

**FOTOVOLTAİK ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN
SÜPER KAPASİTÖR ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ İLE
AKTİF GÜÇ YÖNETİMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**ACTIVE POWER MANAGEMENT OF PHOTOVOLTAIC
ENERGY CONVERSION SYSTEMS BY MEANS OF
SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE SYSTEMS**

ASIM REHA ÇETİN

PROF. DR. IŞIK ÇADIRCI

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

ASIM REHA ÇETİN'in hazırladığı **Fotovoltaik Enerji Dönüşüm Sistemlerinin Süper kapasitör Enerji Depolama Sistemi ile Aktif Güç Yönetiminin Gerçekleştirilmesi**" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Muammer ERMİŞ

Başkan

Prof. Dr. Işık ÇADIRCI

Danışman

Prof. Dr. Özgür SALOR-DURNA

Üye

Doç. Dr. Ozan KEYSAN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Yakup Sabri ÖZKAZANÇ

Üye

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak / /..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Salih Bülent ALTEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

FOTOVOLTAİK ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN SÜPER KAPASİTÖR ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ İLE AKTİF GÜÇ YÖNETİMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Asım Reha ÇETİN

Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Işık ÇADIRCI

Haziran 2021, 92 sayfa

Bu çalışmada fotovoltaik panellerin gerçek zamanlı güç üretim eğrilerinin tahmini üretim eğrilerine yaklaştırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla süper kapasitörlerden oluşan enerji depolama bankası ve SiC yarı iletken tabanlı bir yükseltici indirici tipte çevirgeç tasarlanmıştır. Bu iki sistem yardımı ile enerji yönlendirme, geri döndürme ve depolama gerçekleştirilmiş ve gerçek zamanlı güç üretim eğrileri manipüle edilerek tahmin edilen güç üretim eğrisine yaklaştırılmıştır. Benzetim çalışmalarına ek olarak bir laboratuvar düzeneği kurularak temel düzeyde çalışma testleri yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan fotovoltaik panellerin güç üretim verileri Hacettepe’de bulunan Fotovoltaik Panel Kaplamalı Otopark projesinde kurulan panellerin üretim verileridir. Güneş panellerinin güç üretim karakteristikleri ve regüle edildikten sonraki güç üretim karakteristikleri incelenmiştir. Kurulan laboratuvar düzeneğinde ise bu amaçla tasarlanan çevirgecin başarımı ilk aşamada 3-fazlı tam dalga doğrultucu ile şebekeden beslenerek test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Süper kapasitör enerji depolama, yükseltici indirici kısıyıcı, yenilenebilir enerji, güç üretim regülasyonu, SiC tabanlı yarı iletken

ABSTRACT

ACTIVE POWER MANAGEMENT OF PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION SYSTEMS BY MEANS OF SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE SYSTEMS

Asım Reha ÇETİN

Master of Science, Department of Electrical-Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Işık ÇADIRCI

June 2021, 92 pages

In this thesis, it is aimed at approximating the power production of the photovoltaic (PV) panels to the estimated power production of the same panels. For this purpose, an energy storage bank composed of supercapacitors and a SiC power semiconductor-based buck-boost converter have been designed and implemented. By using both systems, energy produced by PV panels can be stored, directed, and returned back. Real-time power production can therefore be manipulated so that it becomes more correlative to the estimated or forecasted power production. In addition to the simulation studies, a laboratory setup has been designed. PV production data used in this work, have been collected from PV panels installed at Beytepe Campus, Hacettepe University, in the 48kW Photovoltaic Carport Project. Power production characteristics versus time before and after such a regulation have been examined. The developed laboratory setup has been tested at the initial stage by using a three-phase full-wave rectifier circuit at the input, supplied from the three-phase AC grid.

Key words: Supercapacitor energy storage, Buck-Boost converter, Renewable energy, Power production regulation, SiC semiconductor

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Eğitimime başladığımdan bu yana ve tez çalışmam sırasında anlayışlı olup yol gösteren karşılaştığımız problemlerde yardımcı olan danışmanım Prof. Dr. Işık ÇADIRCI' ya çok teşekkür ederim. Kullanılacak malzeme seçiminde yardımcı olan Dr. Serkan ÖZTÜRK' e, mikro işlemci programlama ve kart basımı konusunda yardımlarından dolayı bu çalışmayı neredeyse baştan sona beraber yürüttüğüm Gökhan GÖÇMEN' e teşekkür ederim. Mekanik tasarımlarda yol gösteren, yardımcı olan HAKAN AKŞİT' e teşekkür ederim. Bana ileri gitmem için gerekli motivasyonu sağlayan ev arkadaşım Veli TONTUŐ' a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni her zaman destekleyen yanımda olan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Asım Reha ÇETİN

Temmuz 2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGE DİZİNİ.....	xiii
KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. FOTOVOLTAİK SANTRALIN GÜÇ ÜRETİMİNİN SÜPER KAPASİTÖR ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ İLE REGÜLASYONU	6
2.1 Fotovoltaik Santral	6
2.2 Enerji Depolama Sistemi.....	10
2.3 Panellerin Güç Üretim Eğrileri Kullanılarak Yapılan Çalışmalar	11
2.3.1 Yaz Günü Regülasyonu: 13 Ağustos 2015.....	14
2.3.2 Kış Günü Regülasyonu: 19 Ocak 2015	18
2.3.3 Bir Aylık Regülasyon örneği: Haziran 2015	22
2.3.4 Bir Yıllık Regülasyon Örneği: 2015.....	24
2.4 Kapasitör Boyutlandırma	24
2.4.1 İki Süper Kapasitör ile Yapılan Benzetimler.....	24
2.4.2 Altı Süper Kapasitör ile Yapılan Benzetimler.....	27
2.5 Regülasyon Çıktıları.....	28
2.6 İndirici-Yükseltici Kıyıcı	29
2.6.1 İndirici Kıyıcı	33

2.6.2 Yükseltici Çevirgeç.....	37
2.6.3 Anahtarlama Frekansı Seçimi	39
2.7 SiC Yarı İletkenler.....	40
3. BENZETİM ÇALIŞMALARI	41
3.1 İndirici Tipte Çevirgeç İçin Benzetim Çalışmaları.....	41
3.2 Yükseltici Tipte Çevirgeç İçin Benzetim Çalışmaları	44
4. ÇEVİRGEÇ TASARIMI.....	47
4.1 Yarı İletken Seçimi	48
4.1.1 Kayıp Hesapları	49
4.2 Süper Kapasitör Seçimi	51
4.3 Endüktör Seçimi	51
4.4 Akım ve Gerilim Sensörleri, Yarı İletken Sürücü, Mikroişlemci ve Kapalı Döngü Denetim.....	52
4.5 Giriş Güç Kaynağı Tasarımı	56
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	57
5.1 Laboratuvar Düzeneginin Kurulumu.....	57
5.1.1 Elektrik Ekipmanları ve Elektronik Malzemeler	58
5.1.2 Mekanik malzemeler.....	62
5.2 Laboratuvar Düzenegi Test Sonuçları	64
6. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR.....	70
6.1 Sistemin Güneş Panelleri Çıkışına Entegrasyonu	72
KAYNAKLAR.....	74
Ekler	76
Ek 1. Kod.....	76
Ek 2. Benzetim şeması.....	82
Ek 3. Baskı devre kartı	83
Ek 4. Süper Kapasitör	86

Ek 5. Mikroişlemci.....	87
Ek 6. Akım Sensörü	88
Ek 7. Gerilim sensörü.....	89
Ek 8. SiC Yarı İletken	90

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Bazı depolama sistemlerinin güç yoğunluğu ve enerji yoğunluğu. [4]	2
Şekil 2. a) Fotovoltaik enerji dönüşüm sistemi, b) Güneş panelleri, c) Panellere bağlı eviriciler.	6
Şekil 3. Kurulu fotovoltaik sistemlerin ülkelere göre dağılımı. [7]	7
Şekil 4. Fotovoltaik evirici için bazı önemli gereksinimler.	8
Şekil 5. Okinawa’da kurulan 30MW gücündeki baraj tipi depolama sistemi.....	10
Şekil 6. Zamana bağlı güç eğrisi ve taralı alan enerjisi.	12
Şekil 7. Süper kapasitörlere gönderilmesi gereken veya süper kapasitörlerden sağlanması gereken enerji miktarları.	13
Şekil 8. 13 Ağustos 2015 gününe ait güç üretim eğrisi ve bu eğrinin hareketli ortalaması.	15
Şekil 9. 13 Ağustos 2015 gününe ait regülasyon sonrası güç üretim eğrisi, tahmini güç üretim eğrisi ve gerçek güç üretim eğrisi.	16
Şekil 10. Süper kapasitör gerilim, akım ve doluluk oranı.....	16
Şekil 11. Çevirgeç çalışma süreleri yüzdesi.....	17
Şekil 12. Kapasitör enerji değişim miktarı.....	18
Şekil 13. 19 Ocak 2015 gününe ait üretim ve tahmin eğrisi.	19
Şekil 14. 19 Ocak 2015 gününe ait güç üretim eğrisi, tahmini güç üretim eğrisi ve regülasyon sonrası güç üretim eğrisi.....	20
Şekil 15. Kapasitör gerilimi, akımı ve doluluk oranı.....	21
Şekil 16. Çevirgeç çalışma süreleri yüzdesi.....	21
Şekil 17. Kapasitör enerji değişim miktarı.....	22
Şekil 18. Haziran ayına ait rastgele seçilmiş 3 günlük regülasyon verileri.	23
Şekil 19. Haziran ayına ait rastgele seçilmiş 3 günlük kapasitör akım, gerilim ve doluluk oranı.....	23
Şekil 20. 2015 yılı için aylık ortalama mutlak hata.	24
Şekil 21. 4 Ekim 2015 gününe ait güç üretim ve tahmin eğrileri.	25
Şekil 22. 4 Ekim 2015 gününe ait güç üretim eğrisi, tahmini güç üretim eğrisi ve regülasyon sonrası güç üretim eğrisi.....	26
Şekil 23. Kapasitör gerilimi, akımı ve doluluk oranı.....	26

Şekil 24. 4 Ekim 2015 gününe ait güç üretim eğrisi, tahmini güç üretim eğrisi ve regülasyon sonrası güç üretim eğrisi.	27
Şekil 25. Kapasitör gerilimi, akımı ve doluluk oranı.	28
Şekil 26. Çift yönlü indirici-yükseltici kıyıcı.	30
Şekil 27. Kullanılan yardımcı devre elemanları ve kontrol blok şeması.....	31
Şekil 28. İndirici tipte çevirgeç çalışırken enerji aktarım yönleri.	32
Şekil 29. Yükseltici tipte çevirgeç çalışırken enerji aktarım yönleri.....	32
Şekil 30. İndirici tipte çevirgeç. [17].....	33
Şekil 31. Sırayla anahtar iletimdeyken ve anahtar kesimdeyken akım yönleri. [17]	34
Şekil 32. İndirici kıyıcı için endüktör gerilim ve akımı, kapasitör akımı ve diyot gerilimi dalga formları.	36
Şekil 33. Yükseltici tipte çevirgeç. [17]	37
Şekil 34. Sırayla anahtar iletimdeyken ve kesimdeyken akım yönleri. [17]	37
Şekil 35. Yükseltici tipte çevirgeç için endüktör gerilim ve akımı, diyot akımı dalga formları.	39
Şekil 36. İndirici tipte çevirgeç için benzetim çalışması sonuçları.	42
Şekil 37. İndirici tipte devre için kapasitör akım, gerilim ve kapasitör doluluk oranı. ..	43
Şekil 38. İndirici tipte devre için anahtarlama sinyali, yarı iletken gerilimi, akımı ve endüktör akımı (hatasız çalışma).	44
Şekil 39. Yükseltici tipte çevirgeç için benzetim çalışması sonuçları.....	45
Şekil 40. Yükseltici tipte devre için süper kapasitör akımı, gerilimi ve kapasitör doluluk oranı.	47
Şekil 41. Yükseltici tipte devre için anahtarlama sinyali, yarı iletken gerilimi, akımı ve endüktör akımı.	47
Şekil 42. Amper başına düşen yarı iletken fiyatları.....	48
Şekil 43. SiC tabanlı yarı iletken açılıp kapanma enerji kayıpları. [19].....	50
Şekil 44. PI denetleyici.	54
Şekil 45. Ayrık zamanda PI denetleyici.	54
Şekil 46. Mikro işlemci kütüphanesinde hazır bulunan PI denetleyici.	55
Şekil 47. Laboratuvarında kurulan deney seti	58
Şekil 48. Baskı devre kartlarının fotoğrafı.	59
Şekil 49. Laboratuvar düzeneğinin yandan görüntüsü	60
Şekil 50. Davlumbaz içerisindeki bobin görüntüsü.	60
Şekil 51. İndirici kıyıcı için deney düzeneği şeması.	62

Şekil 52. Yükseltici çevirici için deney düzeneği şeması.	62
Şekil 53. Soğutucu üzerindeki vida delikleri ve soğutucu boyutları.....	63
Şekil 54. Süper kapasitörler ve raf.	64
Şekil 55. İndirici çevirici için 25kW çıkış gücünde akım ve gerilim görüntüsü, 3 frekans çevrimi görünür halde.	65
Şekil 56. İndirici çevirici için yarı iletken (koyu mavi), kıyıcı diyot gerilimi (pembe), endüktör akımı (açık mavi).	65
Şekil 57. Yükseltici çevirici için 25kW çıkış gücünde akım ve gerilim görüntüsü.	66
Şekil 58. Yükseltici çevirici için 25kW çıkış gücünde akım ve gerilim görüntüsü, 2 frekans çevrimi görünür halde.	67
Şekil 59. Yarı iletken (pembe), kıyıcı diyot (koyu mavi) gerilimleri, endüktör akımı (açık mavi) ve çıkış akımı (yeşil).	68
Şekil 60. Yükseltici çevirici maksimum görev çevrimi için yarı iletken gerilimi (mavi) ve diyot gerilimi (pembe).....	69
Şekil 61. İndirici kıyıcı maksimum görev çevrimi için yarı iletken gerilimi (pembe) ve diyot gerilimi (mavi)	69
Şekil 62. Fotovoltaik panel çıkışına bağlantı şeması	73
Şekil 63. Benzetim devre şeması	82
Şekil 64. Ana kart ön yüzey, üst görünüm	83
Şekil 65. Ana kart arka yüzey, üst görünüm	84
Şekil 66. Güç kartının ön ve arka yüzeyi, üst görünüm.	85
Şekil 67. Süper kapasitör teknik özellikleri	86
Şekil 68. Mikroişlemci teknik özellikleri.....	87
Şekil 69. Akım Sensörü teknik özellikleri	88
Şekil 70. Gerilim sensörü teknik özellikleri.....	89
Şekil 71. Yarı iletken teknik özellikleri	90

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 1. Batarya ve süper kapasitör ömür çevrimleri.....	2
Çizelge 2. Endüstride öne çıkan süper kapasitör üretici firmalar ve ürünleri. [6].....	3
Çizelge 3. Süper kapasitör fiyatlarının yıllara göre değişimi. [6].....	3
Çizelge 4. Bir panele ait standart test koşullarında teknik özellikler.	9
Çizelge 5. Regülasyon öncesi ve sonrası aylık ortalama mutlak hata değerleri (W).	29
Çizelge 6. İndirici tipte devre için benzetim çalışması devre değişkenleri.	43
Çizelge 7. Yükseltici tipte devre için benzetim çalışması devre değişkenleri.....	46
Çizelge 8. Endüstride kullanılan bazı SiC yarı iletken fiyatları (2019).....	48
Çizelge 9. Kullanılan yarı iletken özellikleri CAS300M17BM2.	49
Çizelge 10. Süper kapasitör teknik özellikleri BMOD0063.....	51
Çizelge 11. Endüktöre ait teknik özellikler Mangoldt 1051604.....	52
Çizelge 12. Akım sensörü teknik özellikleri LF 510-S.	52
Çizelge 13. Gerilim sensörü teknik özellikleri LV25-1000.	53
Çizelge 14. Yarı iletken sürücüye ait teknik özellikler CGD15HB62P1.	53
Çizelge 15. Mikroişlemci teknik özellikleri TMS320F28379D.	54
Çizelge 16. Kapalı döngü denetleyici parametreleri (5kHz anahtarlama frekansı için). 56	
Çizelge 17. Üç faz doğrultucu modülü özellikleri VUO190-16N07.....	57
Çizelge 18. Devre kesici özellikleri A1N 125 TMF 125.....	57
Çizelge 19. Kullanılan elektriksel malzemelerin tam listesi.	61

KISALTMALAR

PV: Fotovoltaik Panel (ing. Photovoltaic panel)

kW kilovat (kilowatt)

kWp: kilovat pik (ing. Kilo Watts peak)

F: Farad

V: volt

A: Amper

s: saniye

DA: Doğru akım

$e(s), e(k)$: hata sinyali (sıra ile sürekli ve ayrık zamanda)

K_p, W_p : oransal kazanç

K_i, W_i : integral kazanç

$u(s), u(k)$: çıkış sinyali

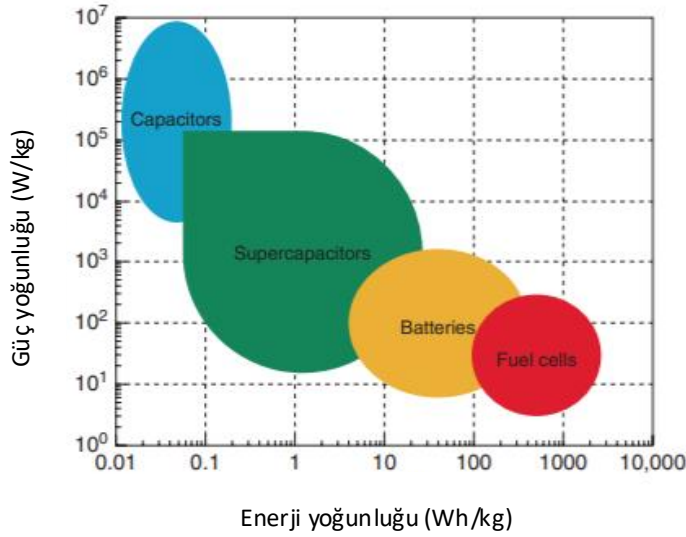
1. GİRİŞ

Sürdürülebilir, bağımsız ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep dünyada sürekli artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş panelleri ile yapılan elektrik üretimi çevreyi kirletmemesi ve düşük maliyet gibi sebepler nedeniyle kullanımı daha yaygındır. Ancak güneş panellerinin elektrik enerjisi üretimi çevresel faktörlere bağlı olarak (sıcaklık, nemlilik, güneş ışınlarının geliş açısı, bulutluluk vs.) sürekli değişmektedir. Bu durum enerji üretimi ve kullanımı için çeşitli sorunlara neden olmaktadır. Bu sorunları aşmak için güneş panellerinin enerji üretimi depolama sistemleri ile birlikte regüle edilmektedir. Batarya tipi depolayıcılar, hibrit depolayıcılar ve baraj tipi depolama sistemleri bu amaçla kullanılabilirlerdir. Bu tezde yapılan çalışma ise güneş panellerinin enerji üretiminin süper kapasitör tipi depolama sistemleri ile regüle edilmesini konu edinilmektedir.

Fotovoltaik panellerin batarya tipi enerji depolama sistemleri ile birlikte kullanılması oldukça yaygındır [1]. Ancak batarya tipi depolayıcıların bazı özellikleri süper kapasitörlere göre oldukça yetersizdir. Bataryaların ömür çevrimleri süper kapasitörlere göre oldukça düşüktür. Daha sık yenilenmeleri gerekmekte ve bu da kullanıcıya ek maliyet ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Batarya tipi depolayıcılar ve süper kapasitörlerin ömür çevrimleri Çizelge 1’de verilmiştir [2], [3]. Batarya tipi depolayıcılar yüksek enerji yoğunluğu olan, süper kapasitörler ise yüksek güç yoğunluğu olan depolama sistemleridir. Yani batarya tipi depolayıcılar uzun süreli enerji vermek için uygundur ancak ani enerji ihtiyacını karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Bazı depolama sistemlerinin enerji ve güç yoğunluğu karşılaştırması Şekil 1’de verilmektedir.

Çizelge 1. Batarya ve süper kapasitör ömür çevrimleri.

Ürün tipi	Ömür çevrimi (Doldur-boşalt sayısı)
Kurşun-asit batarya	700
Ni-Cd batarya	100-1,500
Lithium-ion batarya	500-1,000
Maxwell süper kapasitör	1,000,000



Şekil 1. Bazı depolama sistemlerinin güç yoğunluğu ve enerji yoğunluğu. [4]

Her iki depolama sisteminin birlikte kullanıldığı sistemler hibrit depolama sistemleri olarak isimlendirilmektedir ve bataryaların ömür çevrimini arttırdığı gözlemlenmiştir [5]. Ancak süper kapasitörlerin maliyetlerinin hızla azalması ve boyutlarının küçülmesi nedeniyle enerji depolama için gelecekte süper kapasitörlerin daha çok tercih edileceği öngörülmektedir. Süper kapasitörlere olan talep her yıl %20'ye yakın bir oranda artmaktadır [4]. Endüstride kullanılan bazı süper kapasitör markaları ve modelleri Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelge 2'deki Maxwell firmasının ürettiği 63F süper kapasitörler bu tez kapsamında yapılan çalışmada kullanılan enerji depolama ekipmanlarıdır. Süper

kapasitörlere ait yıllara göre fiyat değişimi ise Çizelge 3'te verilmiştir. Yüksek güç yoğunluğu, giderek düşen maliyet ve çevreye zararlarının az olması nedeniyle süper kapasitörler enerji depolama sistemleri arasında ön plana çıkmaktadır.

Çizelge 2. Endüstride öne çıkan süper kapasitör üretici firmalar ve ürünleri. [6]

Üretici firma	Süper kapasitör özellikleri
Power Star China (Tekli ürün)	50 F/2.7V, 300F/2.7V, 600F/2.7 V, ESR less than 1mΩ.
Panasonic (Tekli ürün)	0.022-70F, 2.1-5.5V, ESR 200 mΩ-350 Ω
Maxwell (Modül ürün)	63F/125V, 150A ESR 18 mΩ 94F/75 V, 50 A, ESR 15 mΩ
Vinatech	10-600F/2.3V, ESR 400 -20 mΩ, 3-350F/2.7, ESR 90-8 mΩ
Nesscap	15V/33F, ESR 27 mΩ 340V/ 51F, ESR 19 mΩ

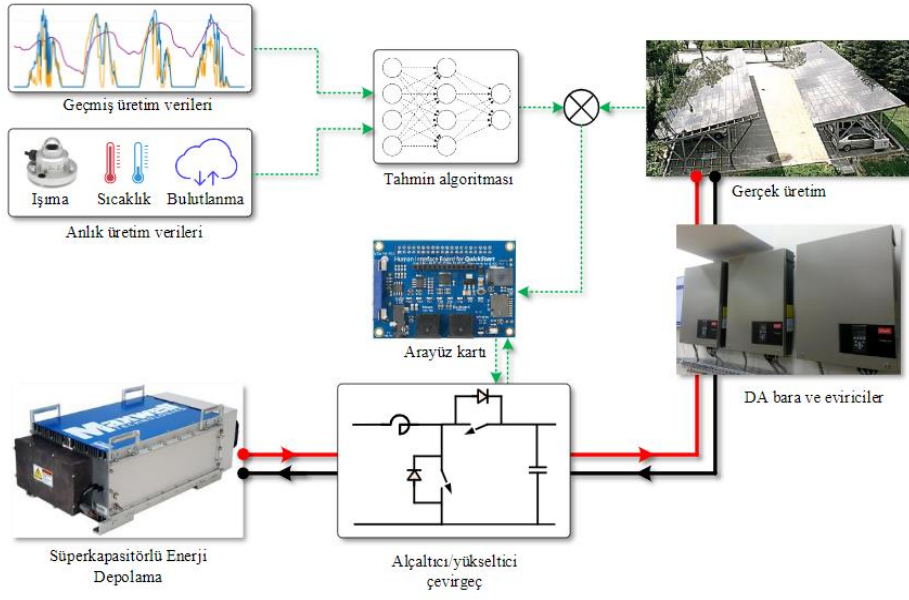
Çizelge 3. Süper kapasitör fiyatlarının yıllara göre değişimi. [6]

Yıl	Farad başına fiyat (fiyat/Farad) (usd)	kJ başına fiyat (fiyat/kJ) (usd)
1996	0.75	281.55
1998	0.40	151.23
2000	0.01	32
2002	0.023	7.51
2006	0.010	2.85
2010	0.005	1.28

Bu çalışmada fotovoltaik panellerin tahmin edilen güç üretim eğrisi ve gerçek üretilen güç üretim eğrisi arasındaki farkın enerji yönlendirme, depolama ve geri döndürme sistemi kullanılarak regüle edilebileceği gösterilmiştir, bu iki eğri arasındaki fark en aza indirilmiştir. Enerji yönlendirme ve geri döndürme için yükseltici/ indirici tipte bir çevirgeç kullanılması düşünülmüştür. Çevirgeç tasarımı SiC tabanlı yarı iletkenler ile

yapılmış olup, enerji depolama sistemi olarak ise süper kapasitörler kullanılmıştır. Fotovoltaik panellerin gerçek zamanlı güç üretimi ile tahmin edilen güç üretimi arasındaki fark azaltılmış, böylece gerçek zamanlı güç üretimi, tahmin edilen güç üretim eğrisine olabildiğince yaklaştırılmıştır. Yani, gerçek zamanlı üretim miktarı tahmin edilen üretim miktarından fazla ise fazlalık enerji süper kapasitörlere gönderilip depolanmakta, tam tersi durumda, gerçek zamanlı üretim miktarı tahmin edilen üretim miktarından az ise eksik enerji süper kapasitörlerden sağlanmaktadır. Bu işlem fotovoltaik panellerin güç üretim eğrisinin tamamı için gerçekleştirilmiştir. Bu projede kullanılan güç üretim verileri Hacettepe Üniversitesi Beytepe Yerleşkesi'nde bulunan 48kW Güneş Paneli Kaplamalı Otopark projesinde tasarlanan fotovoltaik panellerin gerçek zamanlı üretim verileridir. Fotovoltaik panellerin güç üretiminin yüksek olması sebebiyle, panellere bağlı 4 adet eviriciden sadece birinin güç üretim regülasyonu üzerinde çalışıldı. Bu da 12kW maksimum güç üretimine karşılık gelmektedir. Bu proje kapsamında tahmin eğrisinin, yapay zekâ tahmin algoritmaları kullanılarak oluşturulması planlandı. Ancak bu tez kapsamında laboratuvar düzeneği ve benzetim çalışmaları ile sistem analizi planlandığından, yapay zekâ tahmin algoritmalarına yer verilmedi. Bunun yerine, kabaca bir tahmin eğrisi geçmiş üretimlerin hareketli ortalaması alınarak oluşturuldu. Gerçek zamanlı üretim de bu tahmine yaklaştırılmaya çalışıldı.

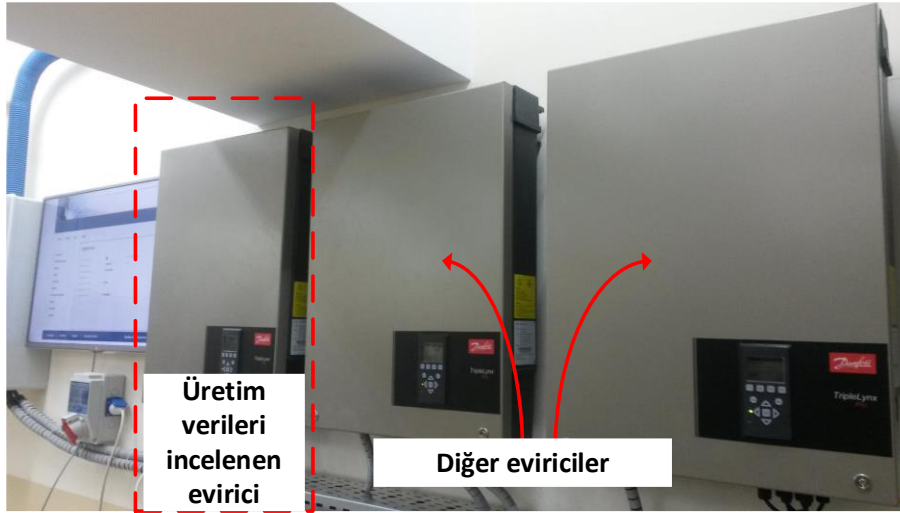
Oluşturulan sistemin blok şeması Şekil 2.a'da verilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere, bu sistem fotovoltaik paneller ve DA (doğru akım) bara eviricileri arasında paralel olarak yerleştirilen bir enerji depolama geri döndürme sistemidir. Tahmin algoritmasını ve devre parametrelerini manipüle eden bir ara yüz kartı tasarlandı. Bu kart yardımıyla yükseltici/indirici tipte çevirgeç üzerinden enerji yönlendirmesi yapıldı. Enerji depolama alanı olarak ise yine Şekil 2.a'da görülen süper kapasitörler kullanılmıştır. Güç üretim regülasyonu yapılacak paneller ve panellere bağlı eviricilerden 3 tanesi ise sırayla Şekil 2.b ve 2.c'de gösterilmiştir. Şekil 2.c'de görülen eviricilerin bir tanesine ait güç üretim regülasyonu incelenmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2. a) Fotovoltaik enerji dönüşüm sistemi, b) Güneş panelleri, c) Panellere bağlı eviriciler.

Bu tez fotovoltaik panellerin güç üretiminin süper kapasitör depolama sistemine dayalı regülasyonu için benzetim sonuçlarını, laboratuvar deneyi tasarımı ve sonuçlarını içermektedir. Bölüm 2’de tasarlanan sistem ve güç üretim verileri ile yapılan benzetimler paylaşıldı. Bölüm 3’te yapılan benzetim çalışmaları ve devrenin detayları verildi. Bölüm 4’te ise laboratuvar düzeneğinin tasarımı anlatıldı. Son olarak bölüm 5’te sonuçlar ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalara yer verildi.

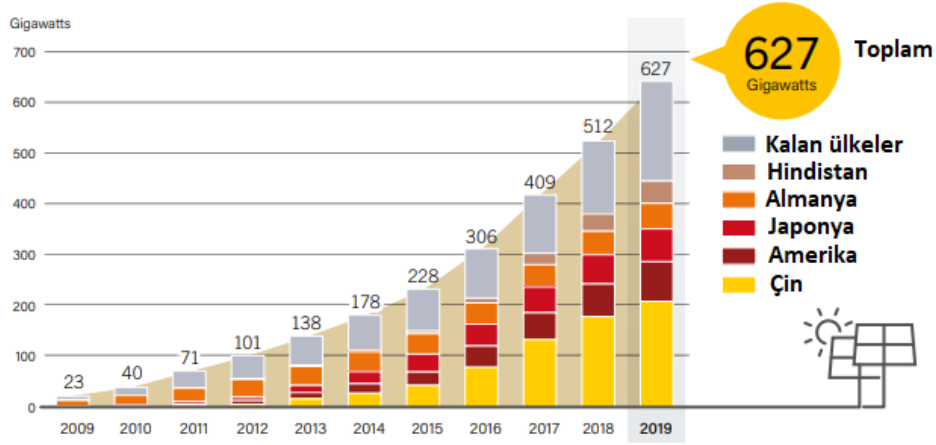
2. FOTOVOLTAİK SANTRALIN GÜÇ ÜRETİMİNİN SÜPER KAPASİTÖR ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ İLE REGÜLASYONU

Bu çalışmada 48kWp Fotovoltaik Panel Kaplamalı Otopark projesinde kurulmuş olan panellerin üretim verileri kullanılmıştır. Bu nedenle öncelikle panellere ait teknik özelliklere değinilmiştir. Daha sonra problemin tanımı ve uygulanan yöntem açıklanmış ve tasarlanan laboratuvar düzeneğine ait alt sistemler, teknik özellikleri ve teorik hesaplamalar bu kısımda incelenmiştir.

2.1 Fotovoltaik Santral

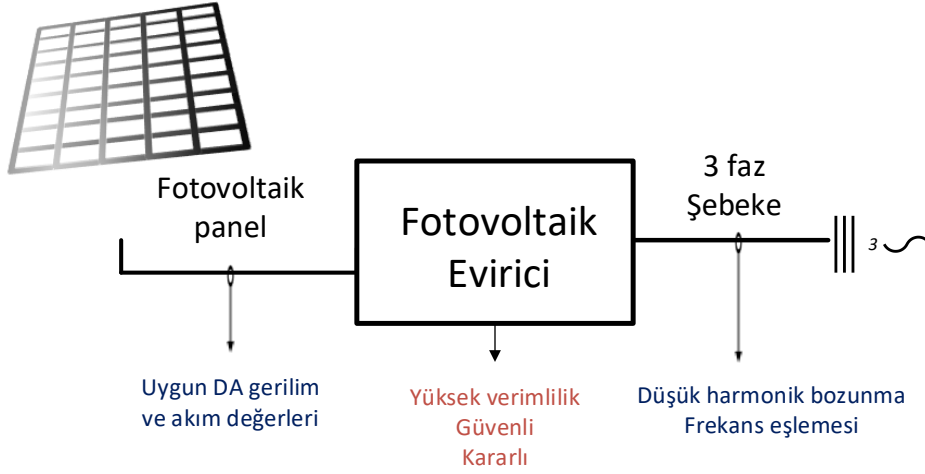
Yenilenebilir enerjinin en popüler uygulaması fotovoltaik enerji çevrim sistemleridir. Dünya üzerinde 2019 yılı itibariyle toplamda 627 Gigawatt güç üretimi yapabilecek fotovoltaik panel

bulunmaktadır [7]. Fotovoltaik panel kullanımının ülkelere göre dağılımı Şekil 3'te verilmiştir. Bu şekilden fotovoltaik panellere olan eğilimin giderek arttığı rahatlıkla gözlemlenebilir.



