



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE BATARYA
VE SÜPER KAPASİTÖRÜN HİBRİT
KULLANIMININ İNCELENMESİ**

Yvon Gotran KOYİ BOUKİLA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Ağustos - 2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Yvon Gotran KOYİ BOUKİLA tarafından hazırlanan “**Fotovoltaik Sistemlerde Batarya Ve Süper Kapasitörün Hibrit Kullanımının İncelenmesi**” adlı tez çalışması 07/08/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Dr.Öğr.Üyesi Kadir SABANCI

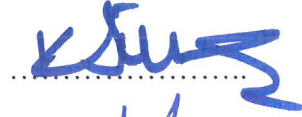
Danışman

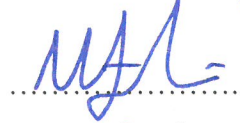
Dr.Öğr.Üyesi Muhammed Fahri ÜNLERŞEN

Üye

Dr.Öğr.Üyesi Mümtaz MUTLUER

İmza







Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. S. Savaş DURDURAN
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Yvon Gotran KOYIBOUKILA

Tarih: 07.08.2020

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE BATARYA VE SÜPERKAPASİTÖRÜN HİBRİT KULLANIMININ İNCELENMESİ

Yvon Gotran KOYİ BOUKİLA

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Muhammed Fahri ÜNLERŞEN

2020, 60 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Fahri ÜNLERŞEN
Dr. Öğr. Üyesi Mümtaz MUTLUER
Dr. Öğr. Üyesi Kadir SABANCI

Bir DC makinesine sahip bağımsız bir fotovoltaik enerji sistemindeki hibrit bir pil-süperkapasitör depolama sistemi, süperkapasitörün fotovoltaik sistemlerdeki etkisini göstermek için incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı, bağımsız bir fotovoltaik sistemle çalışan bir DC makinesinin çalışmasına süperkapasitörün katkısını belirlemektir. Bu bağlamda, DC makinesi için gerekli olan enerjinin kalıcı üretimi, hibrid akü-süperkapasitör depolama sistemi tarafından üretilir. İlk olarak, doğru akım makinesinin ve küresel sistemin çalışması, sadece süperkapasitör enerji depolama sistemi olarak bağlandığında gözlenmiştir. Bundan sonra, enerji depolama sistemi batarya olduğunda doğru akım makinesinin ve küresel sistemin çalışması gözlenmiştir. Son olarak, doğru akım makinesi ve küresel sistemin çalışması, batarya ve süperkapasitör hibrit enerji depolama sistemi olarak birleştirilerek gözlemlenmiştir. Sonuçlar, süperkapasitörün performansının ve küresel sisteme sağladığı avantajların katkısını doğrulamak için simülasyon yoluyla elde edilmiştir. Simülasyon devresi verişmiş ve süperkapasitör katkısı incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Batarya, Doğru Akım Makinesi, Fotovoltaik Enerji, Süperkapasitör, Hibrit Enerji Depolaması

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF HYBRID BATTERY AND SUPERCAPACITOR'S USE IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Yvon Gotran KOYI BOUKILA

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN ELECTRICAL-ELECTRONICS ENGINEERING**

Advisor: Asst.Prof. Muhammed Fahri UNLERSEN

2020, 60 Pages

Jury

Advisor Asst. Prof. Muhammed Fahri UNLERSEN

Asst. Prof. Kadir SABANCI

Asst. Prof. Mümtaz MUTLUER

A hybrid battery-supercapacitor storage system in a stand-alone photovoltaic energy system with a DC machine was examined to show the supercapacitor effect in photovoltaic systems. The purpose of this study is determining the contribution of supercapacitor in the operation of a DC machine powered by a stand-alone photovoltaic system. In this context, the permanent production of the energy necessary for the DC machine is generated by the hybrid battery-supercapacitor storage system. First, the operation of the DC machine and the global system are observed when only the supercapacitor is connected as an energy storage system. After that, the operation of the DC machine and the global system are observed when the energy storage system is the battery. Finally, the operation of the DC machine and the global system are observed when the battery and the supercapacitor are combined as a hybrid energy storage system. The results were obtained by simulation in order to confirm the contribution of the supercapacitor's performance and its advantages to the global system. The simulation circuit is presented and the contribution of supercapacitor is discussed.

Keywords: Battery, DC Machine, Hybrid Energy Storage, Photovoltaic Energy, Supercapacitor.

ÖNSÖZ

Bu çalışmada; fotovoltaik sistemlerde batarya ve süperkapasitörün hibrit kullanımı olarak süperkapasitör etki durumunun değerlendirilmesine yardımcı olacak veriler elde edilmeye çalışılmıştır. Yüksek lisans tezi olarak yaptığım bu çalışmanın her aşamasında bana yol gösteren, destek ve katkılarını esirgemeyen saygıdeğer hocam Dr. Muhammed Fahri ÜNLERŞEN'e teşekkür eder, sonsuz saygılarımı sunarım. Tez çalışmalarım sürecinde destek gördüğüm arkadaşlarıma Moussa HOUNKONNOU, Gideon Osei AGYEMANG, Bruna Marielle NGOLET, Mary Chitalu MUSONDA, bütün araştırma görevlerine, YTB'ye ve tabi ki her zaman yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Yvon Gotran KOYİ-BOUKİLA
KONYA-2020



