenmesi ve analizi*. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
12. Sumathi, S., Ashok Kumar, L. ve Surekha, P. (Editörler). (2015). *Solar PV and Wind Energy Conversion Systems*. (1. Baskı). İsviçre: Springer, 1-807.
13. Capel, A., O’Sullivan, D. ve Marpinard, J.-C. (1988). High-power conditioning for space applications. *Proceedings of the IEEE*, 76(4), 391–408.
14. Castiaux, J.P., Bury, P. ve Liegeois, B. (1997). *Power conditioning units for high power geostationary satellites*. Record 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, St. Louis, 722-733.

15. Rouzies, C. ve Tastet, P. (1985). *Analysis of a particular working mode of S3R type regulator*. 1985 IEEE Power Electronics Specialists Conference (ESA SP-230), Toulouse, 73-81.
16. Meng, Y., Zhang, D. ve Zhu, H. (2022). Negative Effects of Unexpected Energy on Sequential Switching Shunt Regulator and Suppression Methods for High-Power Satellite. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 58(3), 2281-2290.
17. Denzinger, W. ve Dietrich, W. (2005). *Generic 100 V / high power bus conditioning*. Seventh European Space Power Conference, Stresa, 1-6.
18. Capel, A. ve Perol, P. (2001). *Comparative performance evaluation between the S4R and the S3R regulated bus topologies*. 2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, Vancouver, 1963-1969.
19. Gianninoto, G., Scorzafava, E. ve Carlini, D. (2017). *A new, single diode, sequential switching shunt regulator*. 11th European Space Power Conference, Yunanistan, 1-8.
20. Gowrishankara, C.K., Gowda, A.J. ve Srivani, S.G. (2016). *Improvements on spacecraft power regulators*. 2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems, Hindistan, 1-6.
21. Garrigós, A., Rubiato, J., Carrasco, J.A., Blanes, J.M. ve Ferreres, A. (2006). *Control loop design of the sequential switching shunt series regulator*. MELECON 2006 - 2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Malaga, 1194-1197.
22. Kamel, A.M., Abouzayed, U.R., El-Wakeel, A.S. ve Wahballah, W.A. (2018). *Intelligent sequential switching shunt regulation for satellite solar arrays*. 2018 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, 7-11.
23. Kumar, R.A., Suresh, M.S. ve Nagaraju J. (2006). Effect of solar array capacitance on the performance of switching shunt voltage regulator. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21(2), 543-548.
24. Zhu, H. ve Zhang, D. (2014). Influence of multijunction Ga/As solar array parasitic capacitance in S3R and solving methods for high-power applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(1), 180-183.
25. Blanes, J.M., Garrigós, A., Carraseo, J.A., Weinberg, A.H. ve Weinberg, S. (2008). *S3R optimization for high parasitic capacitance solar arrays*. 8th European Space Power Conference, Constance, 1-9.
26. Delepaut, C. (2008). *S3R stability margins and design guidelines*. 8th European Space Power Conference, Constance, 1-13.
27. Hyder, A.K., Wiley, R.L., Halpert, G., Flood, D.J. ve Sabripour, S. (Editörler). (2003). *Spacecraft power technologies*. (2. Baskı). Singapur: Imperial College Press, 353-412.
28. Zhu, H. ve Zhang, D. (2019). Design considerations of sequential switching shunt regulator for high-power applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(11), 9358-9369.