Şekil 3. Kurulu fotovoltaik sistemlerin ülkelere göre dağılımı. [7]

Şebekeye bağlı fotovoltaik panellerde enerji aktarımının yüksek verimlilikte ve güvenilir bir şekilde yapılması gerekmektedir. Öte yandan güneş panellerinin enerji üretimi dış etmenlere bağlı olarak sürekli değişmektedir (sıcaklık, nem, ışımaya, gölgelenme vb.). Bu nedenle fotovoltaik santrallerin şebekeye entegrasyonu güç elektroniği sistemleri ile yapılır. Bu sistemler fotovoltaik eviriciler olarak adlandırılır. Fotovoltaik eviricilerin yüksek verimlilikte kararlı bir durumda çalışması beklenir. Güneş panelleri tarafında uygun DA gerilim ve akım değerleri ile çalışması gerekirken, şebeke tarafında toplam harmonik bozunma ile ilgili gereksinimleri karşılaması gerekmektedir. Basit bir fotovoltaik evirici sistemin şebeke bağlantısı ve gereksinimleri Şekil 4'te verilmektedir.



Şekil 4. Fotovoltaik evirici için bazı önemli gereksinimler.

Fotovoltaik panellerin üretiminde kullanılan materyallere göre verimlilikleri değişiklik göstermektedir. Hücre verimliliği olarak çoklu kristal fotovoltaik paneller %16, tekli kristal %20, ince film fotovoltaik paneller ise %12 verimlilikte olmaktadır [8]. Fotovoltaik panellerde her hücre kendi akım ve gerilim değerlerini üretir. Birkaç hücre birleştirilerek modüller oluşturulur ve verimliliği daha düşük olmaktadır. Seri bağlı hücreler daha yüksek gerilim değerlerine çıkmayı sağlarken, paralel bağlı hücreler daha fazla akım verebilmektedir.

Beytepe’de bulunan 48kW güneş paneli kaplamalı otopark projesinde ise ince film teknolojisine sahip paneller kullanılmıştır. Bu paneller kadmiyum-tellür (Cd-Te) elementleri kullanılarak üretilmiştir. Standart test koşullarında (hava kütlesi 1.5, ışınma: $1000\text{W}/\text{m}^2$, sıcaklık: 25°C) her panel 75W maksimum güce sahiptir. 24 paralel 12 seri bağlantı ile 22kW güç elde edilecek şekilde tasarlanmıştır. Bir panele ait standart test koşullarında teknik özellikler Çizelge 4’te verilmektedir.

Çizelge 4. Bir panele ait standart test koşullarında teknik özellikler.

Panel modeli	Calyxo CX3
Panel Tipi	İnce film Cd-Te
Maksimum güçte gerilim	43V
Maksimum güçte akım	1.83A
Ortalama ömür	10 yıl

Güneş panellerinin enerji üretimi ise dış etkenlere bağlı olarak sürekli değişmektedir. Güneş ışınlarının geliş süresi, açısı, ortam sıcaklığı, nemlilik, bulutlanma gibi etkenlere bağlı olarak panellerin anlık enerji üretimi artıp azalmaktadır. Bu nedenle büyük güneş santrallerinin şebekelere bağlanması arz talep dengesinde bozulmalara ve problemlere neden olmaktadır [9]. Bir şebekede arz talep dengesizliği istenmeyen bir durumdur ve birtakım sorunlara yol açmaktadır. Elektrik şebekesinin karalılığı ve güvenilirliği arz talep dengesinin korunabilmesiyle mümkündür. Talep edilen fazla enerji üretildiğinde şebekede frekans ve gerilim yükselmeleri gözlenmekte, talep edilenden az enerji üretildiğinde ise kesintisiz güç sağlanması ve şebeke kararlılığı tehlikeye düşmekte, şebekede gerilim ve frekans dalgalanmaları gözlenmektedir [10]. Basitçe bu iki sebepten dolayı elektrik şebekelerinde arz talep dengesini korumak elektrik dağıtım ve iletim şirketlerinin başlıca sorumluluklarından birisidir. Güneş panellerinin enerji üretimindeki öngörülemeyen dalgalanma, dağıtım şirketleri tarafından panel sahibi üreticilere ceza olarak yansıtılabilmektedir. Bu da üretici tarafından maddi kayıplara neden olabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı fotovoltaik sistemler enerji depolama sistemleri ile birlikte kullanılmaktadır.

Fotovoltaik sistemler ve enerji depolama ve geri döndürme sistemlerinin birlikte kullanımları günümüzde daha çok bataryalar yardımıyla yapılmaktadır. Buna ek olarak enerji depolamanın barajlarda ve havuzlarda yapıldığı sistemler de mevcuttur. Bu iki sistemde de enerji yoğunluğunun yüksek olduğu ancak güç yoğunluğunun düşük olduğu sistemlerdir. Ani güç depolama ve sağlama olanakları düşüktür ancak çok uzun süreli enerji sağlayabilmektedir. Öte yandan süper kapasitörlerin güç yoğunluğu yüksek ancak enerji yoğunluğu düşüktür. Bu teze konu olan laboratuvar düzeneğinde tasarlanan depolama sisteminde süper kapasitörler kullanılarak ani güç değişimlerine de tepki

verilmesi sağlandı. Uzun süreli enerji depolama veya sağlama konusunda ise süper kapasitör enerji depolama sistemi yetersiz kalmaktadır.

2.2 Enerji Depolama Sistemi

Fotovoltaik panellerin enerji üretiminin dış etmenlere bağlı olarak sürekli değişmesi nedeniyle enerji depolama sistemleri ile birlikte kullanılması oldukça yaygındır. Yüksek kapasiteli fotovoltaik panellerin enerji depolaması için baraj tipi depolama sistemleri kullanılmaktadır. Fotovoltaik panellerde üretilen enerji su pompaları yardımı ile suyu daha yüksekteki bir baraja taşımak için kullanılır. Gerektiğinde su yüksekteki barajdan serbest bırakılarak elektrik üretimi yapılır. Okinawa’da kurulan güneş panellerine bağlı 30MW gücündeki baraj tipi depolama sistemi Şekil 5’te verilmiştir. [11]



Şekil 5. Okinawa’da kurulan 30MW gücündeki baraj tipi depolama sistemi.

Daha düşük güçlerde üretim yapan fotovoltaik panellerde ise batarya tipi enerji depolama sistemi kullanımı yaygındır. Li-ion, NiCd, NaS bataryalar bu amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır.[12] Güvenilir ve kurulumunun kolay olması yerleşim yerlerinde dahi kullanılmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte batarya ve süper kapasitörlerin birlikte kullanıldığı enerji depolama sistemlerine hibrit enerji depolama sistemi denilmektedir. Hibrit sistemlerde enerji depolama sisteminin ömrü daha uzun olmakta ve güç kalitesinde yükselme gözlemlenmektedir.

Bu tezde yapılan çalışmada ise enerji depolama sistemi olarak süper kapasitörler tek başına kullanıldı. Süper kapasitörlerin diğer enerji depolama sistemlerine göre avantajları şu şekilde sıralanabilir.

- Ömür çevrimleri diğer depolama sistemlerine daha yüksektir. Bu da daha uzun süreli kullanımı mümkün kılmaktadır. Bu nedenle çevreye zararı daha diğer enerji depolama ekipmanlarına göre kısıtlı kalmaktadır.
- kW başına maliyeti diğer depolama sistemlerinin çoğundan daha düşüktür. [13]
- Yüksek güç yoğunluğu nedeniyle anlık enerji ihtiyaçlarına cevap verebilir.

2.3 Panellerin Güç Üretim Eğrileri Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

Bu kısımda Hacettepe’de bulunan güneş panellerinin enerji üretim verileri kullanılarak benzetim çalışmaları yapıldı. Gerçek enerji üretim eğrisi ve tahmin eğrisi karşılaştırıldı. Gerçek enerji üretim eğrisinin, tahmin eğrisinden fazla olduğu durumlarda fazlalık kısım süper kapasitörlerde depolandı. Tam tersi durumda, tahmin eğrisinin, enerji üretim eğrisinden fazla olduğu durumlarda ise aradaki fark süper kapasitörlerden sağlandı. Böylelikle tahmin eğrisi ve gerçek enerji üretim eğrisi birbirine olabildiğince yaklaştırıldı. Benzetim çalışmaları yapılırken tahmin eğrisi olarak, gerçek üretim eğrisinin hareketli ortalaması kullanıldı. Güç üretim dalgalanmasının fazla olduğu günler arasında rastgele seçilen bir kış günü ve bir yaz günü üretim, tahmin ve regülasyon örnekleri incelendi.

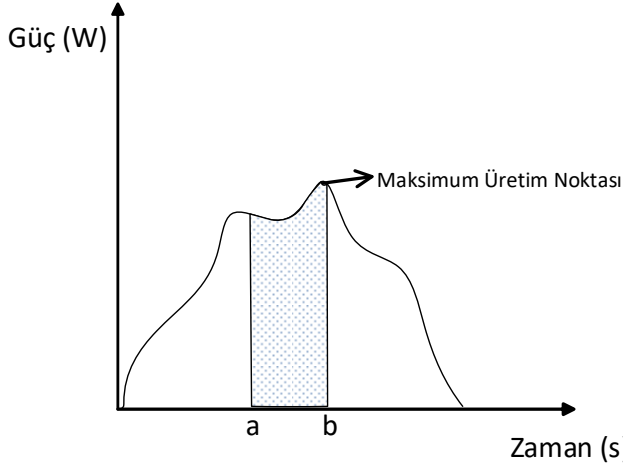
Henüz anahtarlama frekansı ve indirici-yükseltici kıyıcı devresine karar verilmediği için yükseltici çevirici ve indirici kıyıcı yerine kontrol edilebilir gerilim kaynakları konuldu. Süper kapasitörler bu kaynaklar üzerinden şarj edildi ve boşaltıldı. Benzetim çözünürlüğü 100Hz değerine kadar düşürüldü ve uzun enerji üretim verisi serileri daha kısa sürede incelenebildi. Öte yandan, bu projede, yükseltici ve indirici çevirgeçler kontrol edilebilir gerilim kaynağı olarak kullanılacağı için benzetim çalışmaları gerçek duruma yakın oldu.

Benzetim ortamında bahsedilen gerilim kaynakları enerji aktarım miktarı üzerinden kontrol edildi. Kapasitörde depolanan enerji miktarı denklem (1)’de verildi. Benzetim

çalışmalarındaki gerilim kaynakları bu denklem üzerinden yola çıkılarak kontrol edildi. Bu denklem de C kapasitans, V ise kapasitör üzerindeki gerilimdir.

$$\text{Kapasitör enerjisi} = \frac{1}{2}CV^2 \quad (1)$$

Gücün zamana göre integrali toplam enerji miktarını vermektedir. Bir zamana bağlı güç eğrisinde belli bir aralıktaki toplam enerji miktarı, güç eğrisinin altında kalan kısmın alanı bulunarak hesaplanabilir. Basit bir örnek olarak Şekil 6'da taralı alan a ve b süreleri arasındaki toplam enerji miktarını göstermektedir.

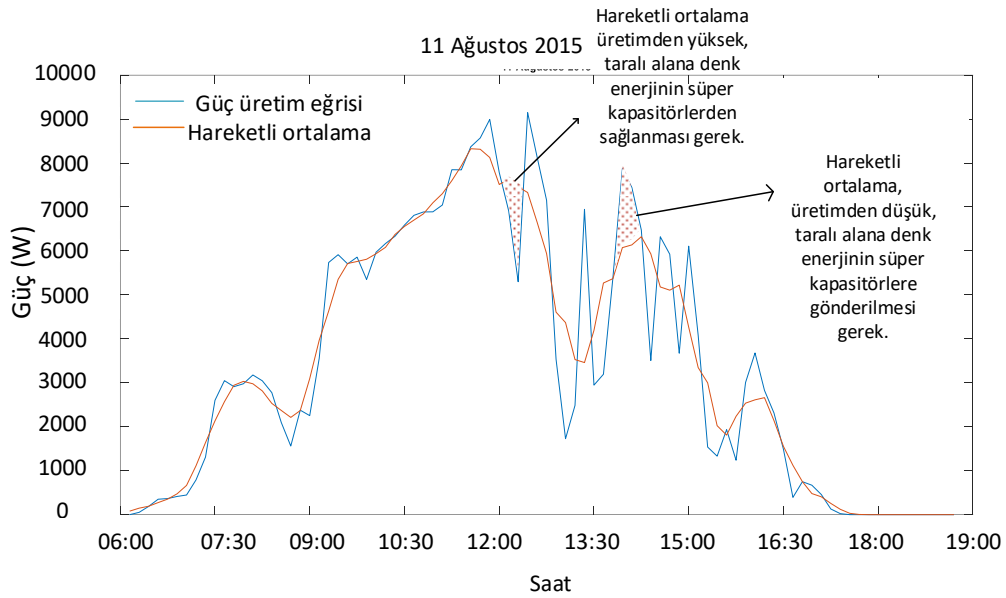


Şekil 6. Zamana bağlı güç eğrisi ve taralı alan enerjisi.

Benzetim çalışmalarında güneş panellerinden alınan güç üretim verilerinin hareketli ortalaması alınarak bir tahmin eğrisi oluşturuldu. Bu tahmin eğrisi ve üretim eğrisi arasındaki enerji miktarı süper kapasitörlerde depolandı veya süper kapasitörlerden sağlandı. Şekil 7'de güneş panelinden alınan tipik bir üretim eğrisi (11 Ağustos 2015) ve bu eğrinin hareketli ortalaması görünmektedir. Dikey eksen W cinsinden güç yatay eksen saniye cinsinden zamandır. Örnek olarak, taralı alanlarda gösterilen enerji miktarları süper kapasitörlere gönderilmesi gereken veya süper kapasitörlerden sağlanması gereken enerji miktarlarıdır. Benzetim çalışmasında bu işlem, günlerin tamamı ve her anı için tekrar edildi.

Panellerin güç üretim eğrisinin hareketli ortalaması tahmin eğrisi olarak kullanıldı. Hareketli ortalama eğrisi iki adımda oluşturuldu. İlk adımda pencere aralığı üç olarak

seçildi. Oluşturulan eğrinin tekrar hareketli ortalaması alındı ve pencere aralığı beş olarak seçildi. Bu yöntemle elde edilen hareketli ortalama eğrisi ve güç üretim eğrisi arasındaki ortalama mutlak hata %1 ve %9 arasında kök ortalama kare hata ise %3 ve %17 arasında değişmektedir. Literatürdeki güneş panellerinin güç üretimine yönelik tahmin çalışmaları incelendiğinde ortalama mutlak hatanın %10 [14] değerlerinde kök ortalama kare hatanın ise %18 [15] değerlerinde olduğu gözlemlenmiştir. Kullanılan yöntemlere göre bu değerler değişmektedir.[16] Adı geçen çalışmalarda tahmin eğrileri geçmiş üretim verilerinden yararlanılarak oluşturulan tahmin eğrileridir. Bu projede kullanılan hareketli ortalama eğrisi literatürdeki tahmin eğrilerine yakın olacak şekilde ortalama mutlak hata ve kök ortalama mutlak hata değerlerine dikkat edilerek oluşturuldu. Güneş panellerinden gelen veri 10 dakikada bir veri olarak kaydedilmektedir. Bu güç üretim verisi 1 saniyede 1 veri olacak şekilde ara noktalara doğrusal olarak noktalar eklendi.



Şekil 7. Süper kapasitörlere gönderilmesi gereken veya süper kapasitörlerden sağlanması gereken enerji miktarları.

Şekil 7’den de görüleceği üzere ilgilenilen enerji iki güç eğrisi arasında kalan alandır. Aktarılan enerji miktarını kontrol edebilmek için denklem (1) ayrık zamanlı olacak şekilde yeniden kuruldu. Yükseltici ve indirici çeviricilere denk gelen kontrol edilebilen gerilim kaynakları için iki farklı denklem olarak tekrar düzenlendi. Denklem (2) indirici güç kaynağı, denklem (3) ise yükseltici güç kaynağı için kurulan eşitliği göstermektedir.

$$\frac{1}{2} C(V_f^2 - V_i^2) = P_g - P_e \quad (2)$$

$$\frac{1}{2} C(V_f^2 - V_i^2) = P_e - P_g \quad (3)$$

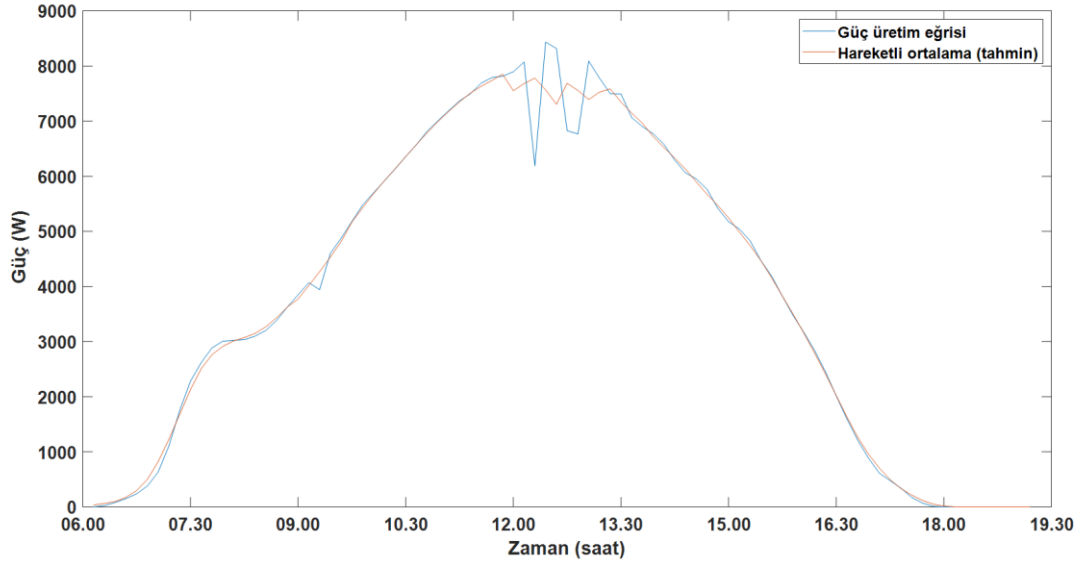
C kapasitans, V_f kapasitör üzerindeki son gerilim değeri, V_i kapasitör üzerindeki bir önceki an için gerilim değeri, P_g Güneş panellerindeki anlık güç üretimi, P_e tahmin edilen anlık güç üretimidir. Kısaca üretilen ve tahmin edilen iki güç eğrisi arasındaki miktarın ayırık zamana göre integrali alınmakta ve kapasitör gerilimleri bu değere göre manipüle edilmektedir. Burada her çözünürlük anı için kapasitörlerin gerilim değeri ölçüldü, tahmin ve gerçek üretilen güç eğrisi arasındaki farkın enerji olarak kapasitörde depolanması veya kapasitörden sağlanması hedeflendi. Kontrol edilebilir gerilim kaynaklarına V_f değeri gönderilerek bir çözünürlük anı işlemi tamamlandı.

Bu benzetim çalışmasında kullanılan yöntemle anahtarlama frekansı gerekmeceğinden ayırık zamanda daha düşük çözünürlüklerde çalışma imkânı elde edildi. Böylelikle sistemin çalışma prensibinden ödün verilmeden benzetim süreleri kısaltıldı. Benzetim çalışmalarında güç üretim dalgalanmasının fazla olduğu günler arasından seçilmiş bir yaz günü ve bir kış günü örneği üzerinde çalışıldı. Buna ek olarak, günlük ve aylık tabanda depolama ve geri döndürme çalışmaları incelendi. Şekil 7'deki grafik incelendiğinde tahminden en yüksek sapma kabaca 1.5 kW ve 10dk boyunca olduğu yani 900kJ bir depolama ünitesine ihtiyaç olduğu çıkarılabilir. Bu ihtiyacı her biri 125V anma gerilimine sahip 4 adet 63F seri bağlı kapasitör bankası karşılayabilir. Bu ünite denklem (1)'deki eşitlik kullanıldığında yarı anma gerilimi için toplamda 969kJ enerji depolama kabiliyetine sahiptir. Bu nedenle düşünülen enerji depolama ünitesinin yeterli olacağı öngörülebilir.

2.3.1 Yaz Günü Regülasyonu: 13 Ağustos 2015

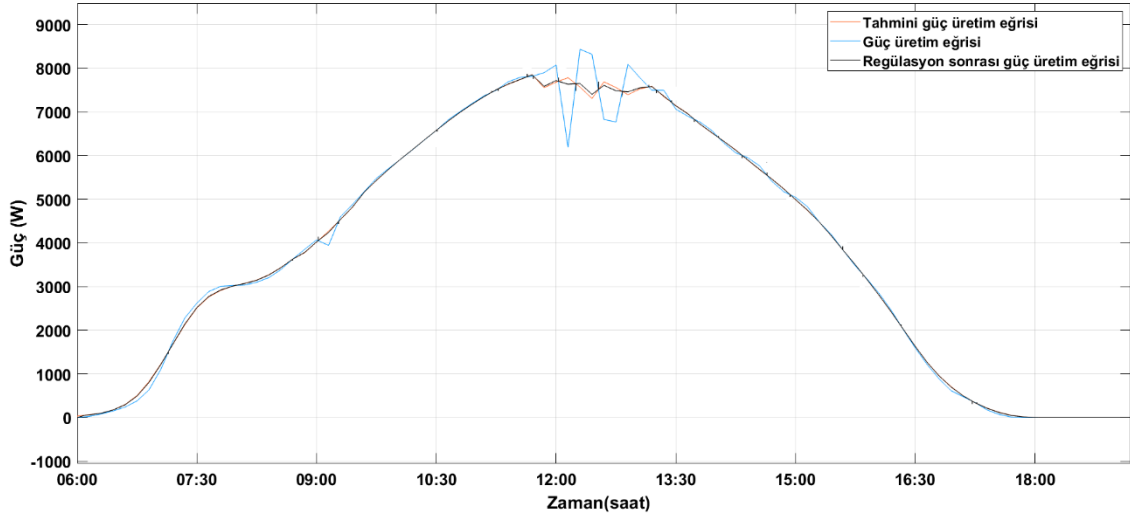
Bu kısımda yaz günleri içerisinde birkaç deneme sonucunda dalgalanmanın en fazla olduğu günler arasından seçilen bir yaz günü için regülasyon sonuçları incelendi. İlk olarak Şekil 8'de güneş panellerinin seçilen 13 Ağustos 2015 gününe ait güç üretim eğrisi

ve bu eğrinin hareketli ortalaması verilmiştir. Gene dikey eksen W cinsinden üretim miktarını yatay eksen ise saat cinsinden zamanı göstermektedir.



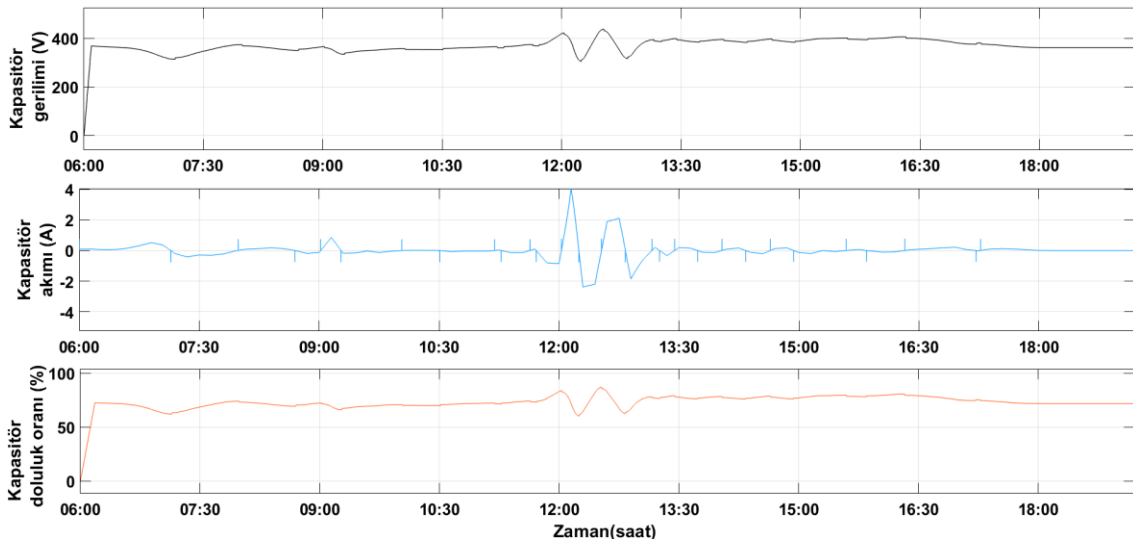
Şekil 8. 13 Ağustos 2015 gününe ait güç üretim eğrisi ve bu eğrinin hareketli ortalaması.

Bir sonraki aşamada Şekil 8'deki güç üretim eğrisi 63F, 125V süper kapasitörler kullanılarak manipüle edildi. Dört adet seri bağlı süper kapasitör kullanılarak, toplamda 15.75F, 500V enerji depolama ünitesi elde edildi. Üretim eğrisi, tahmin eğrisi ve manipüle edildikten sonraki güç üretim eğrileri Şekil 9'da verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde regülasyon sonrası güç üretim eğrisinin tahmin edilen güç üretim eğrisini takip ettiği gözlemlenebilir. Şekil 10'da ise regülasyon sırasında kapasitör gerilim akım ve doluluk oranları zamana bağlı olarak gösterilmiştir.



Şekil 9. 13 Ağustos 2015 gününe ait regülasyon sonrası güç üretim eğrisi, tahmini güç üretim eğrisi ve gerçek güç üretim eğrisi.

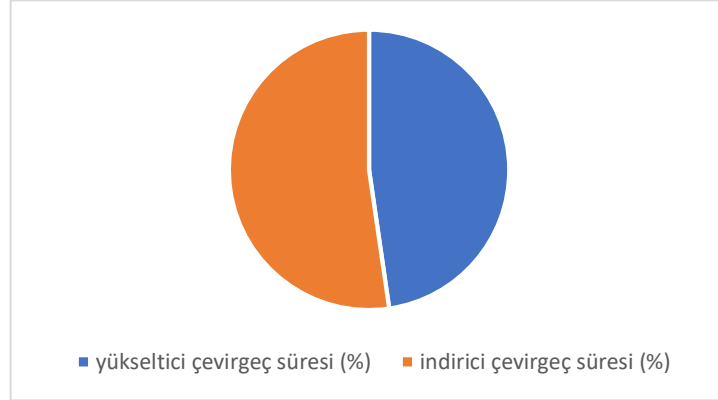
Tahmine yaklaşıma oranı ortalama mutlak hata (ing. mean absolute error) hesaplanarak bulunabilir. 45000 nokta için ortalama mutlak hata 5.87 W çıkmaktadır. Benzetim yapılırken süper kapasitörlerin başlangıçta %75'i dolu olduğu varsayıldı. Bu oran 375V gerilime denk gelmektedir.



Şekil 10. Süper kapasitör gerilim, akım ve doluluk oranı.

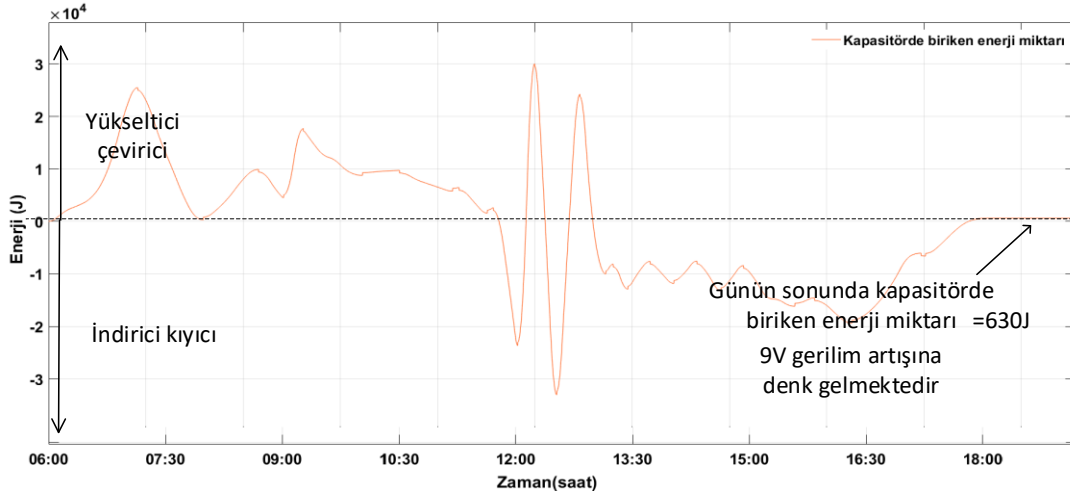
Yaz günü regülasyonu için yükseltici ve indirici çevirgeçlerin çalışma sürelerinin oranları pasta dilimi olarak Şekil 11'de verilmiştir. Bu şekle göre 47.7%'lik zaman diliminde

yükseltici çevirgeç çalışırken 52.3%'lük zaman diliminde indirici çevirgeç çalışmaktadır. Çevirgeçler yaklaşık olarak eşit sürelerde güç aktarımı yapmaktadır.



Şekil 11. Çevirgeç çalışma süreleri yüzdesi.

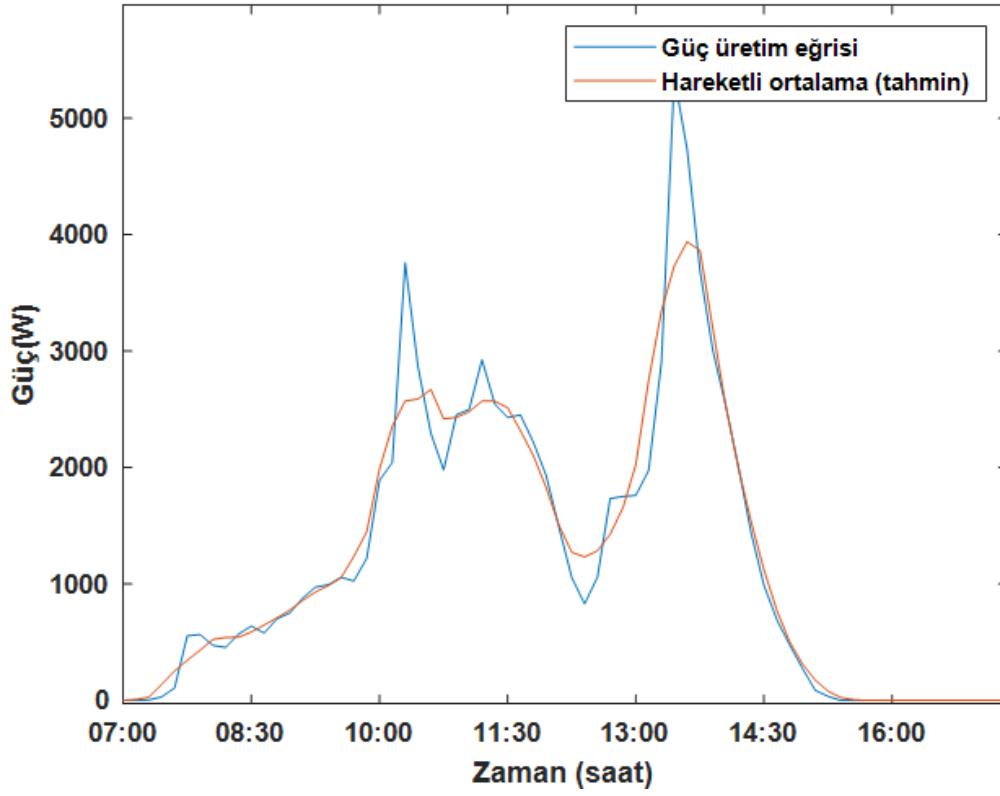
Şekil 12 ise kapasitörde biriken enerji miktarını zamana bağlı olarak göstermektedir. Şekilde enerji miktarı 0'ın üstünde olduğu anlarda daha çok yükseltici çevirici çalışmış yani kapasitörlerdeki enerji şebekeye gönderilmiş, 0'ın altında olduğu anlarda daha çok indirici kıyıcı çalışmış yani kapasitörde enerji depolanmış demektir. Şekil incelendiğinde günün sonunda indirici operasyon daha çok yapıldığı görülebilir. Grafiğin sonunda kapasitörde biriken enerji denklem (1) yardımıyla gerilim değerine çevrildiğinde başlangıç geriliminin 9V üzerinde bir gerilim değerinde günü bitirmesi beklenmektedir. Şekil 10'da kapasitör gerilimi incelendiğinde gün sonu kapasitör geriliminin (384V) gün başı kapasitör geriliminin (375V) üzerinde ve aradaki farkın 9V olduğu görülebilir.



Şekil 12. Kapasitör enerji değişim miktarı

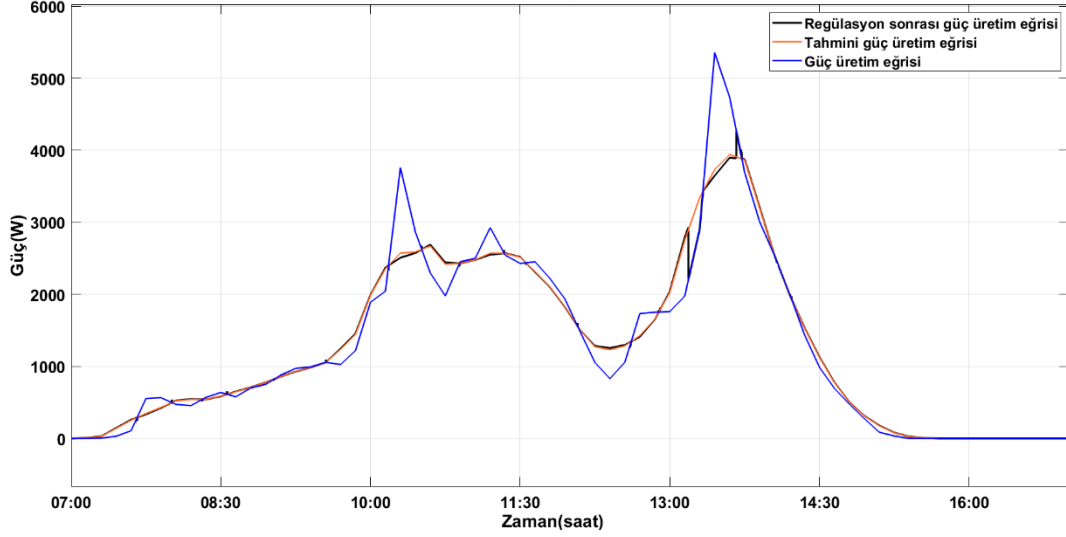
2.3.2 Kış Günü Regülasyonu: 19 Ocak 2015

Bu kısımda kış günleri içerisinde birkaç deneme sonucunda dalgalanmanın en fazla olduğu günler arasından seçilen bir kış günü için regülasyon sonuçları ve enerji yönlendirme devresinin çalışma sonuçları incelendi. Şekil 13'te güneş panellerinin seçilen, 9 Ocak 2015 gününe ait güç üretim miktarı ve üretimin hareketli ortalaması verilmiştir. Dikey eksen W cinsinden güç üretim miktarını yatay eksen saat cinsinden zamanı göstermektedir. Şekil 13 incelendiğinde yaz gününe göre maksimum güç üretim miktarının azaldığı ve üretim süresinin düştüğü görülmektedir.



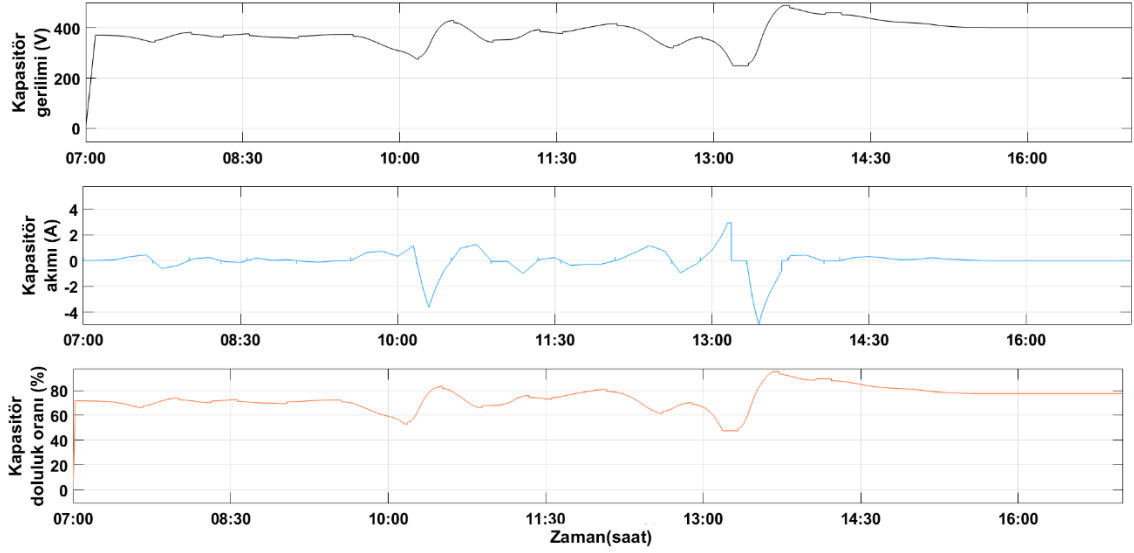
Şekil 13. 19 Ocak 2015 gününe ait üretim ve tahmin eğrisi.

Şekil 13'teki güç üretim ve tahmin eğrisi, yaz günü örneğinde olduğu gibi, dört adet seri bağlı 63F, 125V'luk süper kapasitörler kullanılarak manipüle edilmiştir. Enerji depolama ünitesi toplamda 15.75F, 500V'luk süper kapasitör bankasından oluşmaktadır. Üretim eğrisi, tahmin eğrisi ve manipüle edildikten sonraki güç üretim eğrileri Şekil 14'te verilmiştir. Regülasyon sonrası güç üretim eğrisi tahmin eğrisini takip etmektedir.



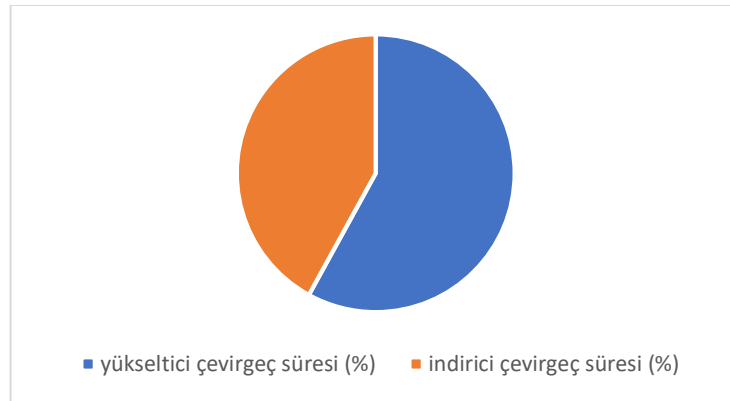
Şekil 14. 19 Ocak 2015 gününe ait güç üretim eğrisi, tahmini güç üretim eğrisi ve regülasyon sonrası güç üretim eğrisi.

Şekil 14 dikkatli incelendiğinde yaklaşık 13:20'de kapasitörler yarı yüke kadar boşaldığı için regülasyon sonrası güç üretim eğrisi, tahmin edilen güç üretim eğrisini takip etmeyi bırakmıştır. Kapasitörler yarı yükten daha fazla boşaltılmayacağı için bir sonraki kapasitör doldurma anına kadar enerji yönlendirme işlemi durdurulmuştur. Aynı durum ancak tam tersi durumda, yaklaşık 13:50'de süper kapasitörler tamamen dolduğu için regülasyon sonrası üretim eğrisi tahmini güç üretim eğrisini takip etmeyi bırakmıştır. Bir sonraki kapasitör boşaltma anına kadar enerji yönlendirme işlemi durdurulmuştur. Bu noktalarda regülasyon yapılmadığı için ortalama mutlak hata yaz gününden daha fazladır. Ortalama mutlak hata hesaplandığında 13.76 W olarak bulundu. Regülasyon süresince süper kapasitörlerin gerilim, akım değeri ve doluluk oranları ise Şekil 15'te verilmiştir. Benzetim yapılırken süper kapasitörlerin başlangıçta %75'i dolu olduğu varsayıldı. Bu oran 375V gerilime denk gelmektedir. Regülasyon işleminin durduğu anlarda kapasitör akımı 0, kapasitör doluluk oranı ise %50 veya %100 değerindedir. Gene Şekil 15'te bu anlar da gözlenebilmektedir.



Şekil 15. Kapasitör gerilimi, akımı ve doluluk oranı.

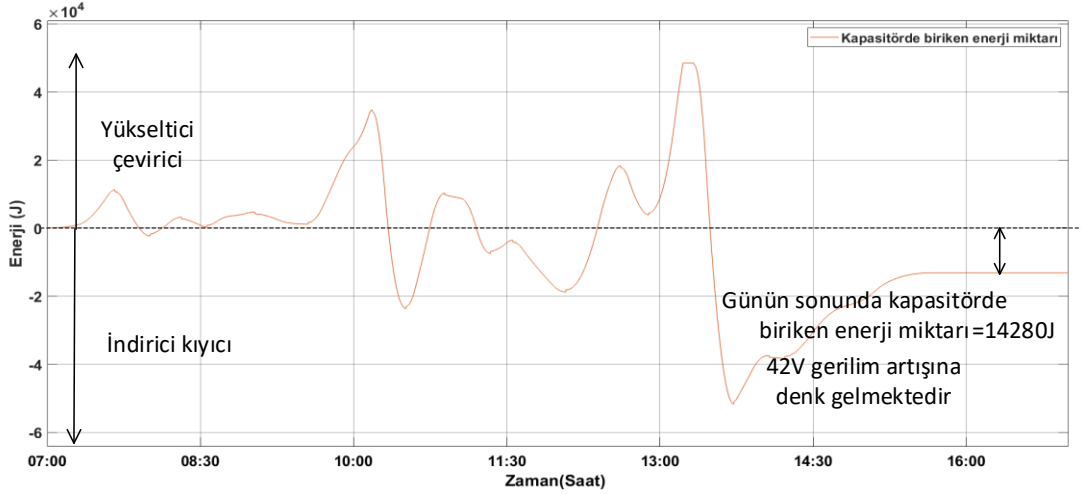
Yükseltici ve indirici çevirgeçlerin çalışma süreleri yüzde oranlı olarak Şekil 16'da verilmiştir. Bu şekle göre %58'lik zaman diliminde yükseltici çevirgeç çalışırken %42'lik zaman diliminde indirici çevirgeç çalışmaktadır. Bazı noktalarda regülasyon yapılmaması çevirgeç çalışma yüzdelerinin %50'den sapmasına neden olmuştur.



Şekil 16. Çevirgeç çalışma süreleri yüzdesi.

Şekil 17 ise kapasitörde biriken enerji miktarını zamana bağlı olarak göstermektedir. Şekil incelendiğinde günün sonunda indirici operasyon daha çok yapıldığı görülebilir. Grafiğin sonunda kapasitörde biriken enerji gene denklem (1) yardımıyla gerilim değerine çevrildiğinde başlangıç geriliminin 42V üzerinde bir gerilim değerinde günü bitirmesi beklenmektedir. Şekil 15'te kapasitör gerilimi incelendiğinde gün sonu kapasitör geriliminin (415V) gün başı kapasitör geriliminin (375V) üzerinde olduğu ve

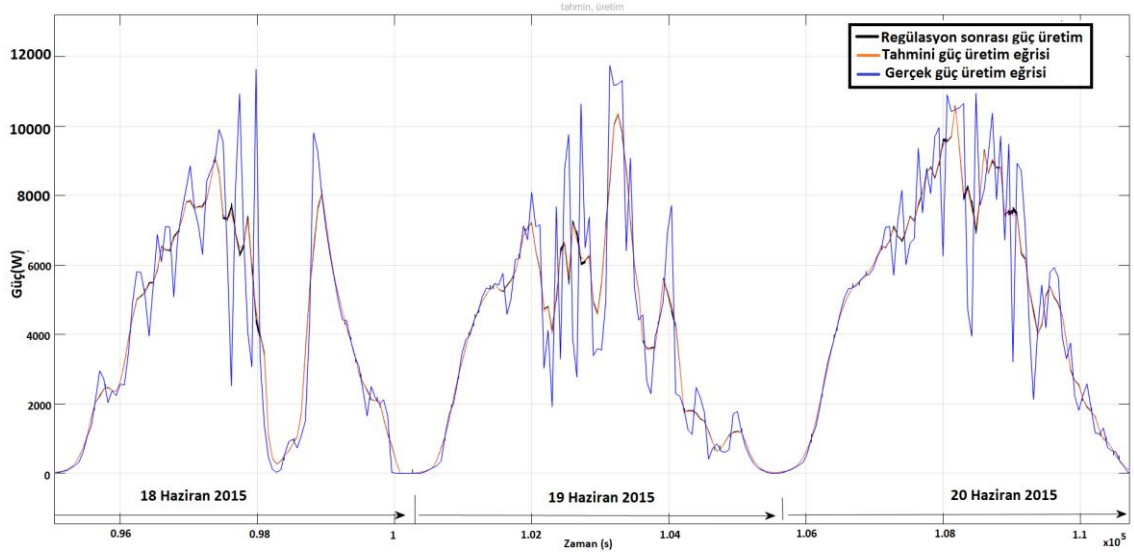
aradaki farkın 40V olduğu görülebilir. Ardışık günlerde sorun çıkmaması için gün sonunda kapasitörler tekrar 375V gerilime getirilip bırakılmalıdır.



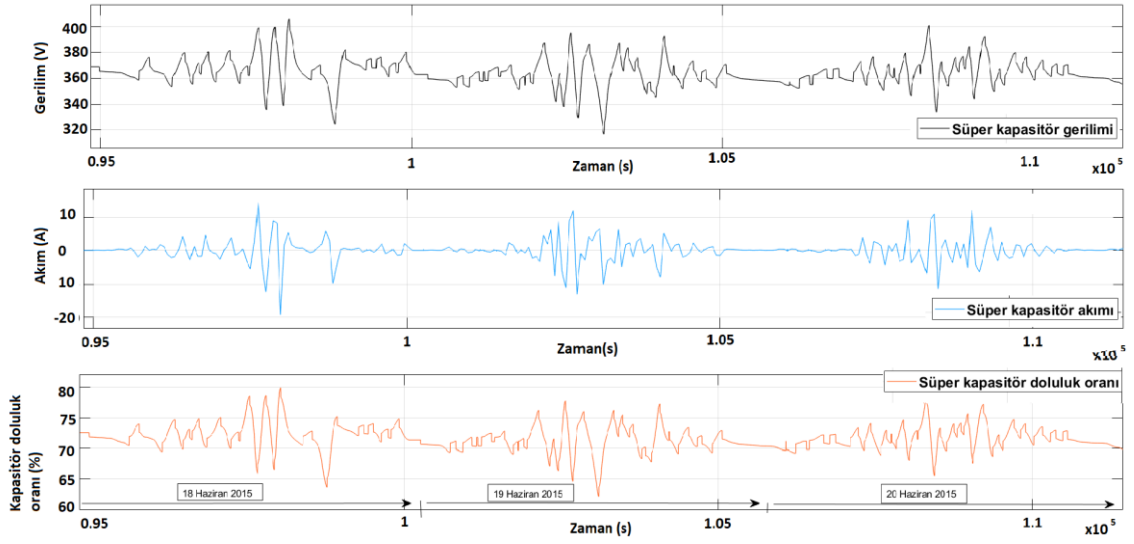
Şekil 17. Kapasitör enerji değişim miktarı

2.3.3 Bir Aylık Regülasyon örneği: Haziran 2015

Bu kısımda yaz ayı için seçilen haziran ayının verileri kullanıldı. Bu verilere göre regülasyon işlemi gerçekleştirildi. Sonuçlar paylaşıldı. Regülasyon işlemi yapılırken dört adet süper kapasitörden oluşan enerji depolama bankası kullanıldı. Enerji depolama noktası toplamda 15.75 F kapasitansa, 500 V anma gerilimine sahiptir. Benzetim çalışmaları haziran ayının tamamı için yapıldı ancak görünürlüğü arttırmak için haziran ayının içerisinde rastgele seçilen üç günün regülasyon verileri yaklaştırılarak Şekil 18’de verilmiştir. Bu veriler 18,19 ve 20 Haziran’a aittir. Aynı üç güne ait süper kapasitörlerin akım, gerilim ve doluluk oranları ise Şekil 19’da verilmiştir. Güç üretim verileri 10 dakikada bir kaydedilmiştir. Aylık regülasyon verileri ise dakikada bir veri olacak şekilde doğrusal olarak ara noktalara veri eklenmesi ile elde edildi.



Şekil 18. Haziran ayına ait rastgele seçilmiş 3 günlük regülasyon verileri.

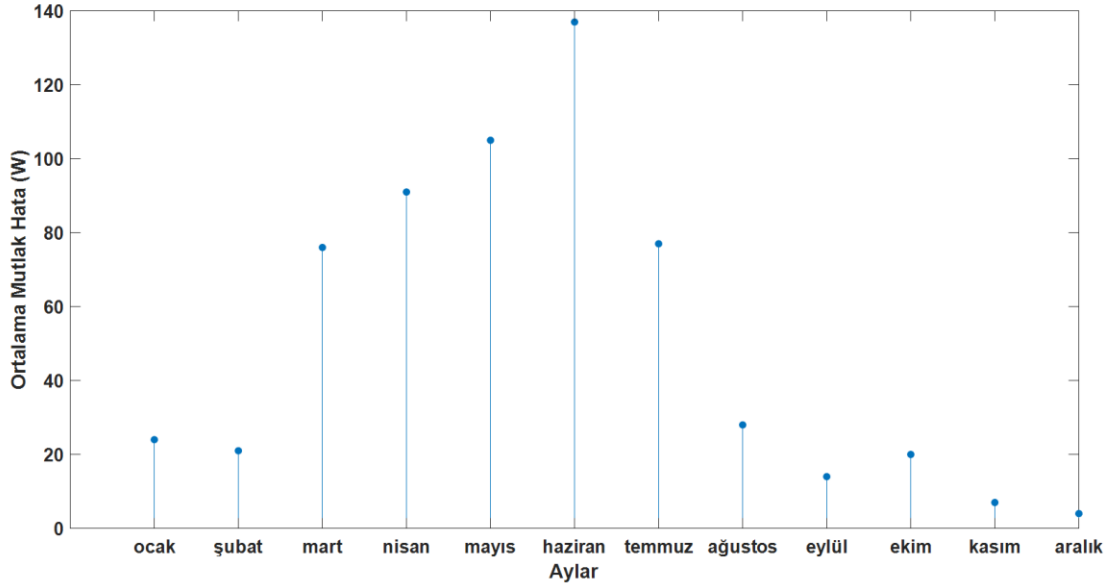


Şekil 19. Haziran ayına ait rastgele seçilmiş 3 günlük kapasitör akım, gerilim ve doluluk oranı.

Haziran ayı için yapılan regülasyon sonuçları incelendiğinde maksimum kapasitör akımı 20A olmaktadır. Haziran ayının tamamı için ortalama mutlak hata 137 W olmaktadır. Haziran ayının süre olarak %57'sinde yükseltici tipte çevirgeç çalışırken %43'ünde indirici tipte çevirgecin çalıştığı gözlemlendi.

2.3.4 Bir Yıllık Regülasyon Örneği: 2015

Bu kısımda yapılan benzetim çalışmasında 2015 yılının tamamı için regülasyon yapıldı. Regülasyon sonrası ortalama mutlak hata değerleri yılın 12 ayı için ayrı ayrı bulundu. Ortalama mutlak hata değerleri Şekil 20’de verilmiştir. Fotovoltaik panellerin yaz aylarında maksimum güç üretim miktarları fazla olduğu için, ortalama mutlak hatanın yaz aylarında daha fazla olduğu gözlemlenebilir.



Şekil 20. 2015 yılı için aylık ortalama mutlak hata.

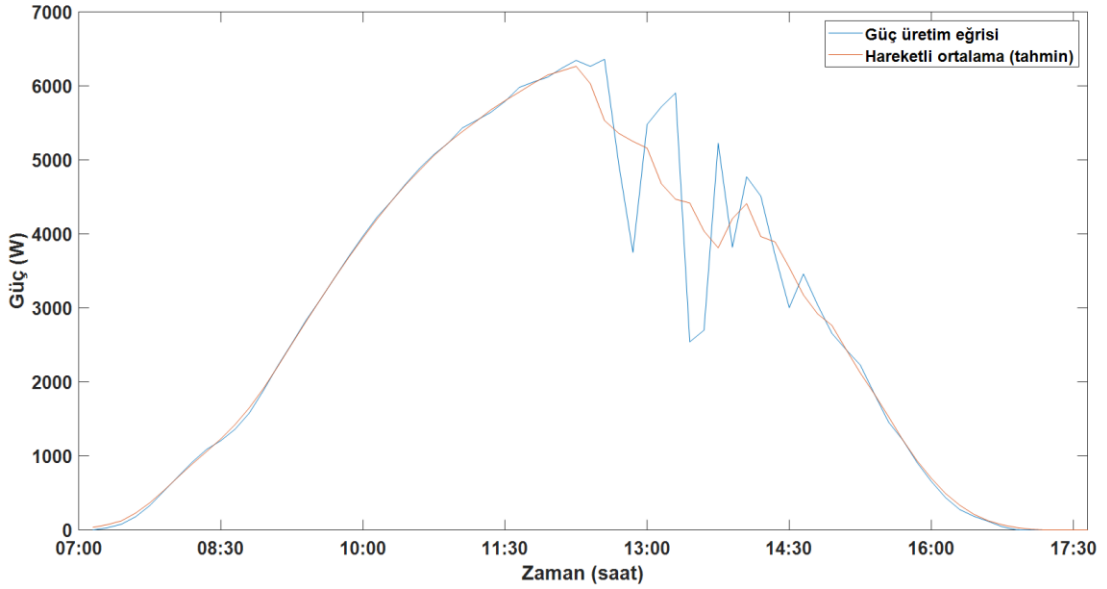
2.4 Kapasitör Boyutlandırma

Yaz günü ve kış günü regülasyonu kısımlarında enerji depolama bankasında dört adet seri bağlı süper kapasitör kullanılmıştır. Bu kısımda ise yapılan benzetim çalışmalarında kullanılan süper kapasitör sayısı ve bağlantı yöntemleri değiştirildi. İki adet seri bağlı süper kapasitör tasarımı için sonuçlar ve üç seri iki paralel bağlı toplam altı adet süper kapasitör tasarımı için sonuçlar incelendi.

2.4.1 İki Süper Kapasitör ile Yapılan Benzetimler

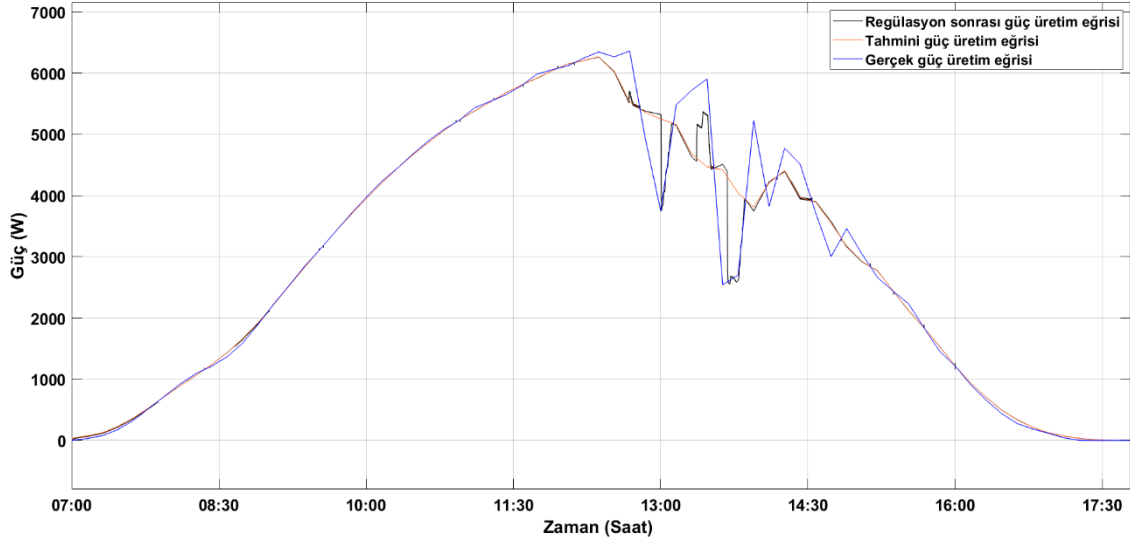
Bu kısımda yapılan benzetimlerde enerji depolama için iki adet seri bağlı süper kapasitör kullanıldı. Enerji depolama ünitesi anma gerilimi 250V olan, toplamda 31.5F süper

kapasitör bankasından oluşmaktadır. Şekil 21’de güç üretim dalgalanmasının fazla olduğu günler arasından rastgele seçilen 4 Ekim 2015 gününe ait güç üretim ve hareketli ortalama eğriler verilmiştir.



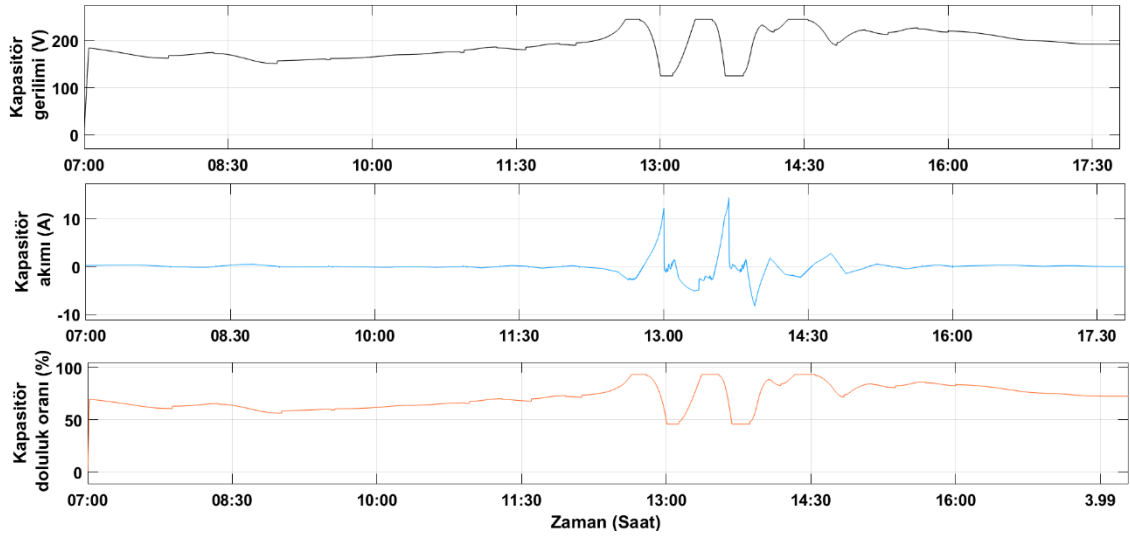
Şekil 21. 4 Ekim 2015 gününe ait güç üretim ve tahmin eğrileri.

Şekil 21’deki üretim eğrileri manipüle edildikten sonra elde edilen yeni güç eğrileri Şekil 22’de verilmiştir. Şekil 22 incelendiğinde, regülasyon sonrası üretim eğrisinin tahmini güç üretim eğrisini takip etmekte dört süper kapasitörü depolamaya göre daha başarısız olduğu gözlemlenebilir. Özellikle tahmini üretim eğrisi ve gerçek güç üretim eğrisinin fazla olduğu yerlerde süper kapasitörler daha çabuk devreden çıkmıştır. (Yarıya kadar boşalmıştır veya tam dolmuştur.)



Şekil 22. 4 Ekim 2015 gününe ait güç üretim eğrisi, tahmini güç üretim eğrisi ve regülasyon sonrası güç üretim eğrisi.

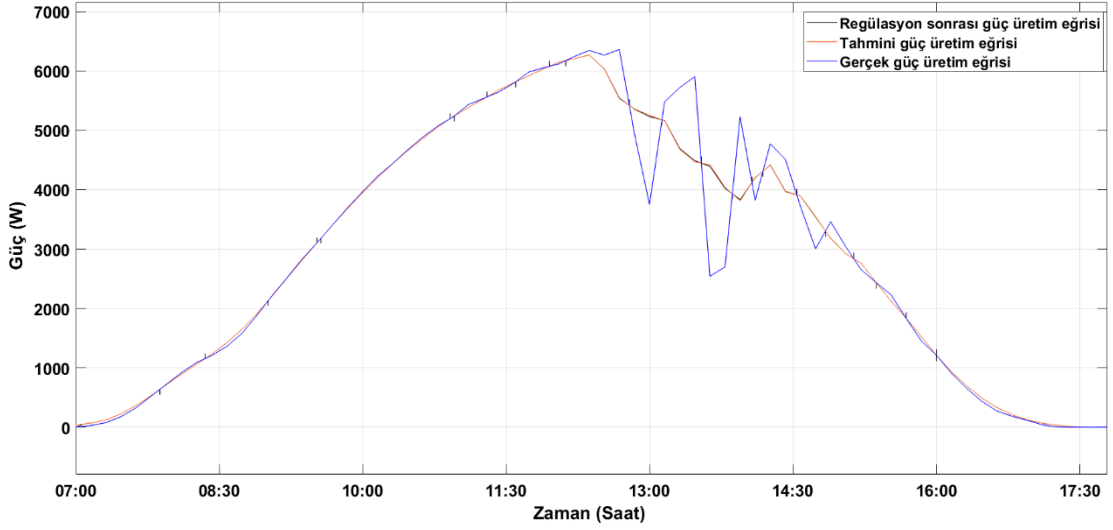
Şekil 23'te ise süper kapasitörlere ait akım, gerilim değerleri ve doluluk oranı verilmiştir. Süper kapasitörlerin başlangıçta %75'inin dolu olduğu varsayıldı. Bu değer 187.5V gerilime karşılık gelmektedir. Bu kısımda yükseltici ve indirici çevirgeçlerin yüzdelik olarak çalışma süreleri sırasıyla %50.3 ve %49.7'dir. Ortalama mutlak hata ise 39.06 W'dır. 2 Süper kapasitörlü depolama bankasının enerji depolamada kısmen yetersiz kaldığı gözlemlenebilir.



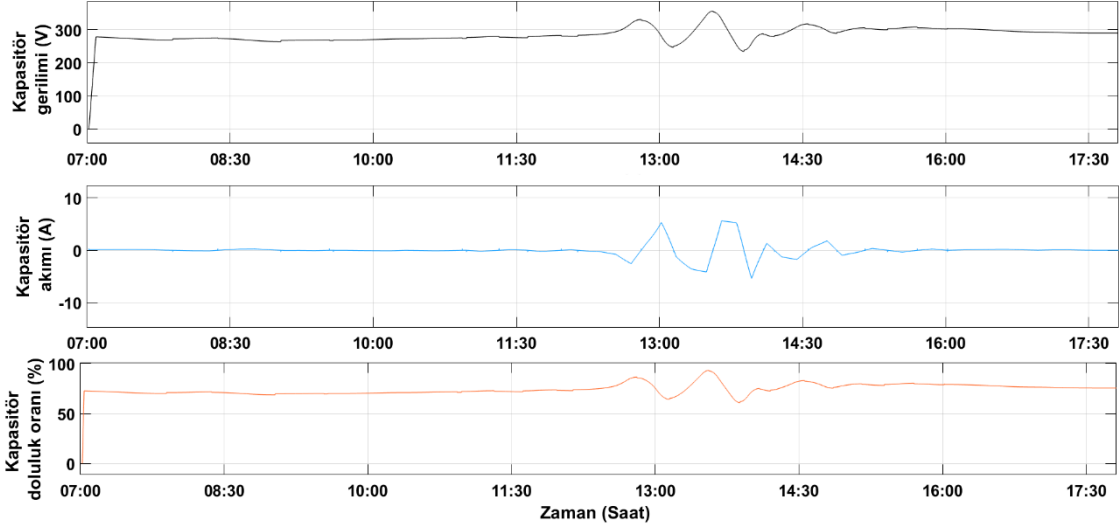
Şekil 23. Kapasitör gerilimi, akımı ve doluluk oranı.

2.4.2 Altı Süper Kapasitör ile Yapılan Benzetimler

Bu kısımda yapılan çalışmalarda enerji depolama için iki adet paralel üç adet seri toplamda 6 adet süper kapasitör kullanıldı. Enerji depolama ünitesi anma gerilimi 375V olan 42F süper kapasitör bankasından oluşmaktadır. İki adet süper kapasitör ile yapılan benzetim çalışmaları ile karşılaştırma yapılabilmesi için gene 4 Ekim 2015 gününe ait güç üretim eğrilerinin regülasyonu incelendi. Regülasyon sonrası güç üretim eğrileri ve süper kapasitörlere ait aynı değerler sırasıyla Şekil 24 ve Şekil 25'te verilmiştir. Süper kapasitörlerin başlangıçta %75'inin dolu olduğu varsayıldı. Bu değer 281V gerilime karşılık gelmektedir.