29. Dambhare, M.V., Butey, B. ve Moharil, S.V. (2021). Solar photovoltaic technology: a review of different types of solar cells and its future trends. *Journal of Physics: Conference Series*, 1913(2021), 1-17.
30. Du John H, V., Moni D, J. ve Gracia, D. (2020). A detailed review on Si, GaAs, and CIGS/Cdte based solar cells and efficiency comparison. *Przegląd Elektrotechniczny*, 96(12), 9-18.
31. İnternet: Amerikan Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Enerji Ofisi Resmî İnternet Sitesi. Multijunction III-V Photovoltaics Research. Web: <https://www.energy.gov/eere/solar/multijunction-iii-v-photovoltaics-research>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2024.
32. Yu, Z., Sandhu, S. ve Fan, S. (2014). Efficiency above the shockley-queisser limit by using nanophotonic effects to create multiple effective bandgaps with a single semiconductor. *Nano Letters*, 14(1), 66-70.
33. Yamaguchi, M., Dimroth, F., Geisz, J.F. ve Ekins-Daukes, N. (2021). Multi-junction solar cells paving the way for super high-efficiency. *Journal of Applied Physics*, 129(24), 1-16.
34. Papež, N., Dallaev, R., Țălu, Ș. ve Kaštyl, J. (2021). Overview of the current state of gallium arsenide-based solar cells. *Materials*, 14(11), 1-16.
35. Goryashin, N.N., Karpenko, A.V. ve Sidorov, A.S. (2014). Influence of the current mismatch in triple-junction solar cells on power losses in S3R. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(2), 722-728.
36. İnce, B., Yıldırım, D., Karagöz, F.E., Çetin, E. ve Şahin, Y. (2023). *High power density sequential switching shunt regulator module*. 13th European Space Power Conference (ESPC), Elche, 1-7.
37. Başkaya, E. ve Tamyürek, B. (2023). *Sequential switching shunt regulators for LEO satellite applications*. 14th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, 1-5.
38. Zhu, H. ve Zhang, D. (2014). Influence of multijunction Ga/As solar array parasitic capacitance in S3R and solving methods for high-power applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(1), 185-190.
39. Zhu, H. ve Zhang, D. (2020). Design considerations of sequential switching shunt regulator for high-power applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(11), 9358–9369.
40. Chen, Q., Liu, Z., Zhang, X., Zhu L. ve Peijian, Y. (Editörler). (2003). *Spacecraft power system technologies space science and technologies series*. Singapore: Springer Nature Singapore, 59-212.
41. Douay, N. (2011). *Galileo IOV electrical power subsystem relies on li-on battery charge management controlled by hardware*. 9th European Space Power Conference, Raphael, 6-10.

42. Garrigós, A., Carrasco, J.A, Rubiato, J., Ávila, E., Blanes, J.M. ve Sánchis E.K. (2004). *System model of the sequential switching shunt series regulator for spacecraft regulated high power busses*. IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, 2645–2650.
43. Garrigós, A., Carrasco, J.A., Blanes J.M. ve Sánchis E.K (2005). Modeling the sequential switching shunt series regulator. *IEEE Power Electronics Letters*, 3(1), 7–13.
44. Texas Instruments. (2013). AN-74 LM139 / LM239 / LM339 A quad of independently functioning comparators. *TI Raporu*. Teksas, 1-23.
45. Goryashin, N.N. ve Sidorov A.S. (2013). *Solar array regulator based on buck converter with sequential switched sections*. International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies ve Electron Devices, Rusya, 364-368.
46. Ababneh, M.T., Tarau, C., ve Anderson, W.G. (2019). *High temperature lightweight heat pipes for solid-state power amplifier (sspa) thermal management*. 18th IEEE ITherm Conference, Las Vegas, 656–665.
47. Polo, C.B. (2017). *See single event effects - radiation environment ve its effects in eee components ve hardness assurance for space applications*. ESA-CERN-SCC Workshop, İsviçre, 60.
48. Stassinopoulos, E.G., Barth, J.L. ve Stauffer, C.A. (2017). Measurement of cosmic ray ve trapped proton let spectra on the sts-95 host mission. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 64(8), 2007–2015.
49. İnternet: Draft single event effect specification. Web: <https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/seespec.htm>, Son Erişim Tarihi: 09.12.2023.
50. Avrupa Uzay Ajansı. (2014). Single event effects test method ve guidelines. *ESCC Raporu*. Fransa, 1–24.
51. International Rectifier. (2023). IRHE7130 (JANSR2N7261U) teknik kataloğu. *IR Raporu*. Kaliforniya, 1-13.
52. Graovac. D., Pürschel. M. ve Andreas, K. (2006). Mosfet power losses calculation using the datasheet parameters. *IR Raporu*. Almanya, 1–23.
53. International Rectifier. (2011). 16scyq060c power schottky rectifier datasheet. *IR Raporu*. Kaliforniya, 1–5.
54. Coilcraft. (2023). Outgassing compliant power inductors ae526pga series datasheet, *Coilcraft Raporu*, 1-4.



Gazili olmak ayrıcalıktır