Şekil 24. 4 Ekim 2015 gününe ait güç üretim eğrisi, tahmini güç üretim eğrisi ve regülasyon sonrası güç üretim eğrisi.



Şekil 25. Kapasitör gerilimi, akımı ve doluluk oranı.

Altı süper kapasitör ile yapılan benzetim çalışmaları incelendiğinde, kapasitörlerin günün tamamını regüle edebildiği görülmektedir. Altı süper kapasitör için ortalama mutlak hata 2.09 W olarak bulundu. 6 süper kapasitörlü depolama bankasının seçilen günü tam olarak regüle ettiği görüldü. Benzetimlerde kullanılan kod ve benzetim şeması Ek 1 ve Ek 2’de verildi.

2.5 Regülasyon Çıktıları

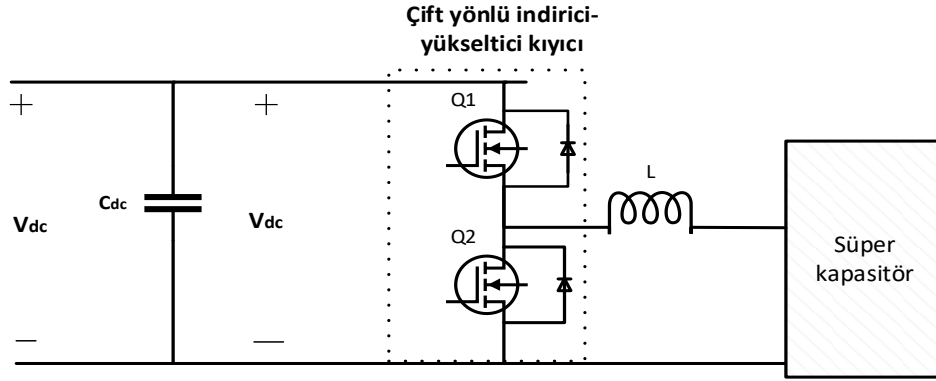
Regülasyondan önce ve sonra ortalama mutlak hata ve kök ortalama kare hata değeri Çizelge 5’te verilmiştir. Beklenildiği üzere kış aylarında maksimum güç üretim miktarı daha düşük olduğu için regülasyon daha başarılı bir şekilde gerçekleşti. Hatta kasım ve aralık aylarının tamamen regüle edildiği görülebilir. Çizelgeye bakılarak tahmini güç üretimi ve gerçek güç üretimi regülasyon öncesinde ve sonrasında gözlenebilir. Bu çizelge ileride yapılacak çalışmalarda tahmin algoritmalarının seçilmesinde önemli bir kriter olacaktır.

Çizelge 5. Regülasyon öncesi ve sonrası aylık ortalama mutlak hata değerleri (W).

	Aylar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
		Regülasyondan sonra		24	21	76	91	105	137	77	28	14	20
	Kök Ortalama Kare Hata	164	128	415	412	409	481	363	157	110	116	67	19
		Regülasyondan önce		130	108	228	313	325	428	223	186	120	156
	Kök Ortalama Kare Hata	325	307	602	646	656	778	551	385	286	341	194	161

2.6 İndirici-Yükseltici Kıyıcı

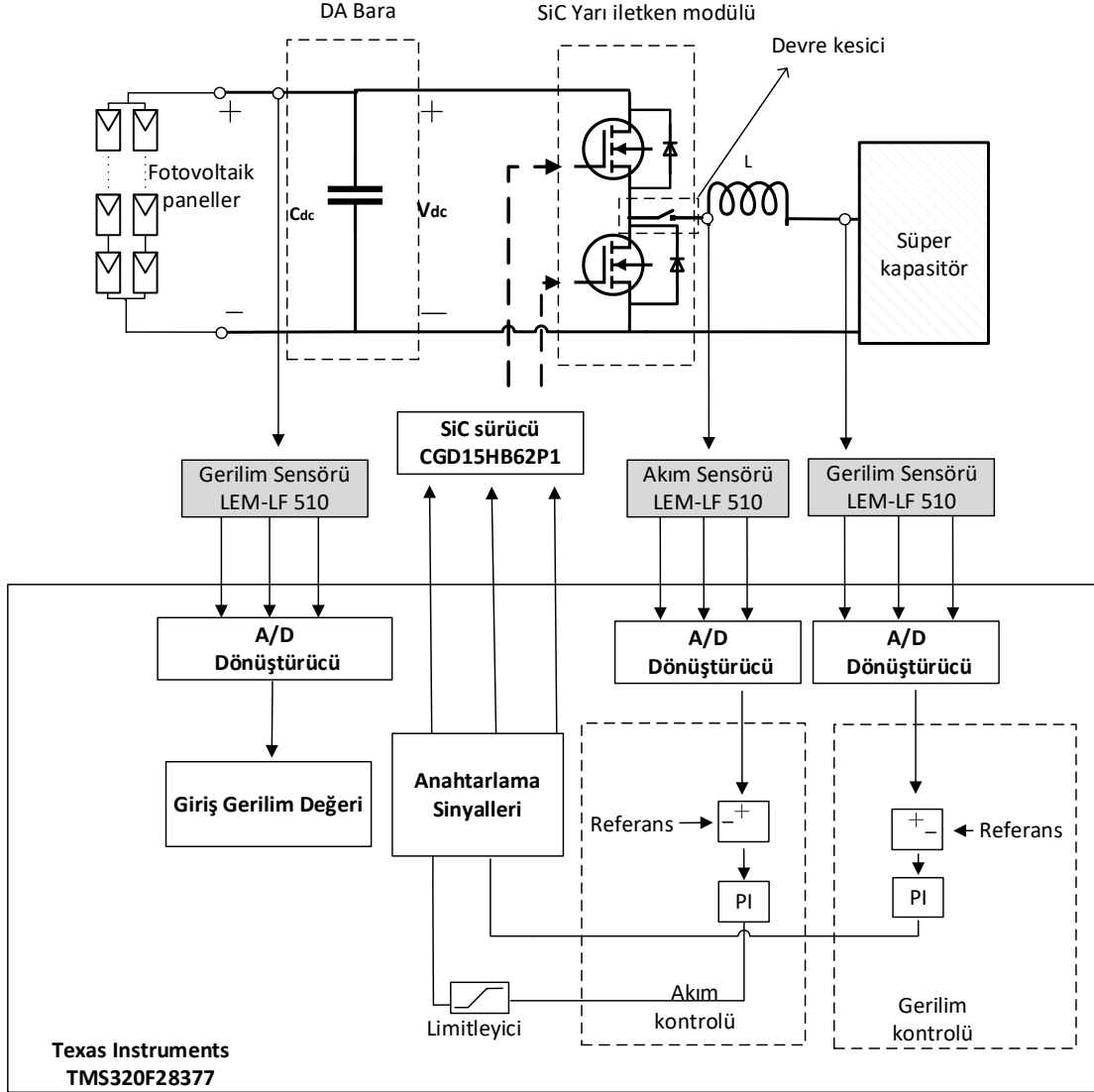
Laboratuvar ortamında kurulması düşünülen sistemde enerji yönlendirmesi için bir indirici-yükseltici tipte çevirgeç tasarlandı. Yüksek akım, gerilim ve yüksek verimlilik gereksinimlerinden dolayı çevirgeçte SiC tabanlı yarı iletkenler kullanıldı. Kurulan sistemin devre şeması Şekil 26'da gösterilmiştir. Yarı iletkenlerin seri olarak birbirine bağlanması ve yarı iletken diyotlarının enerji çevriminde kullanılması ile bu sistem hem yükseltici hem de indirici tipte bir çevirgeç olarak kullanılabilir. Kullanılması düşünülen SiC tabanlı yarı iletkenler birbirine yarım köprü olarak modül halinde üretilmektedir. İndirici-yükseltici kıyıcı tipte devrenin kurulabilmesi için bir modül yeterli olmaktadır. Bu tip devrelerde yarı iletken diyotları iletme geçmektedir. Yarı iletken diyotları diğer diyotlara göre daha kötü karakteristik özelliklere sahiptir. Özellikle yüksek frekans uygulamalarda bu durum problemlere neden olmaktadır.



Şekil 26. Çift yönlü indirici-yükseltici kıyıcı.

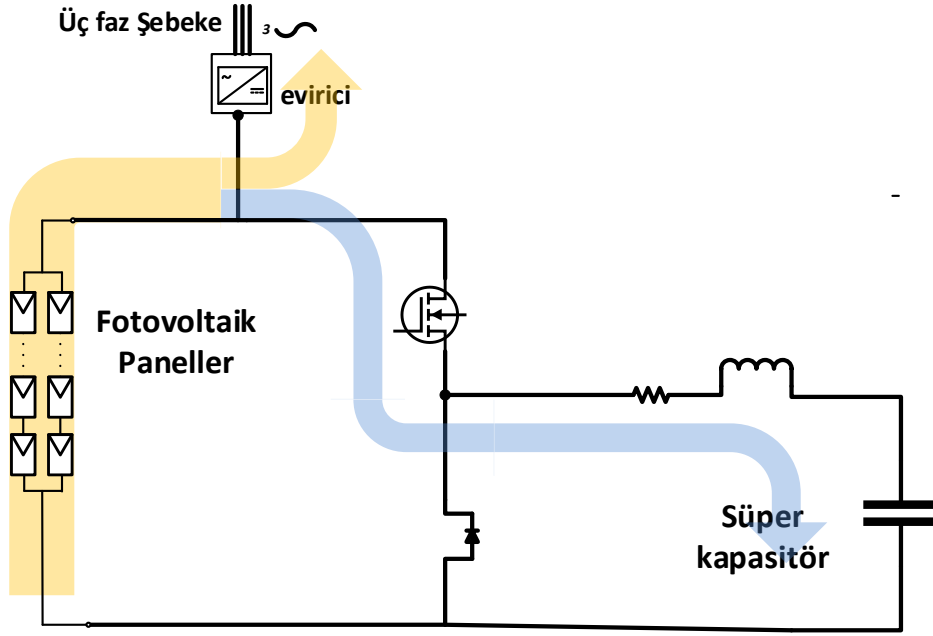
Şekil 26’da gösterilen devre şemasında, indirici işlem sırasında indirici yarı iletken anahtarlanır. Yükseltici yarı iletken anahtarlanmaz, ancak yükseltici yarı iletkenin diyotu serbest döngü diyotu olarak kullanılır. Endüktör ve kapasitör yardımı ile girişte güneş panellerinde bulunan 750V, çıkış tarafındaki depolama sisteminde 500V değerine veya daha az değerlere düşürülür. Böylece çıkıştaki süper kapasitörlere enerji aktarılır. Öte yandan, yükseltici işlem için yükseltici yarı iletken anahtarlanır, indirici yarı iletkenin anahtarlanmaz ancak indirici yarı iletkenin diyotu kıyıcı diyot olarak kullanılır. Süper kapasitörlerdeki 500V ve daha düşük gerilim değerleri evirici girişindeki 750V değerine dönüştürülür. Böylelikle süper kapasitörlerdeki enerji DA baraya oradan da eviriciye doğru aktarılır.

Şekil 26’da bulunan devrede ek olarak akım gerilim sensörleri ve koruma amaçlı devre elemanları kullanıldı. Detaylı devre görünümü Şekil 27’de verilmiştir. Fotovoltaik panellerin giriş gerilim değerleri sabit olmadığı için giriş gerilim değerleri okundu. Çıkış gerilimine ve bobin akımına bağlı olarak PI kontrolcü yardımı ile anahtarlama sinyalleri oluşturuldu. Bobin akımı limitleyici oluşturuldu. Enerji depolama ünitesi tarafında endüktör ve bir devre kesici kullanıldı. PV panel tarafında DA bara ve süzgeç kapasitörleri kullanıldı.

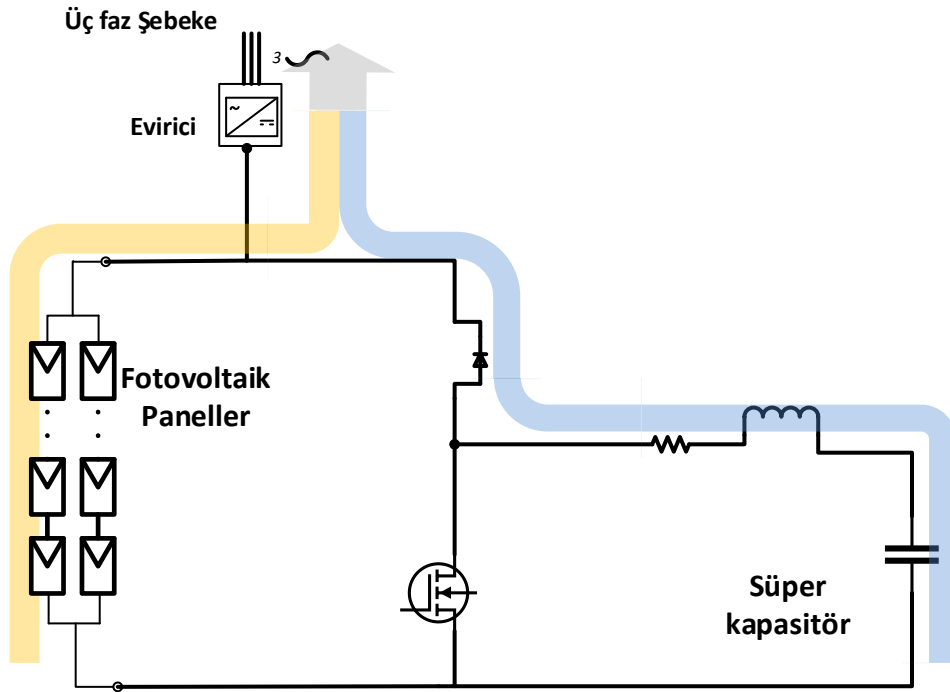


Şekil 27. Kullanılan yardımcı devre elemanları ve kontrol blok şeması.

Şekil 28 ve Şekil 29'da ise indirici ve yükseltici çeviriciler yardımı ile güç aktarım yönleri gösterilmektedir. Fotovoltaik panellerin anlık enerji üretimi tahmin edilen üretimden fazla olduğunda üretilen enerjinin fazla kısmı, indirici yarı iletken anahtarlanarak süper kapasitörlere gönderilmektedir. Tam tersi durumda, fotovoltaik panellerin enerji üretimi tahmin edilenden az ise, yükseltici yarı iletken anahtarlanarak, süper kapasitörlerden enerji çekilerek bu fark kapatılmaktadır. Böylece eviriciye aktarılan enerji ile tahmin edilen enerji birbirine eşit olmaktadır.



Şekil 28. İndirici tipte çevirgeç çalışırken enerji aktarım yönleri.



Şekil 29. Yükseltici tipte çevirgeç çalışırken enerji aktarım yönleri.

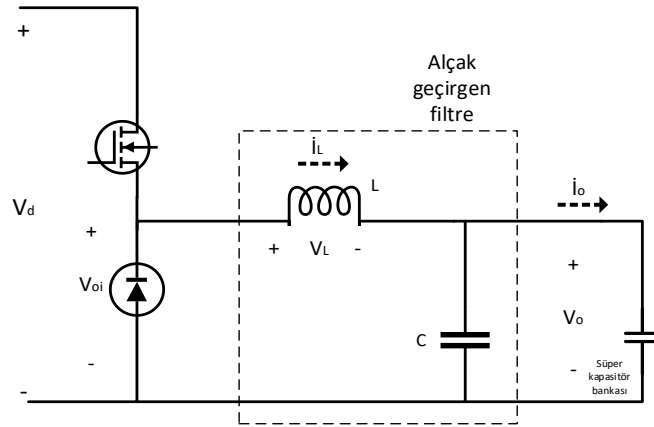
İndirici ve yükseltici çevirgecin teorik hesaplamaları endüktör akımının sürekliliğine göre iki farklı yöntemle yapılmaktadır. Endüktör akımı her zaman pozitif bir değerde kalıyorsa bu duruma sürekli akım modu denilmektedir. Bu proje sürekli akım modunda çalıştırıldığı

için teorik hesaplamalar da sürekli akım modu için yapılmıştır. Teorik hesaplamalar yapılırken yarı iletkenin iletimde ve iletimde olmadığı iki durum incelendi.

2.6.1 İndirici Kıyıcı

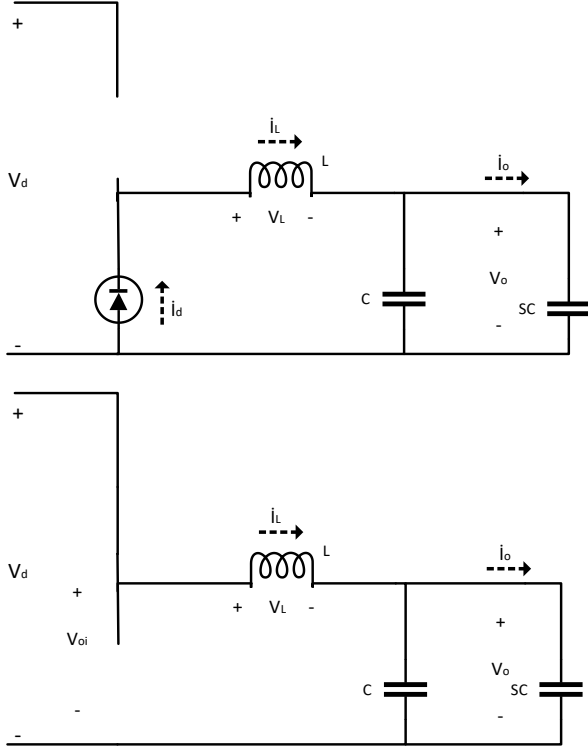
Güneş panellerinin çıkış gerilimi dış etmenlere bağlı olarak değişmektedir. Bu çıkış gerilimi indirici çevirgeç için giriş olarak alınmaktadır. Depolama için kullanılan süper kapasitör bankası 500V anma gerilimine sahiptir. Düşünülen çevirgeçte verimliliğin yüksek olması için yeni teknoloji SiC tabanlı yarı iletkenlerin kullanılması uygun görüldü. Yarı iletkenlere anahtarlama sinyallerini göndermek için bir yarı iletken sürücü ve mikro işlemci kullanıldı.

İndirici tipte çevirgeç, isminden de anlaşılacağı üzere giriş geriliminden daha düşük gerilim seviyeleri elde etmenizi sağlayan çevirgeçlerdir. İndirici tipte çevirgeç, bir yarı iletken, bir diyot, bir adet alçak geçirgen süzgeçten oluşmaktadır. Basit bir indirici devre topolojisi Şekil 30'da verilmiştir.



Şekil 30. İndirici tipte çevirgeç. [17]

Şekil 30'da görülen indirici kıyıcının yarı iletkenine anahtarlama sinyali verilir. Yarı iletken iletimde iken giriş akımı endüktör üzerinden çıkışa gönderilir aynı zamanda endüktör şarj edilir. Yarı iletken iletimde olmadığından endüktör üzerindeki akım diyot üzerinden çıkış tarafına gönderilir. Yarı iletken periyodik olarak anahtarlандığında çıkış gerilimi girişten daha düşük bir seviyede kararlı durumda kalır.



Şekil 31. Sırayla anahtar iletimdeyken ve anahtar kesimdeyken akım yönleri. [17]

Anahtar iletimde iken devrede akımların geçiş yönleri Şekil 31’de gösterilmiştir. Bu durumda endüktör üzerindeki gerilim

$$V_L = V_d - V_o \quad (4)$$

olarak bulunur. Denklem (4) anahtar açık kaldığı sürece (t_{on}) endüktör üzerinde görülen gerilimdir. Bu gerilim endüktör akımının doğrusal olarak artmasına neden olur. Endüktör akımı ve gerilimi arasındaki diferansiyel ilişki denklem (5) de verildi. Denklem (6) te ise endüktör akımındaki değişim miktarı verilmiştir.

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (5)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_d - V_o}{L} t_{on} \quad (6)$$

burada $t_{on} = DT_s$ tir. Anahtar kesimde iken devrede akımların geçiş yönleri Şekil 31’de gösterilmiştir. Endüktör üzerindeki gerilim, endüktör akımının doğrusal olarak

azalmasına neden olur. Denklem (7)'de ise endüktör akımındaki değişim miktarı verilmiştir.

$$\Delta i_L = \frac{-V_o}{L} t_{off} \quad (7)$$

burada $t_{off} = (1 - D)T_s$ tir. Kararlı durumda çalışabilmek için her periyot başında ve sonunda endüktör akımının eşit olması gerekir. Yani incelenen iki durumda endüktör akımındaki artma ve azalma miktarı toplamı sifıra eşit olmalıdır. Eşitlik denklem (8)'de kurularak kararlı durum, giriş ve çıkış gerilim ilişkisi denklem (9)-(10) da elde edilmiştir. Endüktör akımının ortalama değeri çıkış akımının ortalama değerine eşittir ve denklem (11)'de verilmiştir.

$$\Delta i_{L_{durum 1}} + \Delta i_{L_{durum 2}} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{V_d - V_o}{L} DT_s + \frac{-V_o}{L} (1 - D)T_s = 0 \quad (9)$$

$$V_o = DV_d \quad (10)$$

$$I_L = I_R = \frac{V_o}{R} \quad (11)$$

Endüktör akımının ekstrem değerleri denklem (12)-(13)'te bulunmuştur. f değeri anahtarlama frekansıdır.

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_o}{R} + \frac{1}{2} \left[\frac{V_o}{L} (1 - D)T_s \right] = V_o \left(\frac{1}{R} + \frac{1-D}{2Lf} \right) \quad (12)$$

$$I_{min} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_o}{R} - \frac{1}{2} \left[\frac{V_o}{L} (1 - D)T_s \right] = V_o \left(\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2Lf} \right) \quad (13)$$

Sürekli akım modunda çalışabilmek için denklem (13) her zaman pozitif olarak kalmalıdır. Bunu sağlayabilmek için çıkış endüktörü uygun olarak seçilmelidir. Endüktörün alabileceği minimum değer denklem (14)'te verilmiştir.

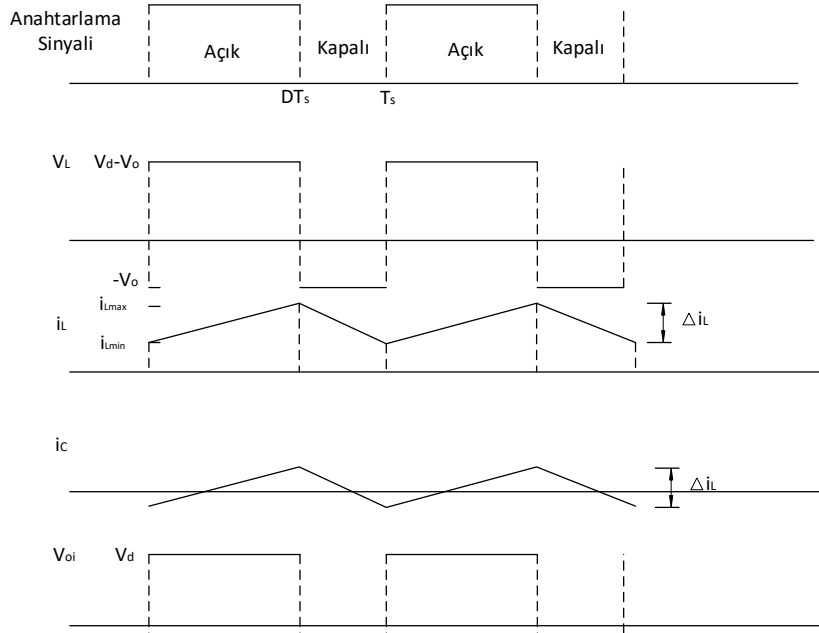
$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (14)$$

Dikkat edilmesi gereken bir diğer değişken, çıkış gerilimi dalgalanmasıdır. Ortalama endüktör akımı ile toplam endüktör akımı arasındaki farkın çıkış kapasitörüne gönderildiğini varsayıp ve kapasitans tanım denklemi kullanıldığında, çıkış gerilim dalgalanması elde edilir.

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \frac{T}{2} \frac{\Delta i_L}{2} \quad (15)$$

$$\Delta V_o = \frac{T \Delta i_L}{8C} \quad (16)$$

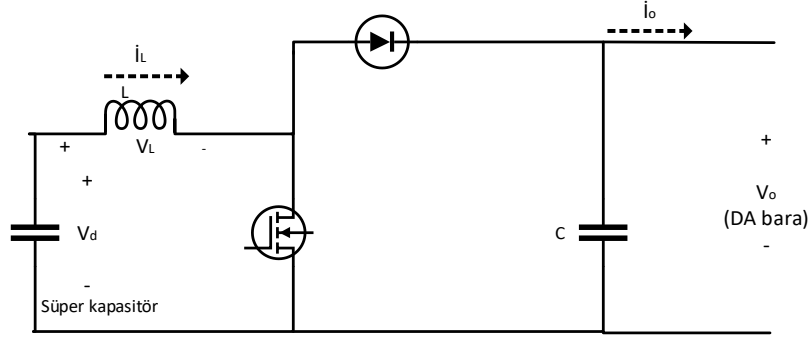
Burada Q kapasitörü yük miktarı, C kapasitans, ΔV_o çıkış gerilim dalgalanmasını göstermektedir. Denklem (15) çıkış kapasitöründeki yük değişimini, (16) ise çıkıştaki gerilim dalgalanmasını göstermektedir. İndirici tipte çevirgeç için bazı dalga formları Şekil 32’de gösterilmiştir.



Şekil 32. İndirici kıyıcı için endüktör gerilim ve akımı, kapasitör akımı ve diyot gerilimi dalga formları.

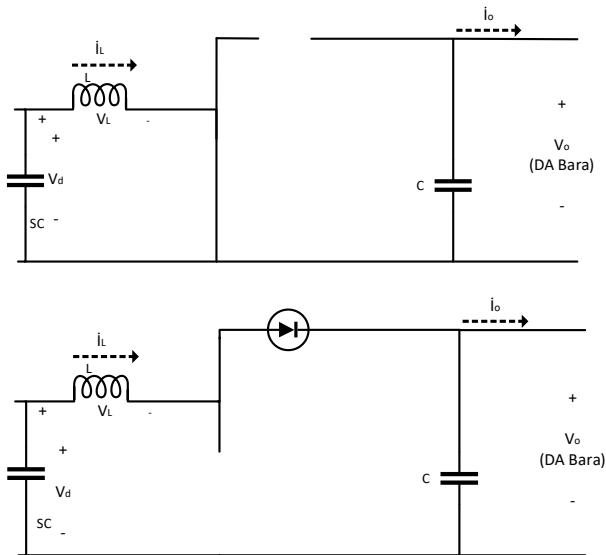
2.6.2 Yükseltici Çevirgeç

Yükseltici tipte çevirgeç, giriş geriliminden daha yüksek gerilim seviyelerinde gerilim elde etmenizi sağlayan çevirgeçlerdir. Devre elemanları indirici kıyıcı ile aynıdır, yükseltici tipte çevirgecin devre şeması Şekil 33'te verilmiştir.



Şekil 33. Yükseltici tipte çevirgeç. [17]

Şekilde görülen yükseltici tipte çevirgeç devresinin yarı iletkenine anahtarlama sinyali gönderilir. Yarı iletken iletimdeyken endüktör şarj edilir diyot iletimde değildir. Yük kapasitör üzerinden beslenir. Yarı iletken kesimdeyken endüktör enerjisi ve giriş enerjisi diyot üzerinden çıkışa iletilir. Böylece çıkış gerilimi giriş geriliminden daha yüksek seviyelerde kararlı bir durumda kalır. Bu devre şeması yarı iletken iletimde veya kesimdeyken iki durumda incelenebilir.



Şekil 34. Sırayla anahtar iletimdeyken ve kesimdeyken akım yönleri. [17]

Yarı iletken iletimdeyken devre akımlarının geçiş yönü Şekil 34'te gösterilmiştir. Anahtar iletimde kaldığı sürece (t_{on}) endüktör üzerinde görülen gerilim endüktör akımının doğrusal olarak artmasına neden olur. Endüktör akımı ve gerilimi arasındaki diferansiyel ilişkiden yola çıkılarak kurulan endüktör akım değişimi denklem (17)'de verilmiştir.

$$\Delta i_L = \frac{V_d}{L} t_{on} \quad (17)$$

burada $t_{on} = DT_s$ tir. Anahtar kesimdeyken devrede akımların geçiş yönleri Şekil 34'te gösterilmiştir. Bu durumda endüktör üzerindeki gerilim endüktör akımının doğrusal olarak azalmasına neden olur. Denklem (18)'de ise endüktör akımındaki değişim miktarı verilmiştir.

$$\Delta i_L = \frac{V_d - V_o}{L} t_{off} \quad (18)$$

burada $t_{off} = (1 - D)T_s$ tir. Kararlı durumda çalışabilmek için her periyotta zamana göre toplam endüktör gerilimi sıfır olmalıdır. Denklem (19)'da eşitlik denklemi kurularak denklem (20)'de giriş ve çıkış gerilim ilişkisi elde edilmiştir.

$$V_{L_{durum\ 1}} t_{on} + V_{L_{durum\ 2}} t_{off} = 0 \quad (19)$$

$$V_o = \frac{V_d}{1-D} \quad (20)$$

Endüktör akımı ve giriş akımı birbirine eşittir. Endüktör akımının ekstrem değerleri denklem (21)-(22)'de bulunmuştur. R resistif çıkış direncidir.

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_d}{(1-D)^2 R} + \frac{V_s D T_s}{2L} \quad (21)$$

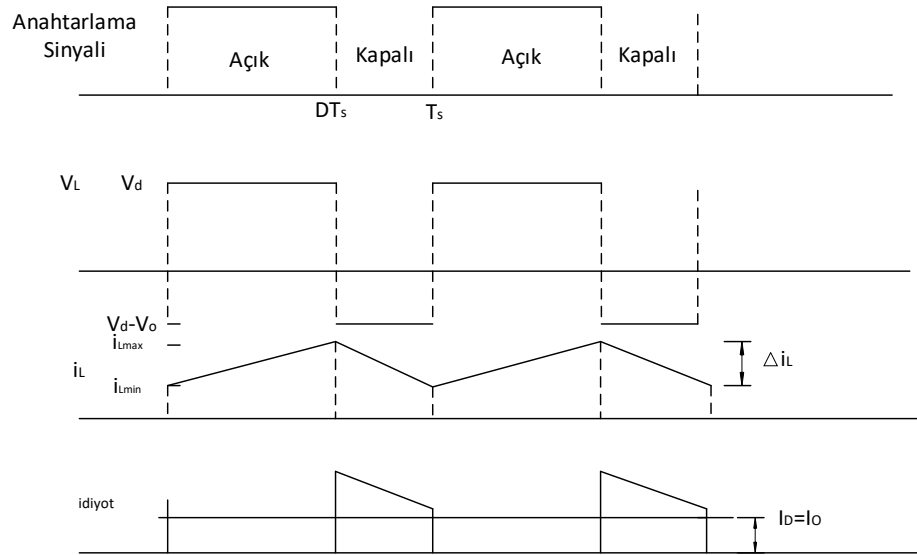
$$I_{min} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_d}{(1-D)^2 R} - \frac{V_s D T_s}{2L} \quad (22)$$

Sürekli durum çalışması için endüktörün alabileceği minimum değer ise denklem (23)'te verilmiştir. f parametresi anahtarlama frekansıdır.

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (23)$$

Çıkış gerilimindeki dalgalanma miktarı indirici tipte çevirgeç ile aynı yöntemle hesaplanır ancak bu sefer diyot üzerindeki dalgalanma akımı kapasitöre gönderilir. Çıkış gerilimi dalgalanma denklemi (24)'te verilmiştir. Yükseltici tipte çevirgeç için bazı dalga formları da Şekil 35'te gösterilmiştir.

$$\Delta V_o = \frac{V_o D T}{RC} \quad (24)$$



Şekil 35. Yükseltici tipte çevirgeç için endüktör gerilim ve akımı, diyot akımı dalga formları.

2.6.3 Anahtarlama Frekansı Seçimi

Güç çevirici devrelerinde anahtarlama frekansı arttırılırsa kayıplar artmaktadır ve çevirici verimliliği düşmektedir. Buna ek olarak özellikle yüksek güç devrelerinde gürültü ve elektromanyetik girişim kaynaklı birtakım problemlere neden olmaktadır. Kullanılan malzemelerin boyutları anahtarlama frekansı arttırılarak küçültülebilir. Öte yandan,

anahtarlama frekansı azaltılırsa çıkış akım dalgalanması artmaktadır ve bir noktadan sonra indirici yükseltici kıyıcı ayırık zamanlı çalışır hale gelmektedir. Bu tip problemleri en aza indirmek için güç çevirici devrelerinde gereksinimlerine uygun bir anahtarlama frekansı seçilmesi önemlidir. Bu çalışmada boyut ile ilgili bir gereksinim olmadığı için anahtarlama frekansının yüksek olmasına gerek yoktur. Verimlilik ve gürültü problemlerini önlemek için anahtarlama frekansı olabilecek en düşük seviyelerde tutuldu. Denklem (25)'te indirici kıyıcı için sürekli endüktör akımında çalışmayı sağlayan minimum ortalama çıkış akımı eşitliği verilmiştir. Denklem (26)'da ise yükseltici çevirici için sürekli endüktör akımı modunda çalışmayı sağlayan minimum ortalama giriş akımını vermektedir. DT_s yarı iletken iletim süresi, L endüktans değeri, V_d giriş gerilimi, V_o çıkış gerilimi, I_{ob} sürekli zamanda çalışmak için gerekli ortalama çıkış akımı, I_{ib} ise sürekli zamanda çalışmak için gerekli ortalama giriş akımı değeridir.

$$\frac{DT_s}{2L}(V_d - V_o) = I_{ob} \quad (25)$$

$$I_{ib} = \frac{T_s V_d}{2L} D(1 - D) \quad (26)$$

Yüksek güçte çalışma için indirici kıyıcı maksimum görev çevrim limitleri 0.9 ve 0.1 olarak belirlendi. Çıkış akımı ortalama değeri 25A ve 0.6mH endüktans değeri için 560V gerilimden 250V gerilime indirici kıyıcı operasyonunda denklem 25 kullanıldığında sürekli akım modunda kalabilmek için minimum 4.6kHz anahtarlama frekansı gereklidir. Bu nedenle anahtarlama frekansı 5kHz olarak seçildi. Yükseltici operasyon için görev çevrim limitleri 0.3 ve 0.7 olarak belirlendi. Bu limitler sistem çalışması için gerekli çıkış gerilimi sağlayacak görev çevrim limitleridir.

2.7 SiC Yarı İletkenler

Yüksek gerilim ve akım değerlerinde çalışırken yarı iletken seçimi önemli bir konudur. Endüstride kullanılan yarı iletkenler incelendiğinde yüksek gerilim çalışmaları için GaN ve SiC tabanlı yarı iletkenlerin diğer seçeneklere göre daha avantajlı olduğu görülebilir. SiC tabanlı yarı iletkenler ile yapılan çalışmaların fazla olması nedeniyle daha güvenilir

anahtarlama elemanlarıdır. Bunun yanı sıra SiC tabanlı yarı iletkenlerin Si tabanlı diğer yarı iletkenlere göre bazı avantajları şöyle sıralanabilir. [18]

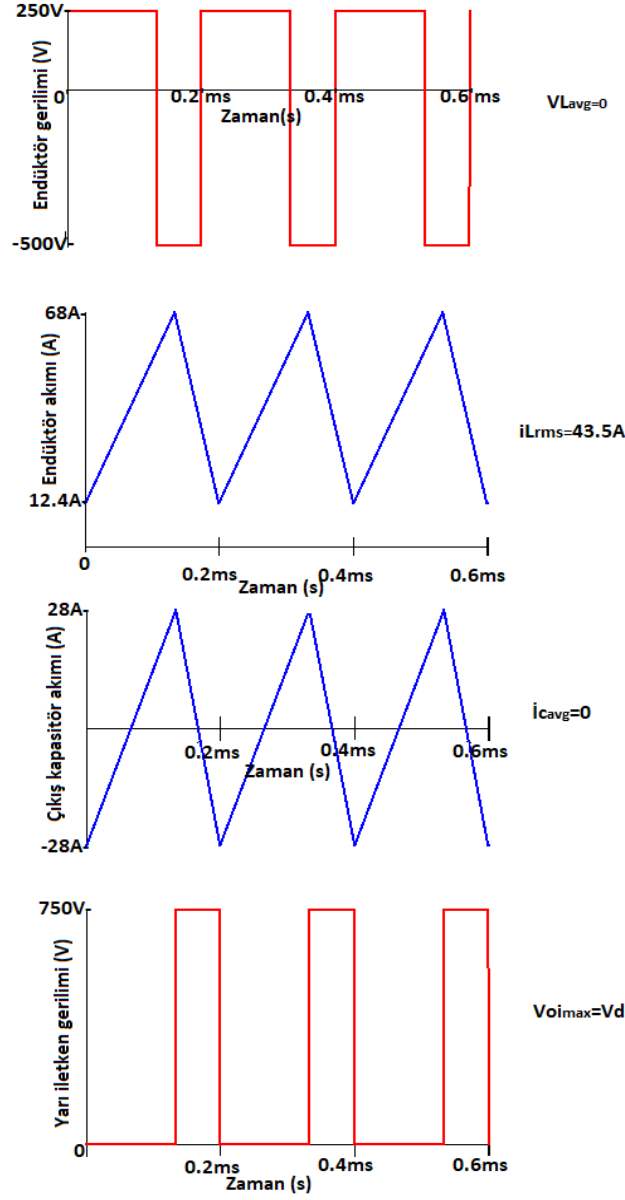
- Diğer yarı iletkenlere göre daha yüksek akım, gerilim değerlerine sahiptir bununla birlikte daha düşük iletim direnci vardır. Bu da verimlilik konusunda avantaj sağlamaktadır.
- Açılıp kapanma süreleri daha hızlıdır. Yüksek frekans çalışmaları için daha uygundur.
- Daha yüksek ısılara dayanabilmektedir.

3. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu kısımda indirici yükseltici kıyıcı için ve enerji depolama geri döndürme sistemi için yapılan benzetim çalışmalarına yer verildi. Öncelikle, indirici ve yükseltici tipte çevirgeçlerin 45kW gücüne kadar kararlı durumda çalışma karakteristikleri incelendi. Bu karakteristiklere göre devre elemanları seçildi. Buna ek olarak, yeni bir yöntemle başka bir benzetim çalışmasında, güneş panellerinden alınan veriler yardımıyla kurulan sistemin karakteristikleri incelendi. İleride yapılacak çalışmalarda daha fazla evirici ve süper kapasitör ile çalışılabilmesi için benzetim çalışmaları yüksek güçlerde gerçekleştirildi. Benzetim çalışmaları yapılırken PV sistemin tamamını regüle edebilmek için gerekli ekstrem güç değerlerine çıkıldı. Panellerden sabit bir güç çekişi olmayacağı için benzetim çalışmalarında farklı güç değerlerinde çalışıldı.

3.1 İndirici Tipte Çevirgeç İçin Benzetim Çalışmaları

İndirici tipte çevirgeç için basit bir benzetim çalışması yapıldı. Benzetim çalışmaları Texas Instruments firmasının sunduğu Power Toolbox programı ile yapıldı. Elde edilen sonuçlar teorik hesaplamalar ile paralellik gösterdi. Şekil 36 elde edilen benzetim çalışması sonuçlarını göstermektedir. Bu çalışmaya göre yarı iletken ve diğer ekipmanların seçimi yapılabilir. Benzetim çalışmalarında giriş gerilimi 750V, giriş gücü 20 kW, çıkış gerilimi ise 500V değerindedir.



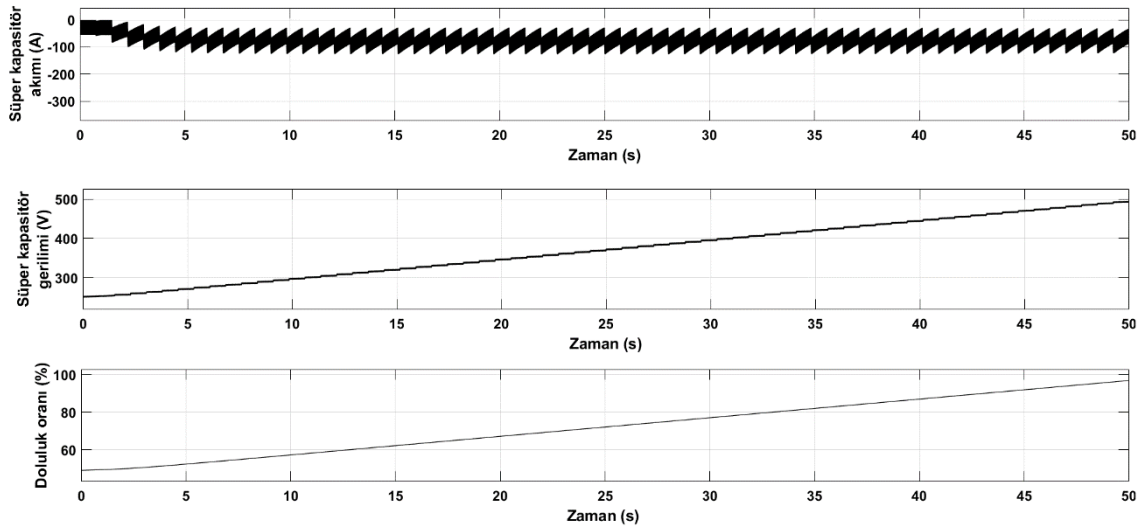
Şekil 36. İndirici tipte çevirgeç için benzetim çalışması sonuçları.

Bir diğer benzetim çalışmasında ise uzun süreli güç aktarım karakteristiği incelendi. Bu benzetim çalışması ise Matlab/Simulink programı kullanılarak yapıldı. Güç aktarımı için kullanılacak indirici tipte çevirgece ait parametreler Çizelge 6'da listelenmiştir.

Çizelge 6. İndirici tipte devre için benzetim çalışması devre değişkenleri.

Giriş gerilimi	750V
Çıkış gerilimi	250-500V
Çıkış gücü	~20kW, ~45kW
Çıkış Kapasitörü	15F
Endüktör	600uH
Anahtarlama frekansı	5kHz

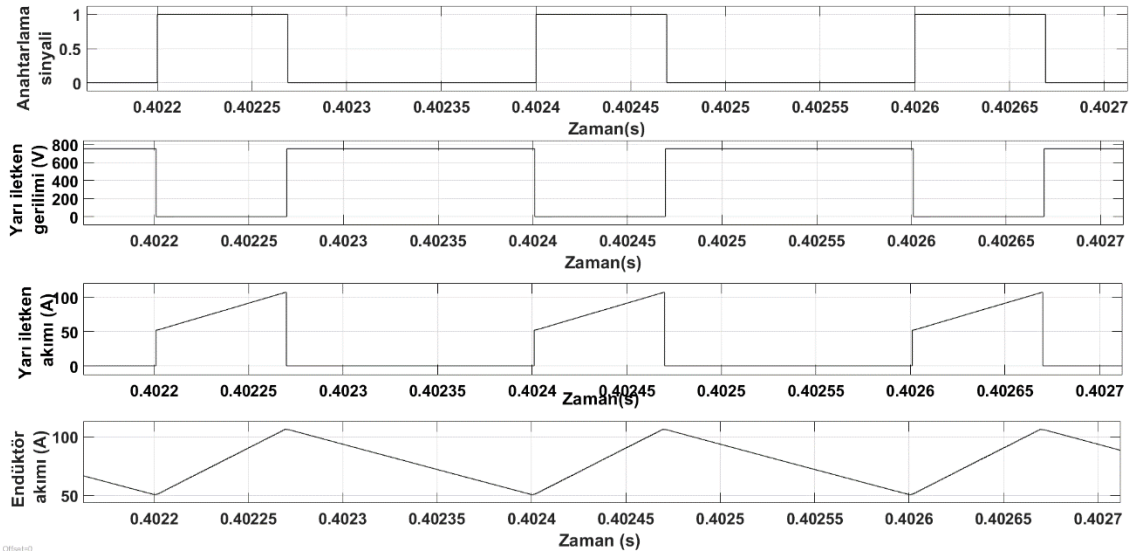
Bu benzetim çalışması yapılırken süper kapasitörler yarı yükte başlatıldı. Süper kapasitörler anma gerilimine kadar altı eşit kademede yüklendi. Böylece kapasitörlerin enerji depolama karakteristiği ve yarı iletkenlerin çalışma karakteristiği gözlemlendi. Süper kapasitörlere ilişkin değerler grafiği Şekil 37’de verilmiştir. Benzetim çalışması kapalı döngü kontrol olmadan yapılmıştır.



Şekil 37. İndirici tipte devre için kapasitör akım, gerilim ve kapasitör doluluk oranı.

Düşünülen deneysel çalışmada süper kapasitörlere sabit bir güç aktarımı yapılmayacaktır. Süper kapasitör gücü anlık olarak, tahmin edilen üretim eğrisi ve gerçek üretim eğrisine göre sürekli değişecektir. Bu nedenle benzetim çalışmasında sabit çıkış gerilim değeri üzerinde çalışılmadı, bunun yerine çıkış gerilimi kademeli olarak anlık arttırıldı. Her kademede 4V gerilim arttırıldı. Gerilim anlık olarak arttırıldığında süper kapasitörlerin

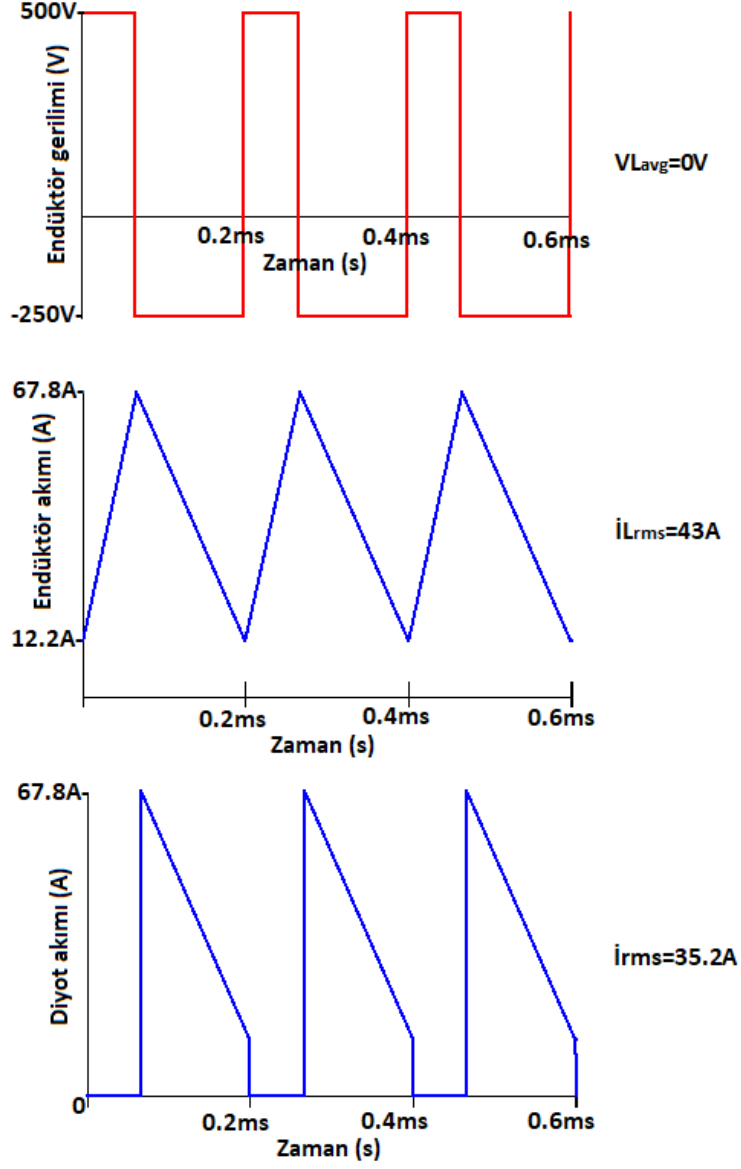
anlık akım değeri yükseldiği görülmektedir. Bu yükselme olası bir anahtarlama hatası durumunda yani çıkış gerilimi iyi ayarlanamadığı takdirde karşılaşılabilecek durumu göstermektedir. Öte yandan kapasitörler gerilim arttırıldıktan sonra çalışması beklenen (hatasız) koşullarda çalıştırıldı. Sonuç olarak 50 saniyede kapasitörler anma gerilimine ulaştı. Buna ek olarak yarı iletken akım ve gerilimi, endüktör akımı, anahtarlama sinyaliğine göre Şekil 38’de verilmiştir. Görünürlüğünün daha iyi olması için aynı benzetim çalışması sonuçları daha dar bir pencerede gösterildi.



Şekil 38. İndirici tipte devre için anahtarlama sinyali, yarı iletken gerilimi, akımı ve endüktör akımı (hatasız çalışma).

3.2 Yükseltici Tipte Çevirgeç İçin Benzetim Çalışmaları

Bu kısımda güç aktarımı için kullanılacak yükseltici tipte devre için benzetim çalışmaları yapıldı. Elde edilen sonuçlar ile teorik hesaplamalar paralellik gösterdi. Benzetim çalışması sonuçları Şekil 39’da verilmiştir. Yükseltici tipte çevirgeç benzetimi için giriş gerilimi 500V, giriş gücü 20kW ve çıkış gerilimi 750V değerindedir.



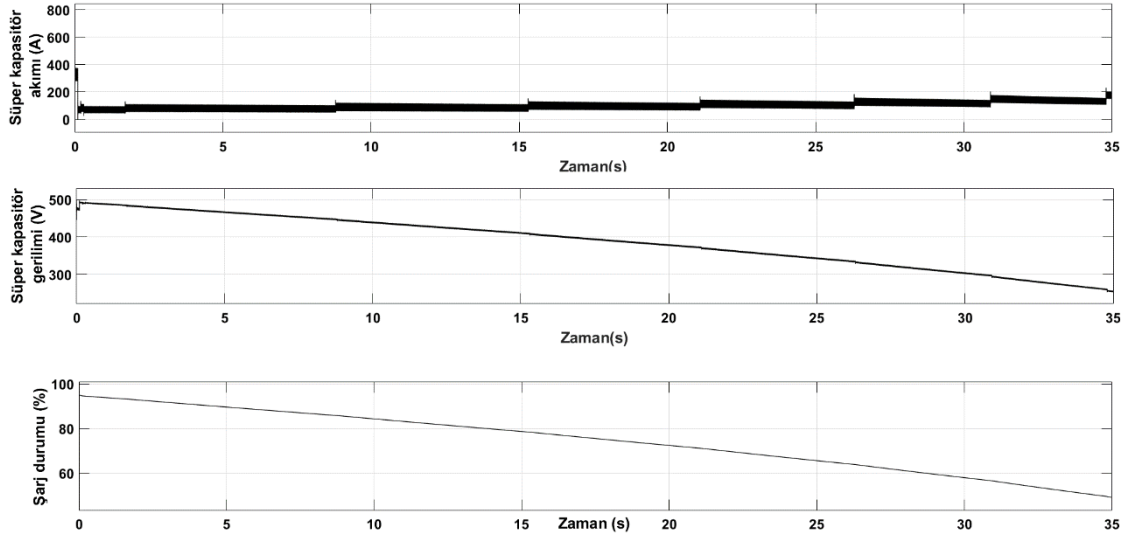
Şekil 39. Yükseltici tipte çevirgeç için benzetim çalışması sonuçları.

Bir diğer benzetim çalışmasında ise uzun süreli güç aktarım karakteristiği incelendi. Güç aktarımı için kullanılacak yükseltici tipte çevirgece ait parametreler Çizelge 7'de listelenmiştir.

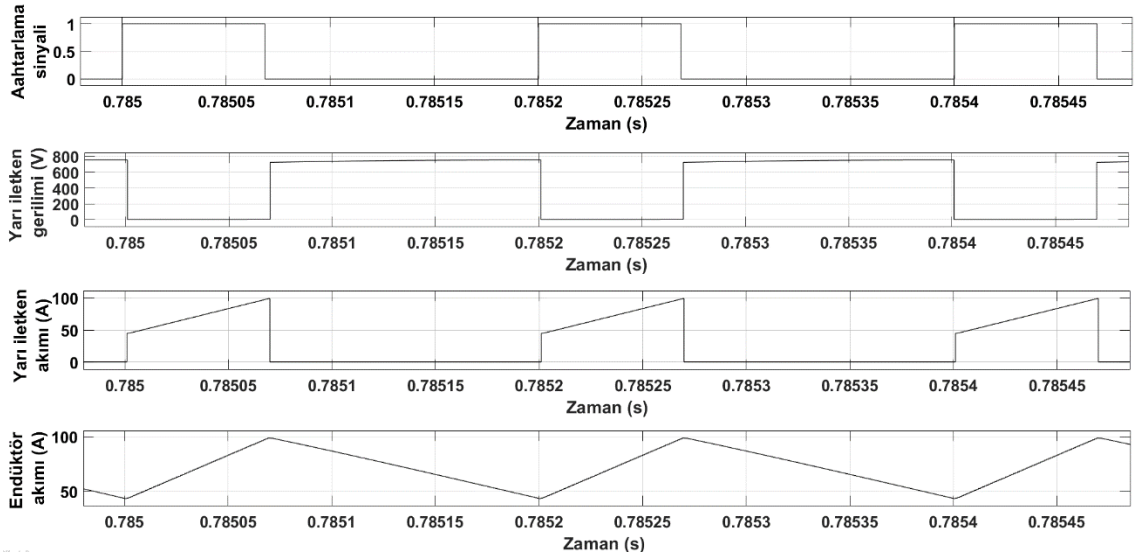
Çizelge 7. Yükseltici tipte devre için benzetim çalışması devre değişkenleri.

Giriş gerilimi	250-500V
Çıkış gerilimi	750V
Güç	35kW-45kW
Çıkış Kapasitörü	15F
Endüktör	600uH
Anahtarlama frekansı	5kHz

Yükseltici tipte devrenin çıkışında şebekeye bağlı evirgeçler bulunmaktadır. Bu evirgeçler 750V DC giriş gerilimi ile çalışmaktadır. Bu nedenle yükseltici tipte çevirgecin çıkışı 750 V değerinde sabit tutulmalıdır. Yükseltici çevirgecin giriş tarafında ise süper kapasitörler bulunmaktadır. 750V sabit çıkış gerilimi gözetilerek, süper kapasitör gerilimi anma geriliminin yarısına gelinceye kadar süper kapasitörlerden evirgeçlere doğru enerji aktarımı yapıldı. Elde edilen sonuçlar Şekil 40 ve 41’de paylaşılmıştır. Şekil 40 süper kapasitör gerilim, akım ve doluluk oranını göstermektedir. Şekil 41 ise anahtarlama sinyali, yarı iletken gerilim, akımı ve endüktör akımını göstermektedir. Görünürlüğü arttırmak için Şekil 41 daha dar bir pencerede gösterilmiştir. Sonuç olarak süper kapasitörler 35 saniyede anma geriliminin yarısına gelecek kadar boşaltıldı.



Şekil 40. Yükseltici tipte devre için süper kapasitör akımı, gerilimi ve kapasitör doluluk oranı.



Şekil 41. Yükseltici tipte devre için anahtarlama sinyali, yarı iletken gerilimi, akımı ve endüktör akımı.

4. ÇEVİRGEÇ TASARIMI

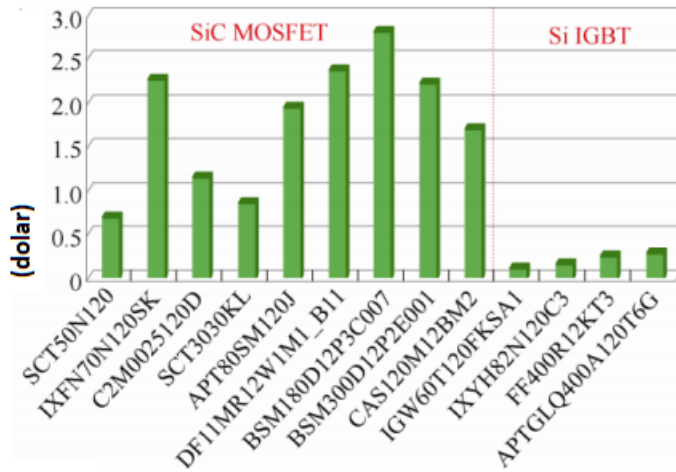
Bu kısımda, yapılan benzetim çalışmalarına göre malzeme seçimi ve kapalı döngü kontrol sisteminin kurulması üzerinde duruldu.

4.1 Yarı İletken Seçimi

Endüstride kullanılan SiC ve Si tabanlı yarı iletkenlerin fiyatlarına ait bir liste Çizelge 8’de verilmiştir. Gene akım başına düşen fiyat olarak Şekil 42’de farklı üreticilerin ürettiği SiC ve Si tabanlı yarı iletkenler verilmiştir.[21]

Çizelge 8. Endüstride kullanılan bazı SiC yarı iletken fiyatları (2019).

Üretici ve Model	Anma gerilimi ve akımı	Fiyat (dolar, adet)
Infineon SiC DF11MR12W1M1_B11	1200 V 50 A	119.04
Rohm SiC BSM180D12P3C007	1200 V 180 A	506.97
CREE/ Wolfspeed SiC CAS120M12BM2	1200 V 193 A	330
Infineon Si FF400R12KT3	1200 V 193 A	145.33



Şekil 42. Amper başına düşen yarı iletken fiyatları.

Bölüm 2.6’da belirtilen SiC tabanlı yarı-iletkenlerin diğer yarı iletkenlere göre bazı yönlerden avantajlı olması nedeniyle SiC tabanlı bir yarı iletken seçilmesi uygun görüldü. Bu çalışmada kullanılan yarı iletken Wolfspeed firmasının ürettiği CAS300M17BM2 model SiC tabanlı yarı iletkenidir. Bu yarı iletkene ait bazı teknik özellikler Çizelge 9’da verilmiştir. Kurulan sistemin bu tez kapsamına alınmayan sonraki çalışmalarda daha

yüksek güç ve gerilim değerlerinde çalıştırılabilmesi için yarı iletken minimum gereksinimlerin üzerinde seçildi.

Çizelge 9. Kullanılan yarı iletken özellikleri CAS300M17BM2.

Parametre	Değer ve birimi
Savak kaynak (ing. Drain-source) gerilimi	1.7 kV
Sürekli savak akımı	325 A (25°C) 225 A (90°C)
Sürekli diyot akımı	556 A (25°C) 353 A (90°C)
Çalışma sıcaklığı	-40, +150 °C
İletim direnci	8 mΩ
Fiyat	877 Amerikan Doları

Teknik şartname incelendiğinde kullanılan yarı iletkenin iletim direnci 12mΩ olarak verilmiştir. 5kHz anahtarlama frekansı ve 20A savak akımı için toplam iletim kaybı 4.8W olmaktadır. İletim ve anahtarlama kayıpları birlikte toplam yarı iletken kaybı 11.8W olarak bulunmuştur. İletim kayıpları ve anahtarlama kayıpları yarı iletkenin sıcaklığına, kaynak savak gerilim ve akımına göre değişiklik göstermektedir.

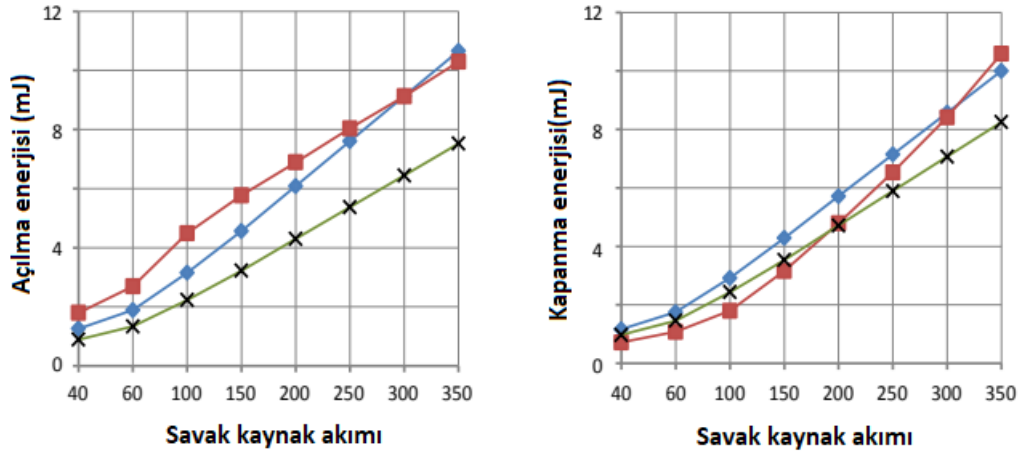
4.1.1 Kayıp Hesapları

SiC yarı iletken için iki adet kayıp bulunmaktadır. Birisi anahtarlama kayıpları diğeri ise iletim kayıplarıdır. Anahtarlama kayıpları yarı iletkenin açılıp kapanması sırasında oluşan kayıplardır. İletim kayıpları ise yarı iletkenin iç direncinden dolayı meydana gelen kayıplardır. SiC tabanlı bir yarı iletkenin anahtarlama kayıpları tek bir frekans çevrimi için 27 ve 28'deki eşitliğe göre bulunur. [19]

$$E_{on} = V_{ds,max} I_{ds} \frac{t_{ri} + t_{fu}}{2} \quad (27)$$

$$E_{off} = V_{ds,max} I_{ds} \frac{t_{ru} + t_{fi}}{2} \quad (28)$$

Bu iki denklemde $V_{ds,max}$: savak-kaynak gerilimi I_{ds} : savak-kaynak akımı, t_{ri}, t_{fi} : akım yükselme ve inme süreleri, t_{ru}, t_{fu} : gerilim yükselme ve inme süreleridir. E_{on}, E_{off} : açılma ve kapanma enerjileridir. Bahsedilen çalışmaya göre savak kaynak akımına göre açılıp kapanma enerjileri Şekil 37’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan yarı iletken bu tezde kullanılan yarı iletkenle aynı firma tarafından üretilmiştir fakat farklı modellerdir.[19]



Şekil 43. SiC tabanlı yarı iletken açılıp kapanma enerji kayıpları. [19]

Bu tezde yapılan çalışmada kullanılan yarı iletkenin teknik özelliklerine bakıldığında akım yükselme ve inme süreleri savak kaynak gerilimi 900V, savak akımı 300A için $t_{ri} = 72ns, t_{fi} = 56ns$ olarak verilmiştir. [20] Akım ve gerilim inme yükselme süreleri eşit kabul edilebilir. Denklem (27) ve (28)’deki hesaplamalar yapıldığında açılma enerjisi $E_{on} = E_{off} = 17mJ$ olarak bulunabilir. 550V savak kaynak gerilimi, 20A savak akımı için $E_{on} = E_{off} = 0.7mJ$ olarak bulunabilir. Anahtarlama kayıpları frekansa göre doğrusal olarak artmaktadır. 5kHz frekans için toplam anahtarlama kaybı 7W olmaktadır. 10kHz için yaklaşık 14W 20 kHz için yaklaşık 30W olmaktadır. Kullanılan yarı iletkenin açık durum direnci $8m\Omega$ olarak verilmiştir. 25 kW çıkış gücünde 550V giriş, 200V çıkış gerilimi için indirici kıyıcının iletim kayıpları toplamda 47W olmaktadır. Anahtarlama kaybı ise 28W olmaktadır. Toplamda 75W yarı iletken kaybı gözlenmektedir. Yükseltici çevirici için aynı çalışma gücünde 600V çıkış, 300V giriş gerilimi için toplam iletim kaybı 30W olmaktadır. Anahtarlama kaybı ise 21W olmaktadır. Yükseltici çevirici için toplam yarı iletken kaybı 51W değerindedir.

4.2 Süper Kapasitör Seçimi

Bu çalışmada kullanılan süper kapasitörler Maxwell firmasının ürettiği BMOD0063. P125 B08 modelleridir. Süper kapasitörlerin her biri 63F kapasitansa 125V anma gerilimine sahiptir. 4 adet süper kapasitör seri bağlanarak süper kapasitör bankası oluşturulmuştur. Süper kapasitörlere ait bazı teknik özellikler Çizelge 10'da verilmiştir. Süper kapasitör iletim kaybı 25kW çalışma koşulu için yükseltici çeviricide 64W indirici çeviricide 115W değerindedir.

Çizelge 10. Süper kapasitör teknik özellikleri BMOD0063.

Parametre	Değer ve birimi
Anma kapasitansı	63F
ESR	18mΩ
Anma gerilimi	125V
Maksimum akım	1900A
Çalışma sıcaklığı	-40, +65°C

4.3 Endüktör Seçimi

İndirici-yükseltici kıyıcı devresinin çalışması için bir endüktöre ihtiyaç vardır. Endüktör indirici kıyıcı için çıkış tarafında bulunurken yükseltici çevirgeç için giriş tarafında yer almaktadır. Maksimum endüktör gerilimi 750V/500V indirici kıyıcı ve 500V/750V yükseltici çevirgeç dönüşümleri için 500V olmaktadır. Sürekli durum (ing. Continuous state) çalışması için endüktörün alabileceği minimum değerler denklem (11) ve (20)'de verildi. Bu denklemlere göre minimum endüktans değeri 5kHz için 0.2 μH 10kHz için 0.1uH çıkmaktadır. Minimum endüktans değeri anahtarlama frekansına bağlı olarak doğrusal değişmektedir. Endüktörün akım taşıma kapasitesi 12kW güç için minimum 48Arms değerinde olmalıdır. Ancak ileride daha yüksek güç denemeleri de yapılabilmesi için endüktör seçimi minimum gereksinimlerin çok üzerinde yapıldı. Bu özellikleri karşılayan Mangoldt firmasının ürettiği 1051604 model endüktör kullanıldı. Endüktöre ait bazı teknik özellikler çizelge 11'de verilmiştir. Endüktörde gözlenen güç kaybı 25kW çıkış gücünde indirici çevirici için 12W yükseltici çevirici için 7.2W olmaktadır.

Çizelge 11. Endüktöre ait teknik özellikler Mangoldt 1051604.

Parametre	Değer ve Birimi
Endüktans	0.6mH
Anma akımı	250 Arms
Anma gerilimi	750V
Maksimum gerilim	3kV
Ağırlık	123kg

4.4 Akım ve Gerilim Sensörleri, Yarı İletken Sürücü, Mikroişlemci ve Kapalı Döngü Denetim.

Kurulan sistemde akım ve gerilim bilgilerini alabilmek için sensörlere ihtiyaç vardır. Bu sensörler yardımı ile akım ve gerilim bilgileri mikroişlemciye gönderilmektedir. Devre üzerinde akım ve gerilim değerlerinin okunması gereken yerlerde yüksek güç bulunduğu için izole sensörler kullanıldı. Böylece düşük güç sistem ve yüksek güç sistemin fiziksel bağlantısı birbirinden ayrıldı. Gerilim sensörü olarak LEM firmasının ürettiği LV25-1000 model gerilim dönüştürücüsü kullanıldı. Akım sensörü için gene LEM firmasının ürettiği LF 510-S akım dönüştürücüsü kullanıldı. Gerilim dönüştürücüleri ile süper kapasitör üzerindeki gerilim ve giriş gerilim değerleri okundu. Akım sensörü ile endüktör üzerindeki akım değeri okundu. Yüksek güçte çalışıldığı için anahtarlama esnasında güç hattında yüksek gürültü gözlenmektedir. Bu nedenle anahtarlama esnasında sensörlerden veri akışı kısa bir süreliğine durduruldu. Gürültü sönümlendiğinde tekrar veri akışına devam edildi. Kullanılan akım ve gerilim sensörlerine ait bazı teknik özellikler Çizelge 12 ve 13'te verilmiştir.

Çizelge 12. Akım sensörü teknik özellikleri LF 510-S.

Parametre	Değer ve Birimi
Primer maksimum akım	500A
Besleme gerilimi	24V
Sekonder maksimum akım	100mA
Maksimum sıcaklık	100°C

Çizelge 13. Gerilim sensörü teknik özellikleri LV25-1000.

Parametre	Değer ve Birimi
Primer anma gerilimi	1000V
Sekonder anma akımı	6.6mA
Besleme gerilimi	24V
Çalışma sıcaklığı	-40, +80°C

Yarı iletken kapısına anahtarlama sinyallerini gönderebilmek için gerekli güç ve gerilim değerleri mikroişlemciden alınamaz. Ayrıca düşük güç sistem ile yüksek güç sistemin fiziksel bağlantısı birbirinden ayrılmalıdır. Bu nedenle izole bir yarı iletken sürücü devresine ihtiyaç bulunmaktadır. Kullanılan yarı iletkene uygun Wolfspeed firmasının ürettiği CGD15HB62P1 model sürücü devresi kullanıldı. Bu sürücüye ait bazı teknik özellikler Çizelge 14’te verilmiştir.

Çizelge 14. Yarı iletken sürücüye ait teknik özellikler CGD15HB62P1.

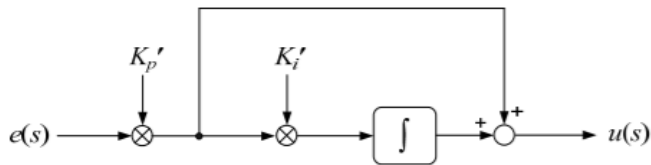
Parametre	Değer ve Birimi
Besleme gerilimi	16V
Çıkış gücü	1.8W
Maksimum anahtarlama frekansı	64kHz
Sıcaklık	-35, +85°C

Akım ve gerilim bilgilerinin işlenmesi, kapalı döngü denetim ve anahtarlama sinyallerinin üretimi için bir mikroişlemci kullanılmaktadır. Kullanılan mikroişlemci Texas Instruments firmasının ürettiği TMS320F28379D model mikroişlemcidir. Bu mikroişlemci güç elektroniği ile ilgili konularda yaygın olarak kullanılmaktadır. USB bağlantısı ile bilgisayar üzerinden programlama ve hata ayıklama yapıldı. Mikroişlemciye ait bazı teknik özellikler Çizelge 15’te verilmiştir.

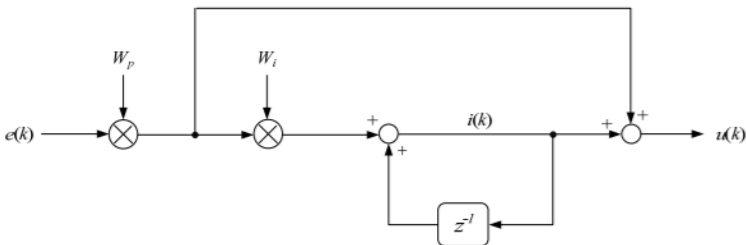
Çizelge 15. Mikroişlemci teknik özellikleri TMS320F28379D.

Parametre	Değer ve Birimi
Çekirdek sayısı	2
Hafıza	512KB
Sistem saati	10MHz
Sıcaklık	-40, +105°C

Çıkış gerilim ve akım seviyelerinin belirlenmesi için kapalı döngü denetim mekanizması kullanıldı. Kapalı döngü denetim mekanizmalarının karakteristikleri incelendiğinde bu çalışma için PI denetleyicinin yeterli olacağı görüldü. Mikroişlemci kütüphanesi incelendiğinde sürekli zamandaki standart PI denetleyicinin Tustin dönüşümü kullanılarak ayrık zamana uyarlanmış halinin kullanıma sunulduğu görüldü. Sürekli zamandaki standart seri PI denetleyici ve Tustin dönüşümü kullanılarak ayrık zamana uyarlanmış halinin blok devreleri Şekil 44 ve 45'te verilmiştir.[22]



Şekil 44. PI denetleyici.



Şekil 45. Ayrık zamanda PI denetleyici.

Burada, $e(s), e(k)$: hata sinyali (sıra ile sürekli ve ayrık zamanda), K_p, W_p : oransal kazanç, K_i, W_i : integral kazanç, $u(s), u(k)$: çıkış sinyali, z^{-1} Operatörü ise sinyal

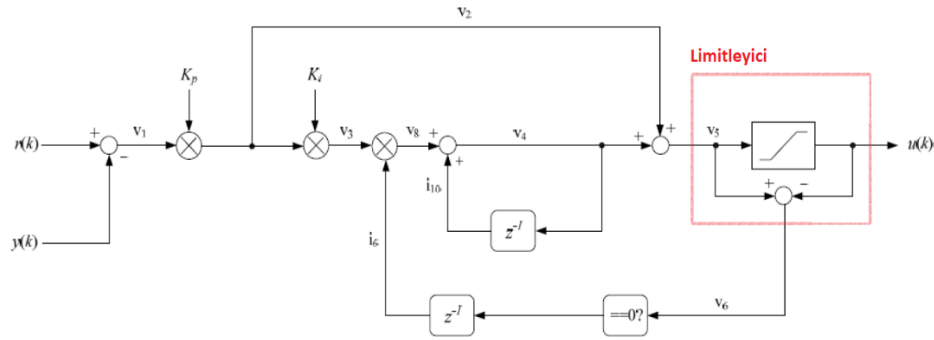
geciktirici olarak kullanılmıştır. Şekil 44'deki PI denetleyici için transfer denklemi Tustin dönüşümü denklemi ve Şekil 45'teki ayrık zamanlı PI denetleyicinin dönüşüm denklemi denklem (29), (30) ve (31)'de verilmiştir.

$$F(s) = \frac{K_p' s + K_p' K_i'}{s} \quad (29)$$

$$s = \frac{2(z-1)}{T(z+1)} \quad (30)$$

$$u(k) = u(k-1) + W_p(1 + W_i)e(k) - W_p e(k-1) \quad (31)$$

T ile gösterilen parametre çözünürlüktür. Bu denklemler yardımı ile dijital ortamda PI denetleyici kullanılmıştır. Mikroişlemci kütüphanesinde hazır olarak bulunan denetleme sistemi ise şekil 45'te gösterilen denetleme sisteminin birikim önleyici ile beraber kullanılmış halidir. Birikim önleyici blok devre transfer denklemine etki etmemektedir sadece olası hatalarda PI kontrolcünün çıkışının istenenden yüksek değerlere gitmesini engellemektedir. Mikroişlemci kütüphanesinde kullanılan denetleme sisteminin blok devre şeması Şekil 46'da verilmiştir.



Şekil 46. Mikro işlemci kütüphanesinde hazır bulunan PI denetleyici.

Akım ve gerilim denetleyicileri ayrı ayrı tasarlandı. Akım denetleyicisi tasarlanırken gerilim denetleyicisinin kazancı 1 kabul edildi. Aynı yöntemle gerilim denetleyicisi tasarlanırken akım denetleyicisinin kazancı 1 kabul edildi. Denetleyici parametreleri bir Smart Control programı ve PSIM programı ile benzetim ortamında bulundu. Parametreler

5kHz ve 10kHz anahtarlama frekansı için bulundu. Denetleyici parametreleri yükseltici çevirici ve indirici kıyıcı için Çizelge 16’da verilmiştir.

Çizelge 16. Kapalı döngü denetleyici parametreleri (5kHz anahtarlama frekansı için).

	Parametre		Değer
	İndirici Kıyıcı	Gerilim Denetleyici	Oransal kazanç, K_p
İntegral kazanç, K_i			0.5252
Limitleyici, D_{max}			0.7
Akım Denetleyici		Oransal kazanç, K_p	0.556
		İntegral kazanç, K_i	0.066
		Limitleyici, I_{max}	0.7
Yükseltici Çevirici	Parametre		Değer
	Gerilim Denetleyici	Oransal kazanç, K_p	0.8751
		İntegral kazanç, K_i	0.1697
		Limitleyici, D_{max}	0.7
	Akım Denetleyici	Oransal kazanç, K_p	0.452
		İntegral kazanç, K_i	0.0553
		Limitleyici, I_{max}	0.84

4.5 Giriş Güç Kaynağı Tasarımı

Kurulan sistemin test edilmesi için bir DA güç kaynağına ihtiyaç vardır. Güç kaynağı olarak şebekeye bağlı tam köprü doğrultucu düşünüldü. Bu amaçla IXYS Power firmasının ürettiği VUO190-16N07 üç faz tam köprü doğrultucu modülü kullanıldı. Modülün girişine yüksek akımları engellemek için devre kesici konuldu. Devre kesici için ABB firmasının ürettiği A1N 125 TMF 125 şalter kullanıldı. Doğrultulmuş dalga formu giriş DA gücü olarak kullanıldı. Tam köprü doğrultucuya ait bazı özellikler Çizelge 17’de, devre kesiciye ait bazı özellikler Çizelge 18’de verilmiştir.

Çizelge 17. Üç faz doğrultucu modülü özellikleri VUO190-16N07.

Parametre	Değer ve Birimi
Maksimum gerilim	1600V
Maksimum akım	240A (tek faz)
Sıcaklık	-40, +150°C

Çizelge 18. Devre kesici özellikleri A1N 125 TMF 125.

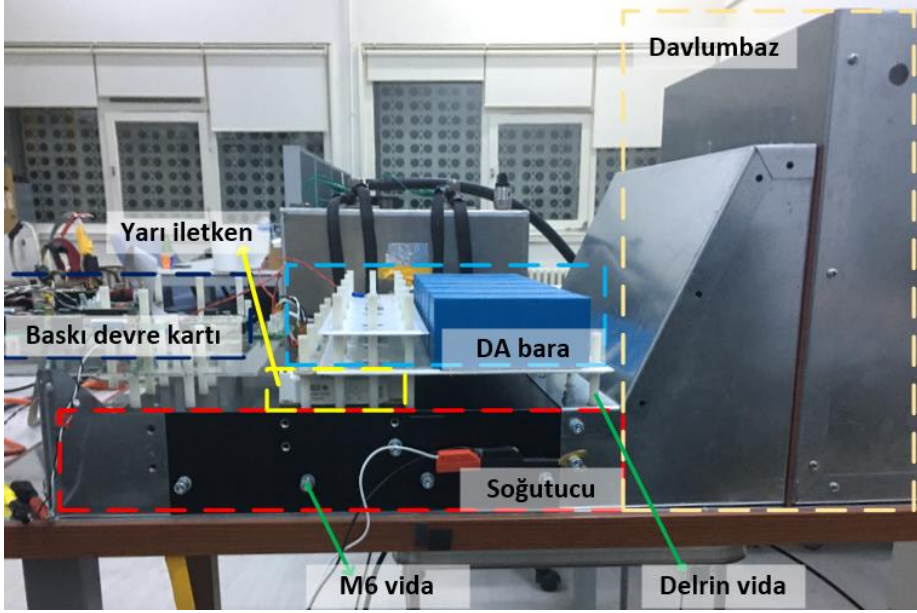
Parametre	Değer ve Birimi
Anma gerilimi	250V AC
Sürekli anma akımı	125A
Kutup sayısı	3
Ağırlık	0.8 kg

Devre kesici üç faz çıkış güç panosuna monte edildi. Üç faz dönüştürücü ise bir soğutucu üzerine monte edildi. Bağlantı için 35 mm² kesit alanlı kablo kullanıldı.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Laboratuvar Düzeneginin Kurulumu

Laboratuvar düzeneginin kurulması için kullanılan malzemeler iki kısma ayrılarak incelendi. Birinci kısımda kullanılan mekanik malzemelerden bahsedildi. Bu malzemeler içerisinde soğutucu, davlumbaz, süper kapasitör rafı, topraklama elemanları, DA bara ve vidalar bulunmaktadır. İkinci kısımda ise kullanılan elektrik ekipmanları ve elektronik malzemeler anlatıldı. Bu malzemeler içerisinde baskı devre kartı, akım ve gerilim ölçüm ekipmanları, koruma ekipmanları, yarı iletken ve sürücüsü, bobin, süper kapasitörler ve mikroişlemci bulunmaktadır. Deneysel çalışmalarda ileride daha fazla evirici ve süper kapasitör değerleri ile çalışabilmek için yüksek güçlerde çalışma karakteristikleri incelendi, deneysel tasarım yüksek güçlere göre yapıldı. Kurulan laboratuvar düzeneginin güç katındaki malzemeler Şekil 47’de verilmiştir.

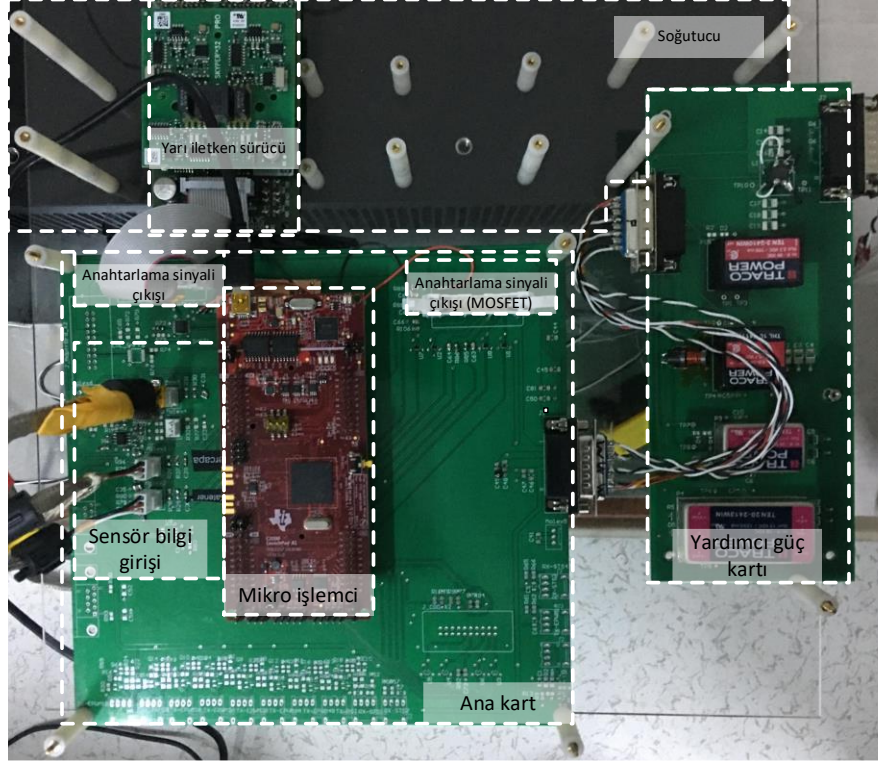


Şekil 47. Laboratuvarda kurulan deney seti

5.1.1 Elektrik Ekipmanları ve Elektronik Malzemeler

Bu kısımda tasarlanan baskı devre kartı, kullanılan elektrik ekipmanları ve elektronik malzemeler anlatıldı. Bu kısımda baskı devre kartı, akım ve gerilim sensörleri, koruma ekipmanları, yarı iletken ve sürücüsü, bobin, süper kapasitörler ve mikroişlemci bulunmaktadır.

Bu proje yapılırken iki adet baskı devre kartı tasarlandı. Birinci baskı devre kartı mikroişlemci ile yükseltici ve indirici tipte çevirgeç arasındaki haberleşmeyi sağlamaktadır. Çevirgecin çıkışındaki akım ve gerilim bilgilerini mikroişlemciye iletmektedir. Ayrıca mikroişlemciden yarı iletken sürücüsüne anahtarlama sinyali bilgisini göndermektedir. Bu baskı devre kartı ile hem IGBT hem de MOSFET yarı iletkenlerine sinyal iletebilecek şekilde tasarlandı. İkinci baskı devre kartı ise yardımcı güç kartı olarak kullanılmaktadır. Bazı devre elemanlarının çalışması için gerekli gerilim değerleri (15V, 5.1V, 3.3V) bu baskı kartından iletilmektedir. Baskı devre kartları iki yüzü olarak bastırıldı. İki baskı devre kartı arasındaki iletim kablolar ile yapıldı. Baskı devre kartının üzerindeki devre elemanları yerleştirildikten sonra fotoğrafı Şekil 48’de verilmiştir.

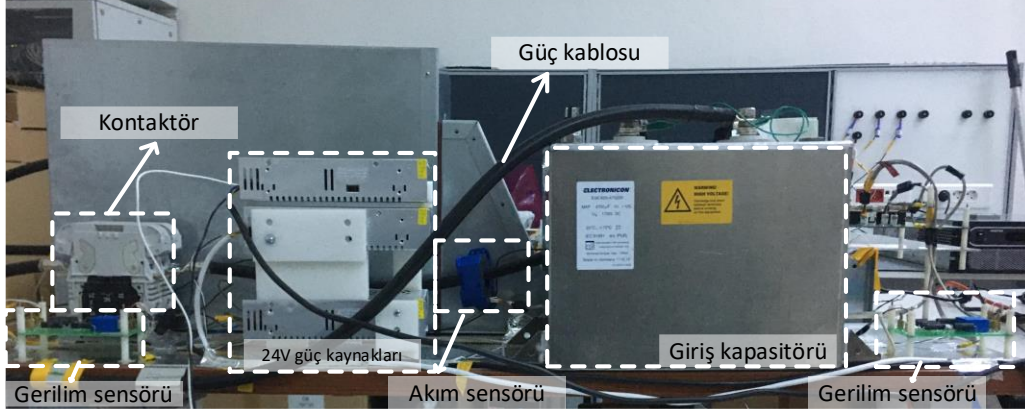


Şekil 48. Baskı devre kartlarının fotoğrafı.

Kurulan laboratuvar düzeneğinde yükseltici ve indirici çevirgeç için bir adet akım sensörü iki adet gerilim sensörü kullanıldı. Akım sensörü ile bobin üzerindeki akım bilgisi alındı. Gerilim sensörleri ile süper kapasitörler üzerindeki gerilim ve yarı iletken üzerindeki gerilim bilgisi alındı. Akım sensörü için LEM firmasının ürettiği LF 510-S kullanıldı. Gerilim sensörü için gene LEM firmasının ürettiği LV25-1000 gerilim dönüştürücüsü kullanıldı. Olası bir hata durumunda yükseltici ve indirici çevirgecin güç aktarım yolunun kesilebilmesi için bobin ve yarı iletken arasına Microelettrica Scientifica firmasının ürettiği LTCS 250 isimli kontaktör kullanıldı. Bu kontaktör içerisindeki yardımcı kontaktör yardımıyla 24V gerilim ile açılıp kapanabilmektedir. Bu sayede yükseltici ve indirici devrenin güç aktarım yolu 24V gerilim ile kontrol edildi.

Yüksek başlangıç akımlarını engellemek için giriş tarafında REO firmasının ürettiği reohm154 kodlu başlangıç direnci kullanıldı. Giriş gerilim dalgalanmalarını azaltmak için giriş kapasitörü olarak Electronicon firmasının ürettiği E56.A26 kodlu 1100V anma gerilimli DA kapasitör kullanıldı. Bu kapasitöre ek olarak DA bara üzerinde 6 adet 200 μ F paralel kapasitör bulunmaktadır. Çevirgecin güç yolunun kabloları için 0.6/1kV, 70mm² kesit alanlı kablo kullanıldı. Çevirgecin çıkış tarafında Mangoldt firmasının

ürettiği $600\mu\text{H}$, 250A , 750V anma değerlerine sahip bobin kullanıldı. Bununla birlikte yardımcı güç kartına enerji verebilmek, süper kapasitör fanlarını çalıştırabilmek ve kontaktörü çalıştırmak için üç adet 24V , 300W güç kaynağı kullanıldı. Laboratuvar düzeneğinde bu malzemelerin görüntüsü Şekil 49’da verilmiştir. Şekil 49, Şekil 47’nin karşı taraftan görünümüdür. Bobin ise davlumbaz içerisinde yer almaktadır bobin görüntüsü Şekil 50’de verilmiştir.



Şekil 49. Laboratuvar düzeneğinin yandan görüntüsü



Şekil 50. Davlumbaz içerisindeki bobin görüntüsü.

Tasarlanan yükseltici ve indirici tipte devrenin yarı iletkenlerinin kontrol edilebilmesi için Cree firmasının ürettiği CGD15HB62P1 SiC MOSFET sürücüsü kullanıldı. Bu sürücü Texas Instruments firmasının TMS320F28379D mikro işlemcisi ile kontrol edildi. Kullanılan elektriksel malzemelerin tam listesi Çizelge 19’da verilmiştir.

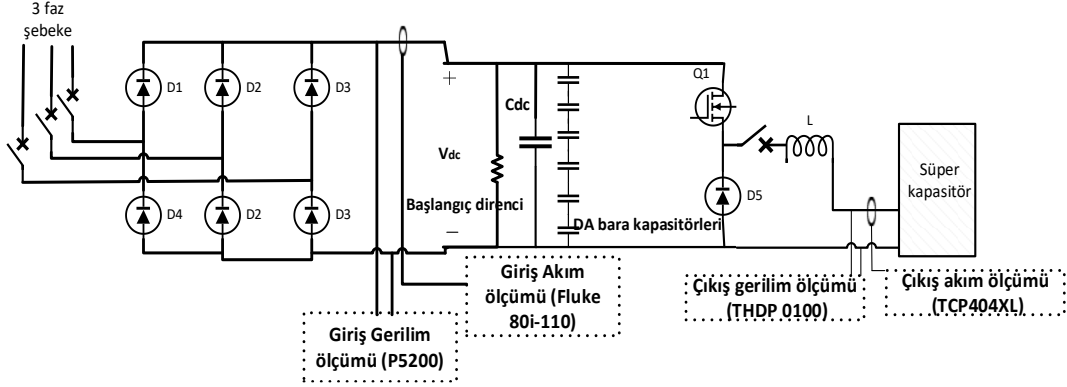
Çizelge 19. Kullanılan elektriksel malzemelerin tam listesi.

Üretici firma	Model	Açıklama
Maxwell	BMOD0063	Süper kapasitörler
Texas Instruments	TMS320F28379D	Mikroişlemci
LEM	LF 510-S	Akım sensörü
LEM	LV25-1000	Gerilim sensörü
Microelettrica Scientifica	LTCS-250	Güç kontaktörü
REO	Reohm154	Başlangıç direnci
Electronicon	E56.A26	Giriş kapasitörü
Mangoldt	1051604	Endüktör
Üntel	0.6/1kV, 1x70	Güç kablosu
	S360W-24V	Güç kaynağı
CREE/Wolfspeed	CAS300M17BM2	SiC yarı iletken
Fischer	sk461	Soğutucu

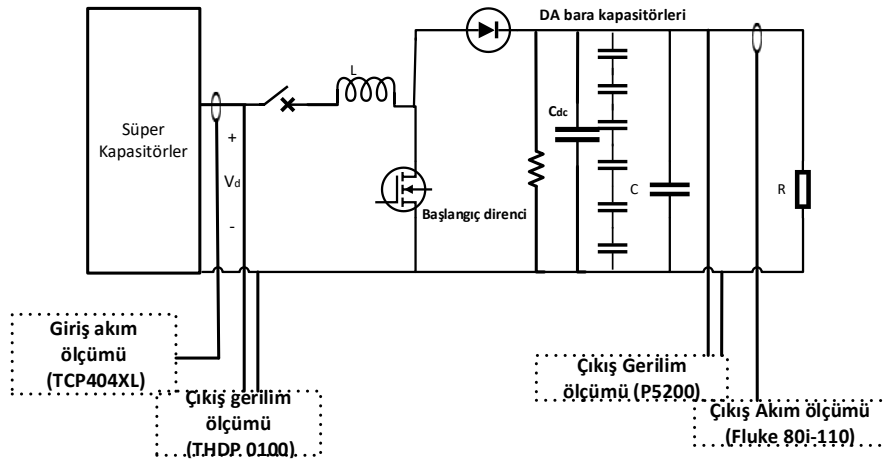
Çizelge 19’da yer alan ekipmanlardan süper kapasitörler, mikroişlemci, akım, gerilim sensörleri ve yarı iletkenlere ait teknik özellik bilgileri sırayla Ek 4, Ek 5, Ek 6, Ek 7 ve Ek 8’de verilmiştir. İndirici kısıcı için laboratuvar düzeneğine ait devre şeması Şekil 51’de verilmiştir. Devre kesici noktaları, DA bara kapasitörleri ve ölçüm alınan noktalar gösterildi. Yükseltici çevirici için laboratuvar düzeneğine ait devre şeması ise Şekil 52’de gösterilmiştir. Kullanılan ölçüm cihazları ve bunların hata payları ise altta listelenmiştir. Bu hata payları garantili hata paylarıdır. Anma gerilim ve akımlarda oda sıcaklığında cihazlar belli bir süre çalıştırılıp ısıtıldıktan sonra garanti verilen hata paylarıdır

- Tektronix P5200 yüksek gerilim diferansiyel prob: +/- %3 hata

- Fluke 80i-110s AA/DA akım probu: +/-% 15 hata
- Tektronix THDP0100 yüksek gerilim diferansiyel prob: +/-% 2 hata
- Tektronix TCP404XL akım probu: +/-% 3 hata



Şekil 51. İndirici kıyıcı için deney düzeneği şeması.



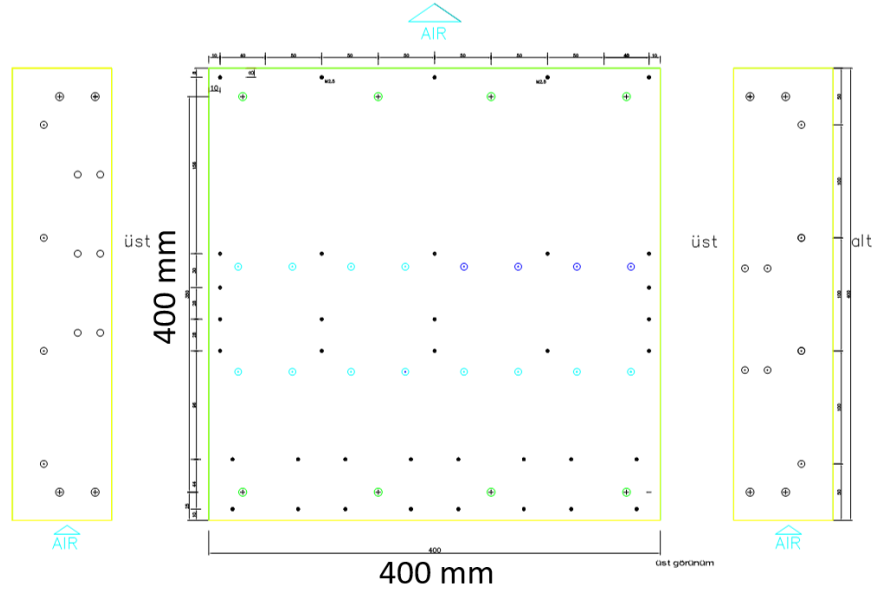
Şekil 52. Yükseltici çevirici için deney düzeneği şeması.

5.1.2 Mekanik malzemeler

Kurulan sistemde parçaları birbirine sabitlemek, sıcaklık artışını engellemek veya elektromanyetik girişimin sistem çalışmasını etkilemesini önlemek için kullanılan malzemeler mekanik malzemeler olarak adlandırıldı ve bu kısımda incelendi.

Yarı iletkenlerin ısınmasını engellemek için alüminyum soğutucu kullanıldı. Soğutucu üzerine açılan helikoil yay vida delikleri ile yarı iletkenler soğutucu üzerine sabitlendi. Yarı iletken ve soğutucu arasında ısıl malzeme konularak oluşacak ısının soğutucu yardımı ile daha hızlı uzaklaştırılması sağlandı. Soğutucunun her iki yan tarafına M6 vida delikleri

açıldı. Bu delikler ile davlumbaz ve soğutucu birbirine sabitlendi. Davlumbaz yardımı ile fandan gelen hava akımı yönlendirilerek soğutucu üzerinden geçmesi sağlandı. Ayrıca davlumbaz içerisine endüktör yerleştirildi. Soğutucu üzerine ayrıca DA bara ve baskı devre kartı sabitlemek için delrin vida delikleri açıldı. Soğutucunun boyutları ve delinme noktalarını gösteren çizim Şekil 53'te verilmiştir.



Şekil 53. Soğutucu üzerindeki vida delikleri ve soğutucu boyutları.

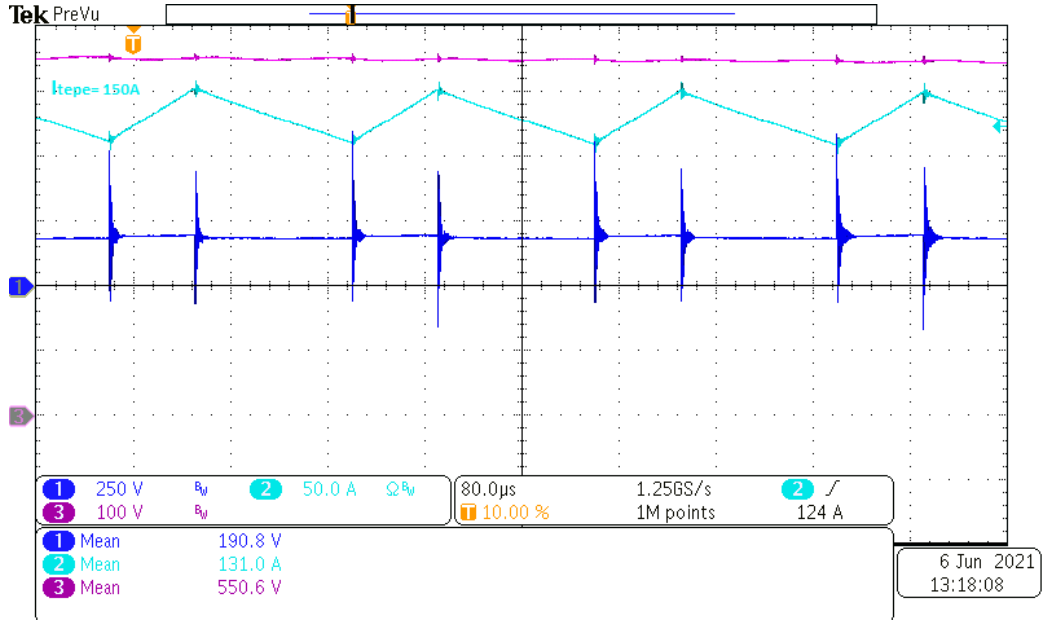
Elektromanyetik girişimi azaltmak ve topraklamanın birkaç farklı yerden yapılabilmesini sağlamak için Şekil 47'deki laboratuvar düzeneği alüminyum plaka üzerine konuldu. Enerji depolama ünitesi olan süper kapasitörleri rafa sabitlemek ve toplu halde rahat hareket ettirebilmek için tekerlekli raf yaptırıldı. Rafın dış kenar uzunlukları 130x60x85 cm'dir. Süper kapasitörler ve rafın görüntüsü Şekil 54'te verilmiştir. Süper kapasitörler yükseltici ve indirici çevirgece güç kabloları ile bağlandı.



Şekil 54. Süper kapasitörler ve raf.

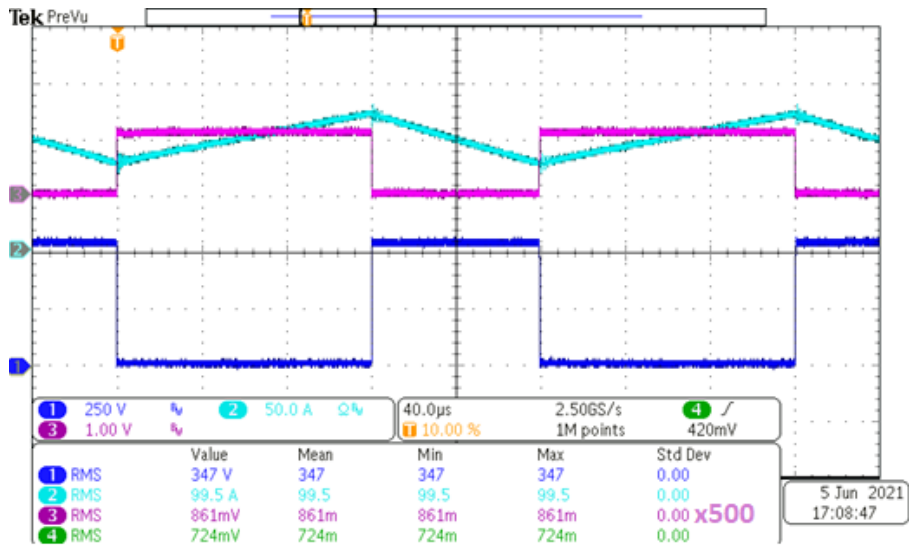
5.2 Laboratuvar Düzenegi Test Sonuçları

Bu kısımda laboratuvar düzenegi test edildi ve elde edilen sonuçlar paylaşıldı. Giriş ve çıkış akım ve gerilim değerleri yükseltici çevirici ve indirici kıyııcı için incelendi. İndirici kıyııcı devresi 25kW çıkış gücünde çalıştırıldı. Giriş gerilimi üç faz tam dalga doğrultucu devresinin çıkışı olan 551V ortalama değere sahiptir. Bu değer osiloskop ekranında pembe renk ile gösterildi. Çıkış gerilimi 191V ortalama değere sahiptir ve mavi renk gösterge ile gösterildi. Çıkış akımı ise açık mavi renk ile gösterildi ve 131.2A ortalama değere sahiptir. Dalga formlarında beklenenden farklı bir durum gözlenmemiştir. Dalga formlarının detaylı görünümü Şekil 55'te verilmiştir.



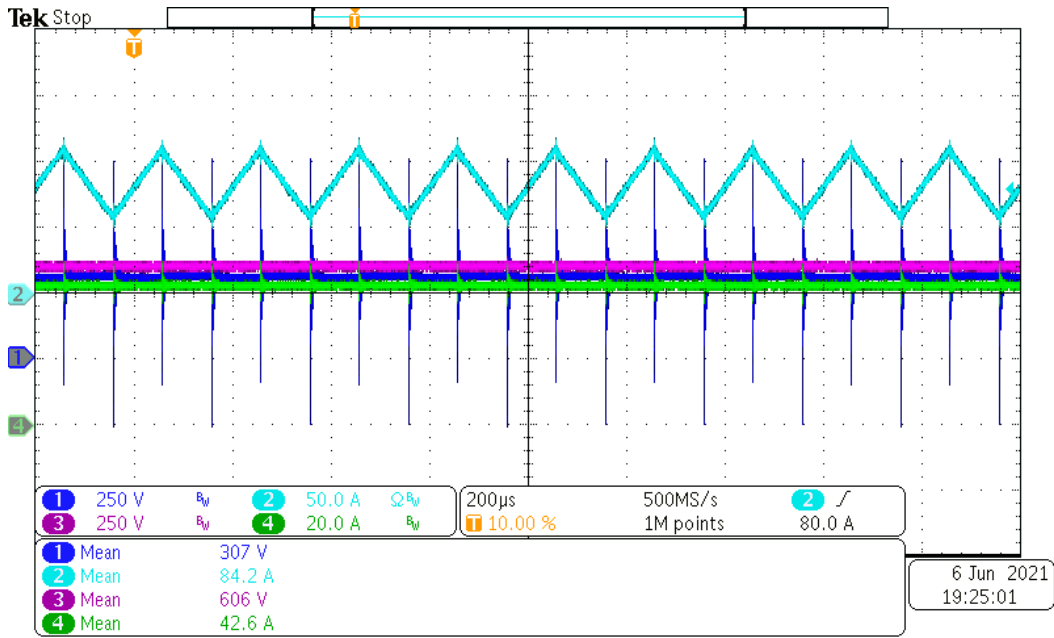
Şekil 55. İndirici kıyıcı için 25kW çıkış gücünde akım ve gerilim görüntüsü, 3 frekans çevrimi görünür halde.

İndirici kıyıcı devresi için yarı iletken ve kıyıcı diyot gerilimleri incelendi. Bu görüntü 350V, 100A ortalama çıkış gerilimi ve akımı değerlerinde alındı. Bahsedilen dalga formları Şekil 56’da verilmiştir. Dalga şekilleri incelendiğinde beklenenden farklı bir durum gözlemlenmedi. Ancak, akım dalga formunda gözlenen sivri çıkışların akım probunun kapıldığı gürültüden dolayı olduğu söylenebilir.

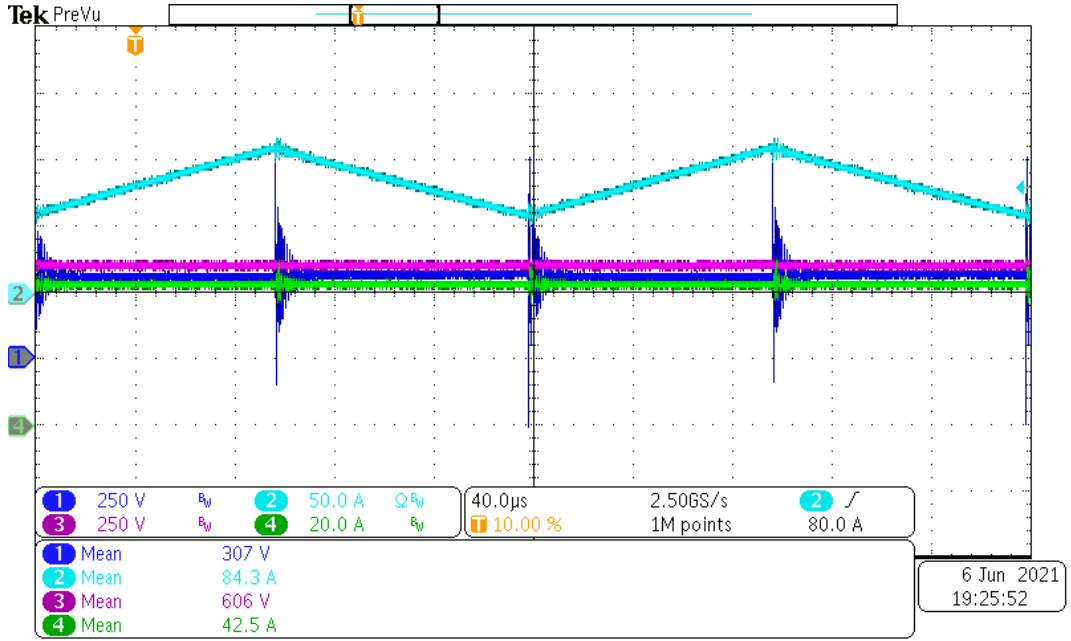


Şekil 56. İndirici kıyıcı için yarı iletken (koyu mavi), kıyıcı diyot gerilimi (pembe), endüktör akımı (açık mavi).

Yükseltici çevirici devresi 25kW çıkış gücünde çalıştırıldı. Akım ve gerilim dalga formları Şekil 57’de ve Şekil 58’de gösterilmiştir. Çıkış gerilimi 606V ortalama değere sahiptir ve pembe renkte gösterge ile gösterildi. Çıkış akımı 42.5A ortalama değerdedir ve yeşil renkte gösterge ile gösterildi. Giriş gerilimi mavi ile gösterildi ve 307V ortalama değere sahiptir. Giriş akımı ise açık mavi renkte gösterildi ve 84.3A ortalama değere sahiptir.

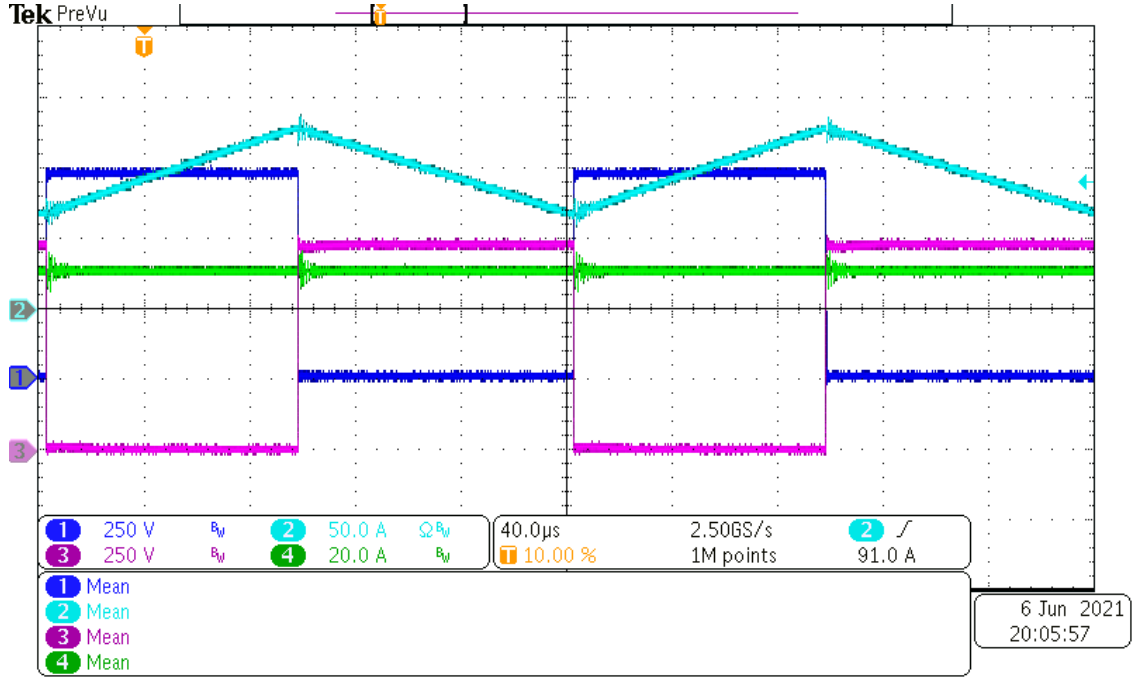


Şekil 57. Yükseltici çevirici için 25kW çıkış gücünde akım ve gerilim görüntüsü.



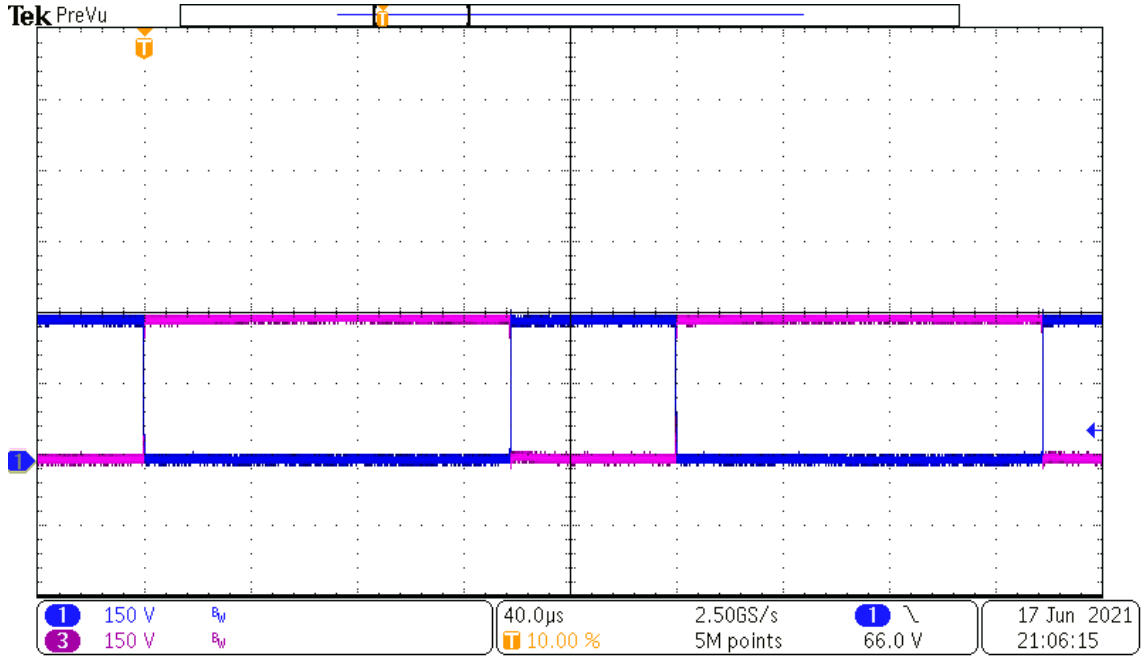
Şekil 58. Yükseltici çevirici için 25kW çıkış gücünde akım ve gerilim görüntüsü, 2 frekans çevrimi görünür halde.

Çalışmalar anma gücünün 4'te 1'i olacak şekilde yapılmıştır. Bu nedenle yarı iletkenlerde kayda değer bir ısınma gözlemlenmedi. Grafikler dikkatli incelendiğinde verimliliğinin 1'e çok yakın olduğu gözlemlenebilir. SiC yarı iletkenlerin verimliliklerinin çok yüksek olması ve kullanılan akım ve gerilim ölçüm ekipmanları ile yeteri kadar hassas bir ölçüm yapılamadığından dolayı verimlilik 1'e çok yakın çıkmıştır. Buna ek olarak yarı iletken ve kıyıcı diyot gerilimleri Şekil 59'da verilmiştir. Bu ölçüm 750V, 48A ortalama çıkış gerilim ve akım değerlerine alındı.

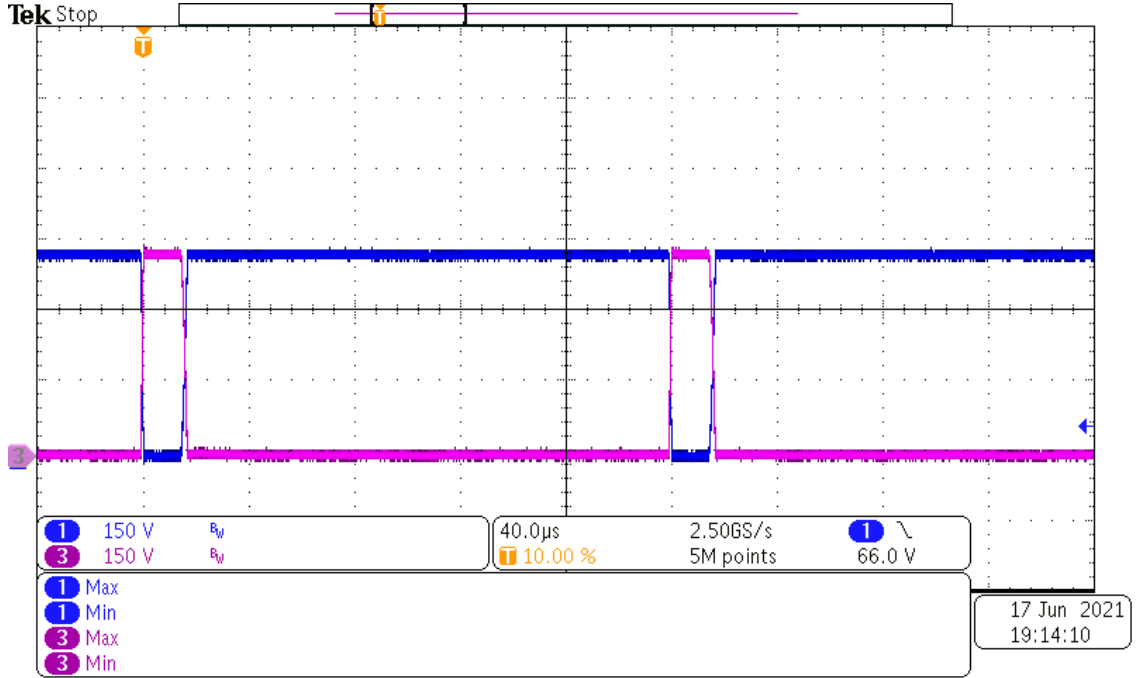


Şekil 59. Yarı iletken (pembe), kıyıcı diyot (koyu mavi) gerilimleri, endüktör akımı (açık mavi) ve çıkış akımı (yeşil).

Sistem çalışmasına ek olarak deneysel çalışmalarda görev çevrim limitlerinde çalışma koşulları incelendi. Yükseltici çevirici için maksimum görev çevrimi 0.7 olarak belirlenmiştir. Bu görev çevriminde alınan yarı iletken gerilimi (mavi) ve diyot gerilimi (pembe) Şekil 60’da verilmiştir. İndirici kıyıcı için maksimum görev çevrimi 0.9 olarak belirlenmiştir. Bu görev çevriminde alınan yarı iletken gerilimi (pembe) ve diyot gerilimi (mavi) Şekil 61’de verilmiştir.



Şekil 60. Yükseltici çevirici maksimum görev çevrimi için yarı iletken gerilimi (mavi) ve diyot gerilimi (pembe)



Şekil 61. İndirici kıyıcı maksimum görev çevrimi için yarı iletken gerilimi (pembe) ve diyot gerilimi (mavi)

6. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Güneş panellerinin güç üretim eğrileri anlık dış etmenlere bağlı olarak sürekli değişmektedir. Bu durum şebekede arz talep dengesini bozmakta ve bazı problemlere neden olmaktadır. Şebekede arz talep dengesinin korunması bu tarz elektrik üretim ekipmanlarının tahmini güç üretimine göre yapılmaktadır. Tahmini güç üretimi gerçek zamanlı güç üretimine yakın olursa şebeke kararlı ve stabil olarak çalışmaktadır. Öte yandan tahmini üretim ve gerçek üretim arasındaki fark fazla ise elektrik dağıtım şirketleri panel sahiplerinin elektrik satış fiyatını düşürebilmektedir. Bu nedenle tahmini üretim ve gerçek güç üretiminin birbirine yakın olması önemli konular arasındadır. Bu çalışmada ise güneş panellerinin gerçek zamanlı güç üretim eğrisi ve tahmini güç üretim eğrisi arasındaki farkın azalması için güç regülasyonu yapıldı. Hacettepe’de bulunan 48 Kwp Güneş Paneli Kaplamalı Otopark Projesinde tasarlanan fotovoltaik panellerin güç üretimi hem benzetim ortamında hem de laboratuvar tasarımı ile hareketli ortalama ile bulunan tahmini güç üretim eğrisine yaklaştırıldı. Güneş panellerinin geçmiş üretim verileri kullanılarak bir tahmini üretim eğrisi oluşturuldu. Gerçek zamanlı güç üretim eğrisi enerji depolama ve yönlendirme sistemi yardımı ile tahmini güç üretim eğrisine yaklaştırıldı. Böylelikle tahmin ve gerçek zamanlı güç üretim eğrisi arasındaki fark en aza indirildi. 12 kW maksimum panel çıkış gücü için aylık ortalama mutlak hatanın güç değeri olarak yaz aylarında 3’te 1’ine kadar indirilebildiği, öte yandan kış aylarında 5’te 1’ine indirilebildiği gözlemlendi. Yaz aylarında panellerin güç üretiminin fazla olması nedeniyle ortalama mutlak hatanın daha fazla olduğu gözlemlendi. Kök ortalama kare hatanın ise genel olarak yarıya düştüğü görüldü.

Enerji yönlendirme için SiC tabanlı yarı iletken kullanılarak bir yükseltici çevirici-indirici kıyıcı devresi tasarımı yapıldı. Gerçek zamanlı güç üretimi, tahmini güç üretiminden fazla olduğunda indirici kıyıcı devre yardımı ile güç üretiminin bir kısmı enerji depolama sistemine yönlendirildi. Tam tersi şekilde tahmini güç üretimi gerçek zamanlı güç üretiminden fazla olduğunda enerji depolama sisteminden enerji geri döndürülerek aradaki fark kapatıldı. Böylece tahmini üretim eğrisi ve gerçek zamanlı güç üretim eğrisi birbirine yaklaştırıldı. Literatürdeki tahmin algoritmaları incelendiğinde ortalama mutlak hatanın anma gücüne oranı %10-%20 arasında değiştiği ve fotovoltaik panellerin anma çıkış gücünün bu oranı çok etkilemediği görülmektedir. [14] Bu tezde anlatılan çalışmada

ise ortalama mutlak hatanın anma gücüne oranının enerji depolama ve yönlendirme yapılarak %2.5 kadar daha (haziran ayı örneği) azaltılabileceği gösterildi. Daha büyük enerji depolama ünitesi kullanılarak bu değer daha da arttırılabilir. Kayıp hesapları teorik olarak yapıldı. İndirici çeviricide 25kW çıkış gücü için verimlilik %99.2, yükseltici çeviricide ise verimlilik %99.5 olarak bulundu.

Enerji depolama sistemi olarak süper kapasitörler kullanıldı. Laboratuvar ortamında test edilen sistemde 4 adet süper kapasitör birbirine seri olarak bağlandı. Toplamda anma gerilimi 500V, 15.75F süper kapasitör bankası kullanılarak yapılan regülasyon incelendi. Laboratuvar çalışmalarında indirici kıyıcı devresi 25kW gücünde çalıştırıldı. Giriş gerilimi 3 faz tam dalga doğrultucunun çıkış gerilimi olan 560V değerindedir. Çıkış gerilimi ise 200V olarak seçildi. Yükseltici çevirici gene 25kW gücünde 300V giriş, 600V çıkış geriliminde çalıştırıldı. SiC yarı iletkenlerde bu güç değerlerinde kayda değer bir sıcaklık artışı gözlemlenmedi. Grafikler dikkatli incelendiğinde verimliliğinin yaklaşık 1 olduğundan bahsedildi. Bunun nedeni kullanılan akım ve gerilim ölçüm ekipmanları ile yeteri kadar hassas bir ölçüm yapılamamasıdır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda bir şönt direnci kullanılarak akım ölçümü yapılacaktır yetmezse bir kalorimetri kabı kullanılarak daha hassas bir ölçüm yapılabilir ve SiC verimlilik özellikleri daha doğru bir şekilde incelenebilir. Benzetim çalışmalarında ise daha fazla ve az sayıda süper kapasitör kullanılarak regülasyon eğrileri incelendi. 2 adet süper kapasitörden oluşan enerji depolama bankasının yeterince enerji depolayamadığı ve bu nedenle regülasyon işleminin de yetersiz olduğu gösterildi. Bu nedenle 4 adet süper kapasitörden oluşan enerji depolama bankası kullanıldı. Bu enerji depolama ünitesi kullanılarak yapılan günlük aylık ve yıllık bazda hatalar gösterildi. Kış günü örneği olan, 19 Ocak 2015 gününe ait güç üretim eğrisi için regülasyon yapıldığında ortalama mutlak hatanın 13.76 W'a kadar düştüğü gözlemlendi. Bu örnek incelendiğinde bazı noktalarda kapasitörlerin tamamen dolduğu ve bu nedenle regülasyon işleminin durdurulduğu gözlemlendi bu da ortalama mutlak hatanın nispeten yüksek olmasına neden oldu. Bu regülasyon işlemi sırasında %58'lik zaman diliminde yükseltici çevirici çalışırken, kalan %42'lik zaman diliminde indirici kıyıcı çalıştığı gözlemlendi. Yaz günü örneği olan 13 Ağustos 2015 gününe ait güç üretim eğrisi regüle edildiğinde ise ortalama mutlak hata 5.87W değerinde kaldığı görüldü. Yaz günü örneği regülasyonu yapılırken kapasitörlerin gün boyunca hiçbir zaman tamamen dolmadığı gözlemlendi. Gene regülasyon süresince %47.7'lik zaman

diliminde yükseltici çevirici çalışırken, kalan %52.3'lük zaman diliminde indirici kıyıcı çalıştığı görüldü. Yaz günü örneğinde süper kapasitörlerde tamamen dolma gözlemlenmediği için ortalama mutlak nispeten düşük ve 5.87W olarak bulundu. Aylık güç üretim regülasyonları incelendiğinde yaz aylarında maksimum güç üretimi fazla olduğu için mutlak hata ve ortalama mutlak hata değerlerinin daha yüksek olduğu görüldü. Örneğin ağustos ayında ortalama mutlak hata değeri 186W değerindeyken aralık ayında 62W değerlerinde kaldığı görüldü.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda tahmini güç üretim eğrisi oluşturulacak ve güneş paneli entegrasyonu yapılacaktır.

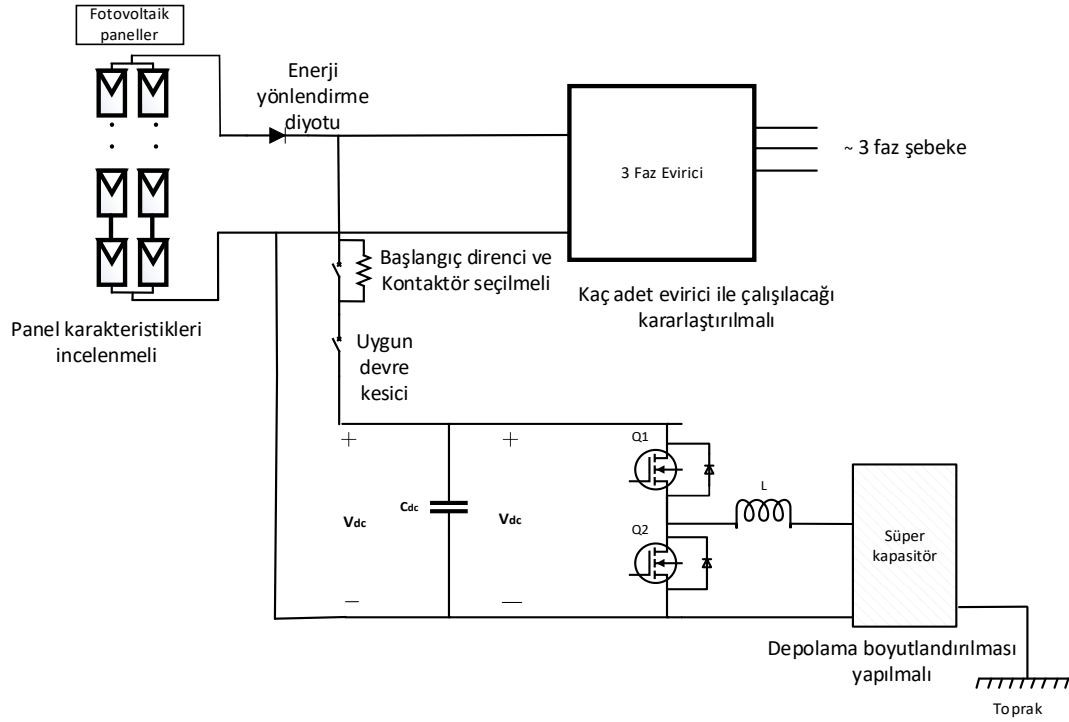
6.1 Sistemin Güneş Panelleri Çıkışına Entegrasyonu

Düşünülen sistemin güneş panelleri ile aynı çıkışa bağlanması bu tez kapsamına alınmadı. Bunun nedeni güneş panellerinin çıkışında yaşanabilecek olası problemler ve tahmin eğrisinin geçmiş üretim eğrilerinin hareketli ortalaması alınarak oluşturulması olduğu söylenebilir. Başka bir tez kapsamında tahmin eğrileri yapay zekâ öğrenme algoritmaları kullanılarak oluşturulacaktır. Sonrasında tahmin eğrileri iyileştirilip test edilecek ve bu eğriler ile gerçek üretim eğrileri arasındaki hata makul seviyelere düştüğünde bu tez kapsamında geliştirilen sistemin güneş panellerine entegrasyonu kısmına geçilecektir. Güneş panellerine bağlanmak için yapılacaklar kısaca şu şekilde sıralanabilir.

- Panel karakteristikleri incelenip maksimum akım ve gerilim değerleri bulunabilir. Bu değerlere göre uygun devre koruma ekipmanları seçilmesi gerekir. Yazılımda kapalı döngü kontrolleri bu değerlere göre ayarlanabilir.
- Panellerin çıkış gerilim ve akım verileri toplanıp değişim aralığı incelenmelidir. Buna göre yeni bir anahtarlama frekansı seçilmelidir.
- Yükseltici çevirici operasyon yapılırken güneş panellerine enerji göndermemek için panel çıkışı gerekirse uygun bir diyot yardımı ile korunmalıdır.
- İndirici kıyıcı operasyonu yapılırken yüksek başlangıç akımlarını önlemek için bir tedbir alınmalıdır.
- Uygun topraklama noktası seçilmeli ve uygun bir topraklama hattı kurulmalıdır.

- Akım ve gerilim okuma algoritmaları iyileştirilerek daha hassas bir ölçüm alınması gerekmektedir.
- Kullanılacak evirici sayısına göre enerji depolama bankası yeniden boyutlandırılabilir.

Entegrasyon sırasında yaşanacak problemlerin yukarıdakilerle sınırlı olmayacağı açıktır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda güneş panellerinin çıkışında yaşanabilecek olası problemler daha detaylı tespit edilecektir. Daha sonrasında güneş panellerine bağlanmadan tahmin algoritmaları ile birlikte kurulan sistem test edilecektir. En son aşamada güneş paneli bağlantıları yapıp test yapılacak ve sonuçlar gözlenebilecektir. Bağlantı sırasında düşünülen sistemin elektriksel şeması Şekil 62’de verilmiştir.



Şekil 62. Fotovoltaik panel çıkışına bağlantı şeması

KAYNAKLAR

- [1] T. L. Gibson and N. A. Kelly, “Solar photovoltaic charging of lithium-ion batteries,” *J. Power Sources*, vol. 195, no. 12, pp. 3928–3932, 2010.
- [2] P. Manimekalai, R. Harikumar, and S. Raghavan, “An Overview of Batteries for Photovoltaic (PV) Systems,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 82, no. 12, pp. 28–32, 2013, doi: 10.5120/14170-2299.
- [3] Maxwell Technologies, “125 V Heavy Transportation Supercapacitor module,” *Online Publ.*, pp. 1–6, 2019, [Online]. Available: www.maxwell.com.
- [4] B. K. Kim, S. Sy, A. Yu, and J. Zhang, “Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Conversion,” *Handb. Clean Energy Syst.*, pp. 1–25, 2015, doi: 10.1002/9781118991978.hces112.
- [5] M. E. Glavin, P. K. W. Chan, S. Armstrong, and W. G. Hurley, “A stand-alone photovoltaic supercapacitor battery hybrid energy storage system,” *2008 13th Int. Power Electron. Motion Control Conf. EPE-PEMC 2008*, pp. 1688–1695, 2008, doi: 10.1109/EPEPEMC.2008.4635510.
- [6] K. Sahay and B. Dwivedi, “Supercapacitors energy storage system for power quality improvement: An overview,” *J. Electr. Syst.*, vol. 5, no. 4, 2009.
- [7] D. Henner and REN21, “Ren21,” 2020.
[https://abdn.pure.elsevier.com/en/en/researchoutput/ren21\(5d1212f6-d863-45f7-8979-5f68a61e380e\).html](https://abdn.pure.elsevier.com/en/en/researchoutput/ren21(5d1212f6-d863-45f7-8979-5f68a61e380e).html) (accessed May 01, 2021).
- [8] J. Svarc, “Most Efficient Solar Panels 2021.”
<https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels> (accessed May 01, 2021).
- [9] J. Zapata, J. Vandewalle, and W. D’Haeseleer, “A comparative study of imbalance reduction strategies for virtual power plant operation,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 71, no. 2, pp. 847–857, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.12.026.
- [10] B. S. Abdulraheem and C. K. Gan, “Power system frequency stability and control: Survey,” *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 11, no. 8, pp. 5688–5695, 2016.

- [11] S. Rehman, L. M. Al-Hadhrami, and M. M. Alam, "Pumped hydro energy storage system: A technological review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 586–598, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.12.040.
- [12] Y. Hou, R. Vidu, and P. Stroeve, "Solar energy storage methods," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 50, no. 15, pp. 8954–8964, 2011, doi: 10.1021/ie2003413.
- [13] H. Akbari *et al.*, "Efficient energy storage technologies for photovoltaic systems," *Sol. Energy*, vol. 192, no. May 2018, pp. 144–168, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2018.03.052.
- [14] S. Alessandrini, L. Delle Monache, S. Sperati, and G. Cervone, "An analog ensemble for short-term probabilistic solar power forecast," *Appl. Energy*, vol. 157, pp. 95–110, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.08.011.
- [15] P. Bacher, H. Madsen, and H. A. Nielsen, "Online short-term solar power forecasting," *Sol. Energy*, vol. 83, no. 10, pp. 1772–1783, 2009, doi: 10.1016/j.solener.2009.05.016.
- [16] D. W. van der Meer, J. Widén, and J. Munkhammar, "Review on probabilistic forecasting of photovoltaic power production and electricity consumption," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. June 2017, pp. 1484–1512, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.212.
- [17] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003.
- [18] P. Friedrichs, "High-performance SiC MOSFET technology for power electronics design," *Power Des.*, 2019.
- [19] B. Agrawal, M. Freindl, B. Bilgin, and A. Emadi, "Estimating switching losses for SiC MOSFETs with non-flat miller plateau region," *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2017. .
- [20] Cree, "CAS300M17BM2 (Datasheet)," 2018. .
- [21] P. Ning, T. Yuan, Y. Kang, C. Han, and L. Li, "Review of Si IGBT and SiC MOSFET based on hybrid switch," *Chinese J. Electr. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 20–29, 2019, doi: 10.23919/cjee.2019.000017.
- [22] E. E. Vladu and T. L. Dragomir, "Digital PI Controller Equations," *Ist Rom. Jt. Symp. Appl. Comput. Intell.*, no. March, pp. 1–10, 2004.

Ekler

Ek 1. Kod

```
clear all,close all
%% wqe
close all,clear all

inv1=importdata('INVERTER_1_onlyp.csv');
date1=inv1.textdata;
date1=date1(:,1);
date1=date1(2:size(date1),1);
date1=datetime(date1,'dd.mm.yyyy HH:MM');
inv1=inv1.data;
power1=inv1(:,5);
date1=datestr(date1);
i=1;
b=1;
for d=1:length(date1)-1
    if
        ((date1(d,1)==date1(d+1,1))&&(date1(d,2)==date1(d+1,2)))&&((date1(d,3)==date1(d+
1,3)) &&(date1(d,4)==date1(d+1,4)))

        power(b,i)=power1(d,1);
        b=b+1;

    else

        power(b,i)=power1(d,1);
        date(i,:)=date1(d,:);      % corresponding dates
        date(385,:)=date1(26088,:); % since last element is not operated

        i=i+1;
        b=1;

    end
end

a=size(power);
for i=1:a(1,2)
    average(:,i)=movmean(power(:,i),3);

    average(:,i)=movmean(power(:,i),5);

end
% shapedp=reshape(power,1,a(1,1)*a(1,2));
% % figure
% % plot(shapedp,'blue');
% % hold on
% shapeda=reshape(average,1,a(1,1)*a(1,2));
```

```

% plot(shapeda,'green');
%% solar formula
% area = 0.72;
% eff = 0.1041;
% n=208;
% enlem=40;
% beta=11;
% Isc=1000;
% delta=(23.45*sind(360*(n-80)/365));
% pmax=(1000)/secd(enlem-delta);
% t=5:1:17;
% w=15*(12-t);
% cosalfa = (sind(delta)*sind(enlem-beta))+(cosd(delta)*cosd(enlem-beta)*cosd(w));
% p=pmax*cosalfa;
% irr=Isc*[1+0.033*cosd((360*n)/365)]*cosalfa;
% irr_p = irr*area*eff*648/4;
% plot(t,p)
% plot(t,irr_p)
% hold on
% axis([4 20 0 1000])
%% resize solar formula
%
% irr_p1=[1,length(t)*3600];
% c=0;
% for i=1:length(t)
%   if i< length(t)
%     dif=irr_p(i+1)-irr_p(i);
%     end
%     step1=dif/3600;
%     for b=1:3600
%       irr_p1(b+c)=irr_p(i)+b*step1;
%     end
%     c=c+3600
%   end

%% qw day

samplepower=power(:,111); %first one is 269 %72 %!172 %303 %167
samplepower=samplepower';
sampleav=average(:,111); %first one is 269 %72 %!172 %303 %167
sampleav=sampleav';
figure
plot(1:88,samplepower);
hold on
plot(1:88,sampleav);
i=1;

mael=samplepower-sampleav;
mael=abs(mael);

```

```

rmse1=sum(mae1.^2)/88;
mae1=sum(mae1)/88;

rmse1=sqrt(rmse1);
rmse1=rmse1*100/max(samplepower);
mae1=mae1*100/max(samplepower);
%% for month
an=ones(1,22);
sa=1;
for i=14:384
    dir=date(i,4);
    dir2=date(i,6);
    if date(i+1,4)==dir && date(i+1,6)==dir2
        an(sa)=an(sa)+1;
    else
        sa=sa+1;
    end
end

m1=power(:,14:14+an(1)-1);
m2=power(:,14+an(1):14+an(1)+an(2)-1);
m3=power(:,14+sum(an(1:2)):14+sum(an(1:3))-1);
m4=power(:,14+sum(an(1:3)):14+sum(an(1:4))-1);
m5=power(:,14+sum(an(1:4)):14+sum(an(1:5))-1);
m6=power(:,14+sum(an(1:5)):14+sum(an(1:6))-1);
m7=power(:,14+sum(an(1:6)):14+sum(an(1:7))-1);
m8=power(:,14+sum(an(1:7)):14+sum(an(1:8))-1);
m9=power(:,14+sum(an(1:8)):14+sum(an(1:9))-1);
m10=power(:,14+sum(an(1:11)):14+sum(an(1:12))-1);
m11=power(:,14+sum(an(1:12)):14+sum(an(1:13))-1);
m12=power(:,14+sum(an(1:13)):14+sum(an(1:14))-1);

m1a=average(:,14:14+an(1)-1);
m2a=average(:,14+an(1):14+an(1)+an(2)-1);
m3a=average(:,14+sum(an(1:2)):14+sum(an(1:3))-1);
m4a=average(:,14+sum(an(1:3)):14+sum(an(1:4))-1);
m5a=average(:,14+sum(an(1:4)):14+sum(an(1:5))-1);
m6a=average(:,14+sum(an(1:5)):14+sum(an(1:6))-1);
m7a=average(:,14+sum(an(1:6)):14+sum(an(1:7))-1);
m8a=average(:,14+sum(an(1:7)):14+sum(an(1:8))-1);
m9a=average(:,14+sum(an(1:8)):14+sum(an(1:9))-1);
m10a=average(:,14+sum(an(1:11)):14+sum(an(1:12))-1);
m11a=average(:,14+sum(an(1:12)):14+sum(an(1:13))-1);
m12a=average(:,14+sum(an(1:13)):14+sum(an(1:14))-1);

m1s=reshape(m1,1,size(m1,1)*size(m1,2));
m2s=reshape(m2,1,size(m2,1)*size(m2,2));
m3s=reshape(m3,1,size(m3,1)*size(m3,2));
m4s=reshape(m4,1,size(m4,1)*size(m4,2));

```

```

m5s=reshape(m5,1,size(m5,1)*size(m5,2));
m6s=reshape(m6,1,size(m6,1)*size(m6,2));
m7s=reshape(m7,1,size(m7,1)*size(m7,2));
m8s=reshape(m8,1,size(m8,1)*size(m8,2));
m9s=reshape(m9,1,size(m9,1)*size(m9,2));
m10s=reshape(m10,1,size(m10,1)*size(m10,2));
m11s=reshape(m11,1,size(m11,1)*size(m11,2));
m12s=reshape(m12,1,size(m12,1)*size(m12,2));

```

```

m1as=reshape(m1a,1,size(m1a,1)*size(m1a,2));
m2as=reshape(m2a,1,size(m2a,1)*size(m2a,2));
m3as=reshape(m3a,1,size(m3a,1)*size(m3a,2));
m4as=reshape(m4a,1,size(m4a,1)*size(m4a,2));
m5as=reshape(m5a,1,size(m5a,1)*size(m5a,2));
m6as=reshape(m6a,1,size(m6a,1)*size(m6a,2));
m7as=reshape(m7a,1,size(m7a,1)*size(m7a,2));
m8as=reshape(m8a,1,size(m8a,1)*size(m8a,2));
m9as=reshape(m9a,1,size(m9a,1)*size(m9a,2));
m10as=reshape(m10a,1,size(m10a,1)*size(m10a,2));
m11as=reshape(m11a,1,size(m11a,1)*size(m11a,2));
m12as=reshape(m12a,1,size(m12a,1)*size(m12a,2));

```

```

%% ef month
fu=m12s;
samplem1=[1,size(fu,2)*60];
c=0;
for i=1:size(fu,2)
    if i< size(fu,2)
        dif=fu(i+1)-fu(i);
        end
        step1=dif/60;
        for b=1:60
            samplem1(b+c)=fu(i)+b*step1;
            end
            c=c+60;
        end
du=m12as;
samplem1as=[1,size(du,2)*60];
c=0;
for i=1:size(du,2)
    if i< size(du,2)
        dif=du(i+1)-du(i);
        end
        step1=dif/60;
        for b=1:60
            samplem1as(b+c)=du(i)+b*step1;
            end
            c=c+60;
        end
end

```

```

%% ef day
sampleav1=[1,88*600];
c=0;
for i=1:88
    if i< 88
        dif=sampleav(i+1)-sampleav(i);
    end
    step1=dif/600;
    for b=1:600
        sampleav1(b+c)=sampleav(i)+b*step1;
    end
    c=c+600;
end

samplepower1=[1,88*600];
c=0;
for i=1:88
    if i< 88
        dif=samplepower(i+1)-samplepower(i);
    end
    step1=dif/600;
    for b=1:600
        samplepower1(b+c)=samplepower(i)+b*step1;
    end
    c=c+600;
end

%% ef day2
sampleav1=[1,88*60];
c=0;
for i=1:88
    if i< 88
        dif=sampleav(i+1)-sampleav(i);
    end
    step1=dif/60;
    for b=1:60
        sampleav1(b+c)=sampleav(i)+b*step1;
    end
    c=c+60;
end

samplepower1=[1,88*60];
c=0;
for i=1:88
    if i< 88
        dif=samplepower(i+1)-samplepower(i);
    end

```



```

step1=dif/60;
for b=1:60
samplepower1(b+c)=samplepower(i)+b*step1;
end
c=c+60;
end
%% plots?
% figure
% % plot(1:length(irr_p1),irr_p1,'green');
% % hold on
% plot(1:length(samplepower1),samplepower1);
%% irr_p1
% irr_p1=irr_p1*9/10; %%????
%
%
%
% for i=1:length(irr_p1)
%   if irr_p1(i)<=0
%     irr_p1(i)=0;
%   end
% end
% irr=zeros(1,52800);
% irr(1,1:length(irr_p1))=irr_p1(1,:);
% figure
% plot(1:length(irr),irr,'green');
% hold on
% plot(1:length(samplepower1),samplepower1);

%% for average
wave1.signals.values=samplepower1';
wave1.signals.dimensions=1;
wave1.time=[];

wave2.signals.values=sampleav1';
wave2.signals.dimensions=1;

wave2.time=[1:52800];

%% for equation
wave1.signals.values=samplepower1';
wave1.signals.dimensions=1;
wave1.time=[];

wave2.signals.values=sampleav1';
wave2.signals.dimensions=1;
wave2.time=[1:52800];

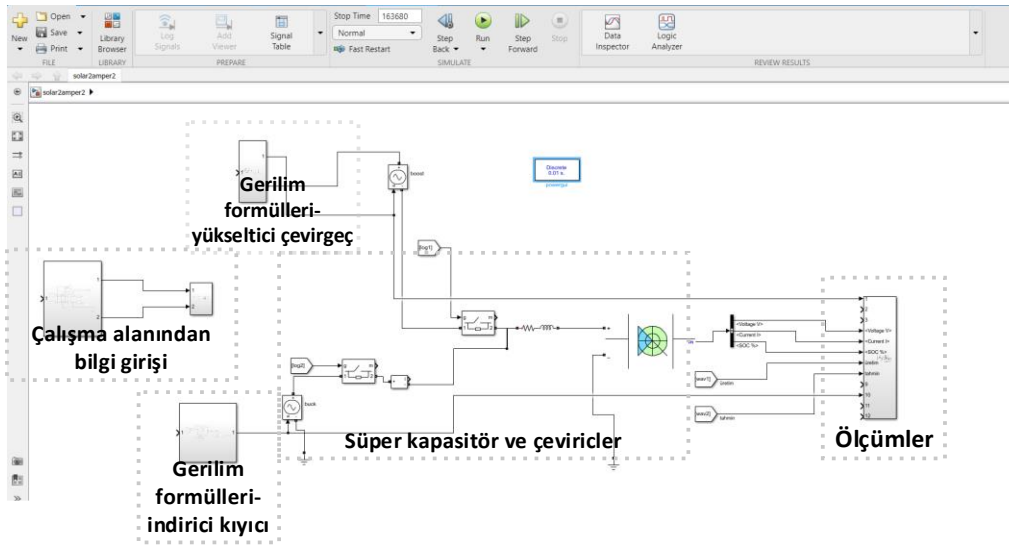
%% for month

```

```
wave1.signals.values=samplm1';  
wave1.signals.dimensions=1;  
wave1.time=[];
```

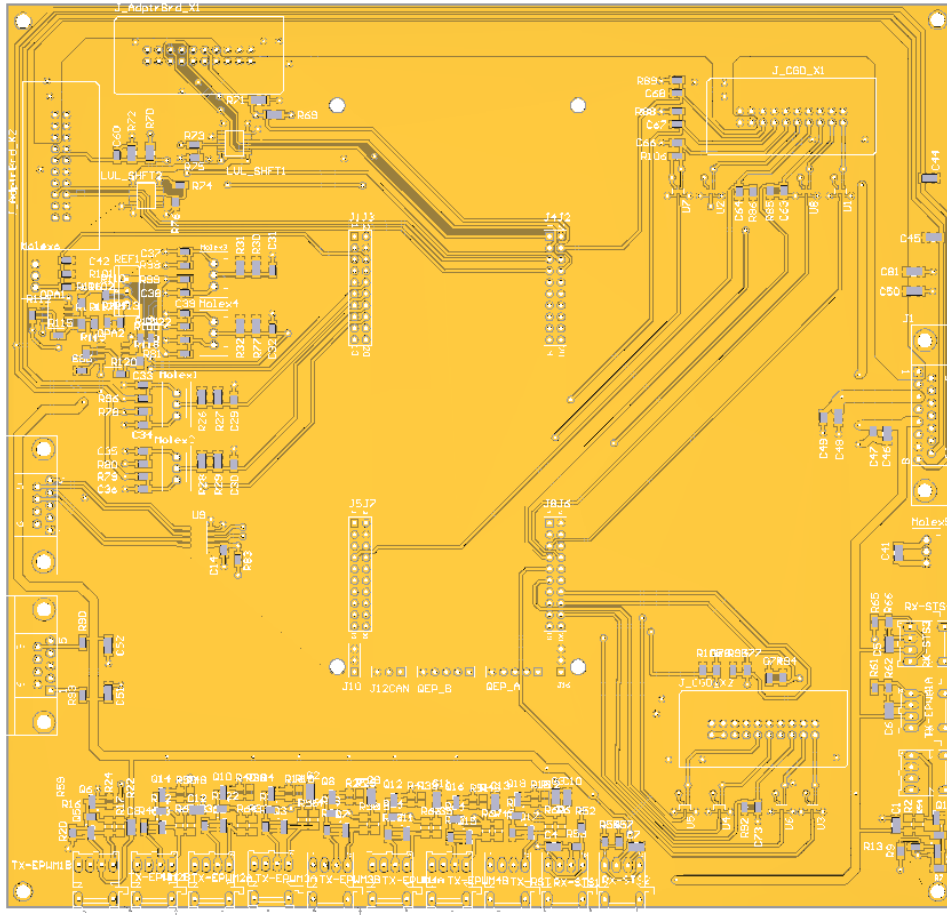
```
wave2.signals.values=samplm1 as';  
wave2.signals.dimensions=1;  
wave2.time=[1:size(fu,2)*60];
```

Ek 2. Benzetim şeması

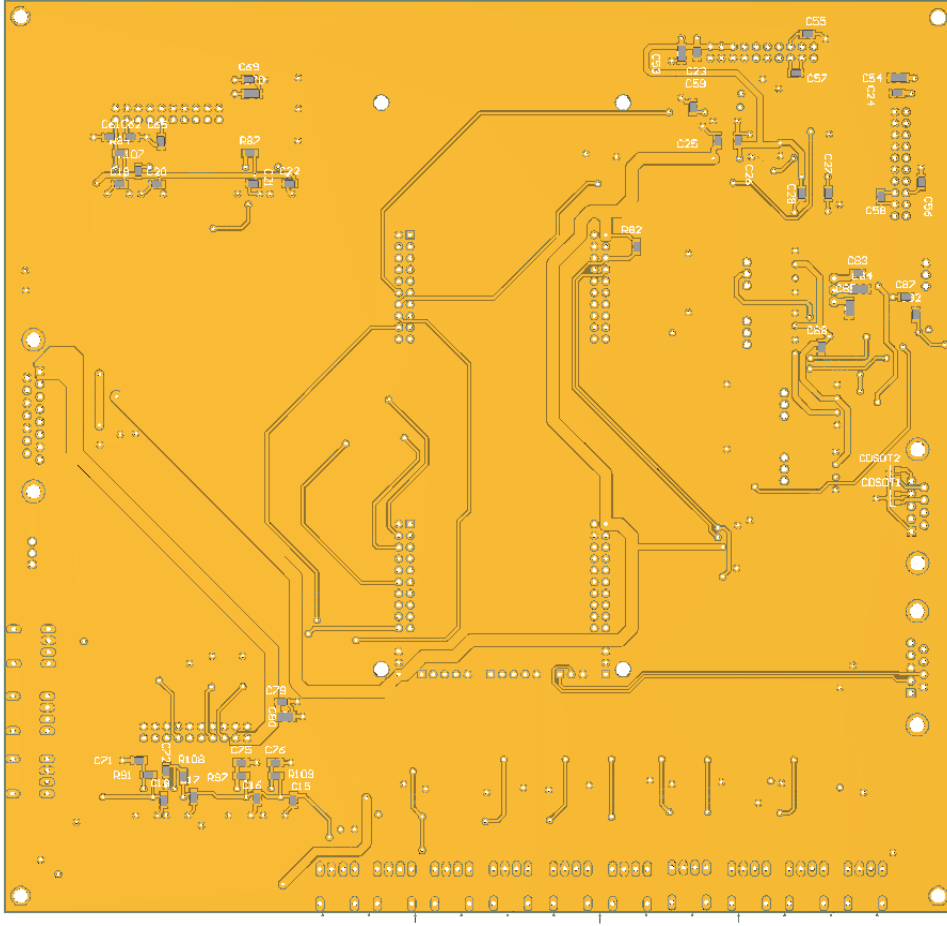


Şekil 63. Benzetim devre şeması

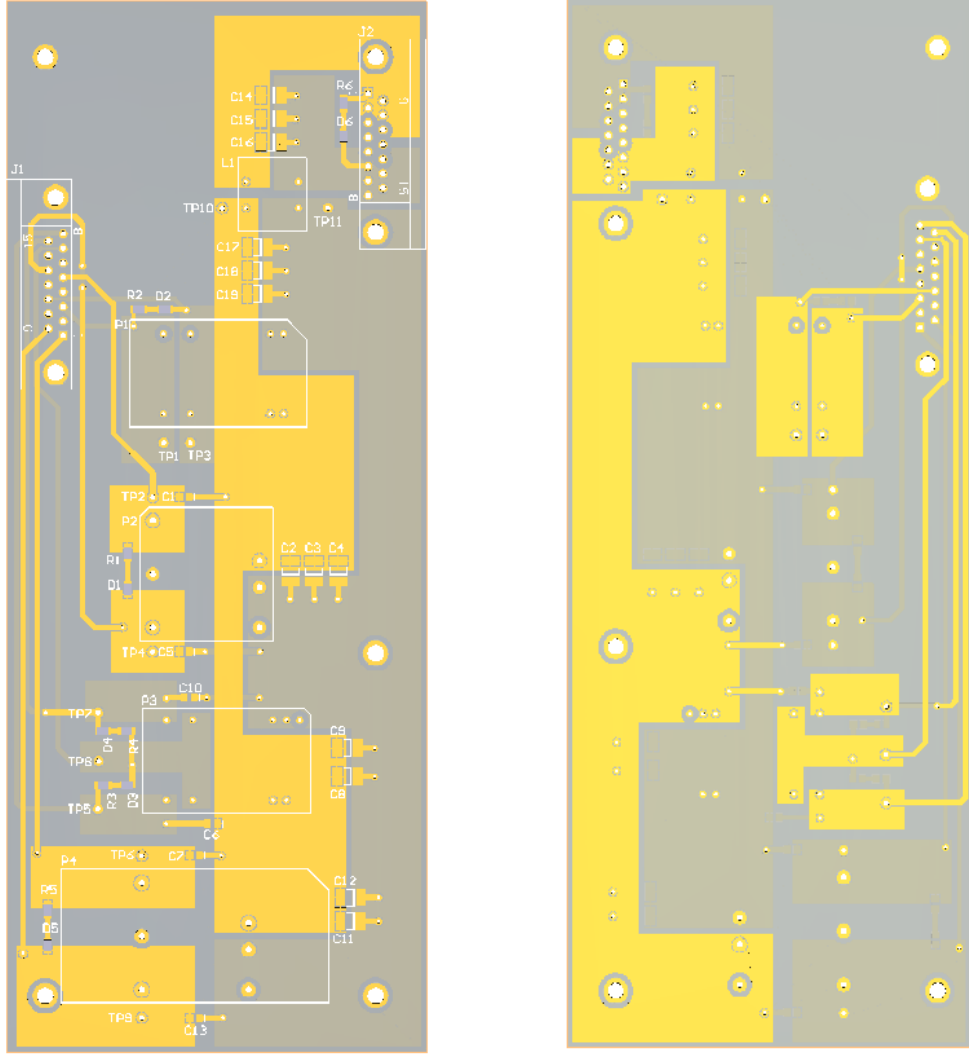
Ek 3. Baskı devre kartı



Şekil 64. Ana kart ön yüzey, üst görünüm



Şekil 65. Ana kart arka yüzey, üst görünüm



Şekil 66. Güç kartının ön ve arka yüzeyi, üst görünüm.

Ek 4. Süper Kapasitör

DATASHEET 125V HEAVY TRANSPORTATION MODULE

FEATURES AND BENEFITS*

- Up to 1,000,000 duty cycles or 10 year DC life
- 125V DC working voltage
- Active cell balancing
- Temperature and voltage monitoring
- CAN bus digital monitoring and communications
- High power density

TYPICAL APPLICATIONS

- Buses
- Electric trains and trolleys
- Heavy duty transportation
- Cranes, RTGS
- Utility vehicles
- Mining equipment



PRODUCT SPECIFICATIONS

ELECTRICAL	BMOD0063 P125 B08
Rated Capacitance ¹	63 F
Minimum Capacitance, initial ¹	63 F
Maximum Capacitance, initial ¹	76 F
Maximum ESR _{DC} initial ¹	18 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR _{DC} ¹	100 A
Rated Voltage	125 V
Absolute Maximum Voltage ²	136 V
Absolute Maximum Current	1900 A
Leakage Current at 25°C, maximum ³	10 mA
Maximum Series Voltage	1500 V
Capacitance of Individual Cells ¹	3000 F
Maximum Stored Energy, Individual Cell ¹	3.0 Wh
Number of Cells	48

TEMPERATURE

Operating temperature range (Cell case temperature)	
Minimum	-40°C
Maximum	65°C
Storage temperature range (Stored uncharged)	
Minimum	-40°C
Maximum	70°C

*Results may vary. Additional terms and conditions, including the limited warranty, apply at the time of purchase. See the warranty details and enclosed information for applicable operating and use requirements.

Page 1 Document number: 1014696.7 maxwell.com



Şekil 67. Süper kapasitör teknik özellikleri

Ek 5. Mikroişlemci



TMS320F28379D, TMS320F28379D-Q1, TMS320F28378D, TMS320F28377D
TMS320F28377D-Q1, TMS320F28376D, TMS320F28375D, TMS320F28374D
SPRS880D – DECEMBER 2013 – REVISED FEBRUARY 2021

TMS320F2837xD Dual-Core Microcontrollers

1 Features

- Dual-core architecture
 - Two TMS320C28x 32-bit CPUs
 - 200 MHz
 - IEEE 754 single-precision Floating-Point Unit (FPU)
 - Trigonometric Math Unit (TMU)
 - Viterbi/Complex Math Unit (VCU-II)
- Two programmable Control Law Accelerators (CLAs)
 - 200 MHz
 - IEEE 754 single-precision floating-point instructions
 - Executes code independently of main CPU
- On-chip memory
 - 512KB (256KW) or 1MB (512KW) of flash (ECC-protected)
 - 172KB (86KW) or 204KB (102KW) of RAM (ECC-protected or parity-protected)
 - Dual-zone security supporting third-party development
 - Unique identification number
- Clock and system control
 - Two internal zero-pin 10-MHz oscillators
 - On-chip crystal oscillator
 - Windowed watchdog timer module
 - Missing clock detection circuitry
- 1.2-V core, 3.3-V I/O design
- System peripherals
 - Two External Memory Interfaces (EMIFs) with ASRAM and SDRAM support
 - Dual 6-channel Direct Memory Access (DMA) controllers
 - Up to 169 individually programmable, multiplexed General-Purpose Input/Output (GPIO) pins with input filtering
 - Expanded Peripheral Interrupt controller (ePIE)
 - Multiple Low-Power Mode (LPM) support with external wakeup
- Communications peripherals
 - USB 2.0 (MAC + PHY)
 - Support for 12-pin 3.3 V-compatible Universal Parallel Port (uPP) interface
 - Two Controller Area Network (CAN) modules (pin-bootable)
 - Three high-speed (up to 50-MHz) SPI ports (pin-bootable)
 - Two Multichannel Buffered Serial Ports (McBSPs)
 - Four Serial Communications Interfaces (SCI/UART) (pin-bootable)
 - Two I2C interfaces (pin-bootable)
- Analog subsystem
 - Up to four Analog-to-Digital Converters (ADCs)
 - 16-bit mode
 - 1.1 MSPS each (up to 4.4-MSPS system throughput)
 - Differential inputs
 - Up to 12 external channels
 - 12-bit mode
 - 3.5 MSPS each (up to 14-MSPS system throughput)
 - Single-ended inputs
 - Up to 24 external channels
 - Single Sample-and-Hold (S/H) on each ADC
 - Hardware-integrated post-processing of ADC conversions
 - Saturating offset calibration
 - Error from setpoint calculation
 - High, low, and zero-crossing compare, with interrupt capability
 - Trigger-to-sample delay capture
 - Eight windowed comparators with 12-bit Digital-to-Analog Converter (DAC) references
 - Three 12-bit buffered DAC outputs
- Enhanced control peripherals
 - 24 Pulse Width Modulator (PWM) channels with enhanced features
 - 16 High-Resolution Pulse Width Modulator (HRPWM) channels
 - High resolution on both A and B channels of 8 PWM modules
 - Dead-band support (on both standard and high resolution)
 - Six Enhanced Capture (eCAP) modules
 - Three Enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP) modules
 - Eight Sigma-Delta Filter Module (SDFM) input channels, 2 parallel filters per channel
 - Standard SDFM data filtering



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

Şekil 68. Mikroişlemci teknik özellikleri

Ek 6. Akım Sensörü



Current Transducer LF 510-S

$I_{PN} = 500 \text{ A}$

For the electronic measurement of current: DC, AC, pulsed..., with galvanic separation between the primary and secondary circuit.



CE cRU us RoHS



Features

- Bipolar and insulated current measurement
- Current output
- Closed loop (compensated) current transducer
- Panel mounting.

Advantages

- High accuracy
- Very low offset drift over temperature.

Applications

- Windmill inverters
- Test and measurement
- AC variable speed and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

Standards

- IEC 61010-1: 2010
- IEC 61800-5-1: 2007
- IEC 62109-1: 2010
- UL 508: 2013.

Application Domain

- Industrial.

N° 97.J9.50.000.0

15March2018/Version 8

LEM reserves the right to carry out modifications on its transducers, in order to improve them, without prior notice

Page 1/7

www.lem.com

Şekil 69. Akım Sensörü teknik özellikleri

Ek 7. Gerilim sensörü

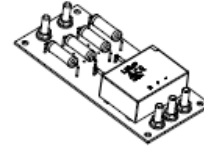


Voltage Transducer LV 25-1000/SP3

For the electronic measurement of voltages: DC, AC, pulsed..., with galvanic separation between the primary circuit and the secondary circuit.



$$U_{PN} = 1000 \text{ V}$$



Electrical data

U_{PN}	Primary nominal RMS voltage	1000	V
U_{PM}	Primary voltage, measuring range	0 ... ±1500	V
I_{PN}	Primary nominal RMS current	6.6	mA
R_M	Measuring resistance with ±24 V	$R_{M \min}$ $R_{M \max}$ 100 350 100 215	Ω
I_{SN}	Secondary nominal RMS current	50	mA
N_p/N_s	Turns ratio	1000 V : 50 mA	
U_C	Supply voltage (±5 %)	±24	V
I_C	Current consumption	20 (@ ±24 V) + I_S	mA

Accuracy - Dynamic performance data

ϵ_{tot}	Total error @ $U_{PN}, T_A = 25^\circ\text{C}$	±0.8	%
ϵ_L	Linearity error	< 0.2	%
I_D	Offset current @ $U_P = 0, T_A = 25^\circ\text{C}$	Typ Max ±0.20 ±0.20	mA
$I_{D,T}$	Temperature variation of I_D	-40 °C ... +85 °C	±0.20 ±0.80
t_{D90}	Delay time to 90 % of U_{PN}	< 19	us

General data

T_A	Ambient operating temperature	-40 ... +85	°C
$T_{A \text{st}}$	Ambient storage temperature	-45 ... +90	°C
P_P	Total primary power loss	8.3	W
R_p	Resistance of primary @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	153	k Ω
R_s	Resistance of secondary winding @ $T_A = 85^\circ\text{C}$	81	Ω
m	Mass	110	g
	Standards	EN 50155: 2007 UL 508: 2010	

Features

- Closed loop (compensated) voltage transducer using the Hall effect
- Insulating plastic case recognized according to UL 94-V0
- Primary resistor and transducer mounted on printed circuit board 128 x 60 mm.

Special features

- $U_C = \pm 24$ (±5 %) V
- $N_p/N_s = 1000 \text{ V} : 50 \text{ mA}$
- $T_A = -40^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$
- Coated
- Connection to primary and secondary by stud M5
- Railway equipment.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- High immunity to external interference.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Power supplies for welding applications.

Application Domain

- Railway (fixed installations and onboard).

N° 97.28.60.003.0

9June2020/version 7

LEM reserves the right to carry out modifications on its transducers, in order to improve them, without prior notice


LEM International SA
Chemin des Aulx 8
1228 PLAN-LES-OUATES Switzerland
www.lem.com

Page 1/3

Şekil 70. Gerilim sensörü teknik özellikleri

Ek 8. SiC Yarı İletken

Datasheet: CAS300M17BM2, Rev. B



CAS300M17BM2

1.7kV, 8.0 mΩ All-Silicon Carbide Half-Bridge Module

C2M MOSFET and Z-Rec™ Diode

Features

- Ultra Low Loss
- High-Frequency Operation
- Zero Reverse Recovery Current from Diode
- Zero Turn-off Tail Current from MOSFET
- Normally-off, Fail-safe Device Operation
- Ease of Paralleling
- Copper Baseplate and Aluminum Nitride Insulator

System Benefits


- Enables Compact and Lightweight Systems
- High Efficiency Operation
- Mitigates Over-voltage Protection
- Reduced Thermal Requirements
- Reduced System Cost

Applications

- HF Resonant Converters/Inverters
- Solar and Wind Inverters
- UPS and SMPS
- Motor Drive
- Traction

V_{DS}	1.7 kV
$E_{sw, Total @ 300A, 150 °C}$	23 mJ
$R_{DS(on)}$	8.0 mΩ

Package 62mm x 106mm x 30mm



Part Number	Package	Marking
CAS300M17BM2	Half-Bridge Module	CAS300M17BM2

Maximum Ratings ($T_c = 25 °C$ unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Value	Unit	Test Conditions	Notes
V_{DSmax}	Drain - Source Voltage	1.7	kV		
V_{GSmax}	Gate - Source Voltage	-10/+25	V	Absolute maximum values	
V_{GSop}	Gate - Source Voltage	-5/20	V	Recommended operational values	
I_D	Continuous MOSFET Drain Current	325	A	$V_{GS} = 20 V, T_c = 25 °C$	Fig. 26
		225		$V_{GS} = 20 V, T_c = 90 °C$	
$I_{D(pulse)}$	Pulsed Drain Current	900	A	Pulse width t_p limited by $T_{j(max)}$	
I_F	Continuous Diode Forward Current	556	A	$V_{GS} = -5 V, T_c = 25 °C$	
		353		$V_{GS} = -5 V, T_c = 90 °C$	
T_{jmax}	Junction Temperature	-40 to +150	°C		
T_c, T_{STG}	Case and Storage Temperature Range	-40 to +125	°C		
V_{isol}	Case Isolation Voltage	5.0	kV	AC, 50 Hz, 1 min	
L_{stray}	Stray Inductance	15	nH	Measured between terminals 2 and 3	
P_D	Power Dissipation	1760	W	$T_c = 25 °C, T_j = 150 °C$	Fig. 25]

Subject to change without notice.
www.cree.com

1

Şekil 71. Yarı iletken teknik özellikleri