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
ÇİZELGELER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM	12
3.1. Materyal	12
3.1.1. Süperkapasitör	12
3.1.2. Batarya	15
3.2. Metot	18
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	21
4.1. Fotovoltaik enerji depolama sisteminde süperkapasitör etkileri.....	21
4.1.1. Süper kapasitör nominal voltajı 0V iken	21
4.1.2. Süper kapasitör nominal voltajı 240V iken	25
4.2. Fotovoltaik enerji depolama sisteminde pil etkileri.....	28
4.2.1. Pilin SoC değeri %0 iken.....	29
4.2.2. Pilin SoC değeri %100 iken.....	33
4.3. Fotovoltaik enerji depolama sisteminde süperkapasitör ve pil hibrit yapısının etkileri	36
4.3.1. Süper kapasitör nominal voltajı 0V ve pil SoC %0 iken	36
4.3.2. Süper kapasitör nominal voltajı 0V ve pil SoC %100 iken	41
4.3.3. Süper kapasitör nominal voltajı 240V ve pil SoC %0 iken	46
4.3.4. Süper kapasitör nominal voltajı 240V ve pil SoC %100 iken	50
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	566
6. KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	611

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Süperkapasitör yapısı ve basitleştirilmiş devre (H. Gualois ve diğerleri, 2008 ve P. Simon, 2011).....	12
Şekil 3.2. Süper kapasitör şematik diyagramı (P. THOUNTHONG, 2016.).....	14
Şekil 3.3. Süper kapasitör yapısı (P. THOUNTHONG, 2016.).....	15
Şekil 3.4. Kurşun asit akü yapısı ve basitleştirilmiş devre (Jean-Loup PRENSIER and others, 2004, David Rosewater and others, 2019).....	16
Şekil 3.5. Kurşun Asit akü işlemi: Boşaltma aşaması, Şarj aşaması ve Akü prototipi (M.A. Hannan and others, 2016).....	17
Şekil 3.6. Hibrit enerji depolama sistemine bağlı bağımsız fotovoltaik.....	18
Şekil 3.7. Üzerinde çalışılan tüm sistem (M.E. Glavin and others, 2008).....	19
Şekil 3.8. Simülasyonda kullanılan ışınma dalga formları.....	20
Şekil 3.9. Maksimum Güç Noktası Takip Algoritması (EA7c).....	20
Şekil 4.1. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (kötü aydınlanmada) (EA8a).....	21
Şekil 4.2. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (iyi aydınlanmada) (EA8b).....	22
Şekil 4.3. Süper kapasitör bağlı güneş paneli sistemi (EA9).....	22
Şekil 4.4. Süper kapasitör çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA10a).....	23
Şekil 4.5. Süper kapasitör çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA10b).....	23
Şekil 4.6. DC makine çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA11a).....	24
Şekil 4.7. DC makine çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA11b).....	25
Şekil 4.8. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (kötü aydınlanmada) (EA12a).....	25
Şekil 4.9. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (iyi aydınlanmada) (EA12b).....	26
Şekil 4.10. Süper kapasitör çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA13a).....	26
Şekil 4.11. Süper kapasitör çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA13b).....	27
Şekil 4.12. DC makine çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA14a).....	28
Şekil 4.13. DC makine çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA14b).....	28
Şekil 4.14. DC makinesi ve pilli enerji depolama sistemine bağlı bağımsız bir PV panel (EA15).....	29
Şekil 4.15. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (kötü aydınlanmada) (EA16a).....	29
Şekil 4.16. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (iyi aydınlanmada) (EA16b).....	30
Şekil 4.17. Batarya çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA17a).....	30
Şekil 4.18. Batarya çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA17b).....	31
Şekil 4.19. DC makine çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA18a).....	32
Şekil 4.20. DC makine çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA18b).....	32
Şekil 4.21. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (kötü aydınlanmada) (EA19a).....	33
Şekil 4.22. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (iyi aydınlanmada) (EA19b).....	33
Şekil 4.23. Batarya çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA20a).....	34
Şekil 4.24. Batarya çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA20b).....	34
Şekil 4.25. DC makine çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA21a).....	35
Şekil 4.26. DC makine çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA21b).....	35
Şekil 4.27. DC makinesi ve pilli enerji depolama sistemine bağlı bağımsız bir PV panel (EA22).....	36
Şekil 4.28. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (kötü aydınlanmada) (EA23a).....	37
Şekil 4.29. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (iyi aydınlanmada) (EA23b).....	37
Şekil 4.30. Batarya çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA24a).....	38
Şekil 4.31. Batarya çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA24b).....	38
Şekil 4.32. DC makine çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA25a).....	39
Şekil 4.33. DC makine çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA25b).....	39
Şekil 4.34. Süper kapasitör çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA26a).....	40
Şekil 4.35. Süper kapasitör çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA26b).....	40
Şekil 4.36. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (kötü aydınlanmada) (EA27a).....	41
Şekil 4.37. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (iyi aydınlanmada) (EA27b).....	42
Şekil 4.38. Batarya çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA28a).....	42
Şekil 4.39. Batarya çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA28b).....	43
Şekil 4.40. DC makine çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA29a).....	43
Şekil 4.41. DC makine çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA29b).....	44
Şekil 4.42. Süper kapasitör çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA30a).....	44
Şekil 4.43. Süper kapasitör çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA30b).....	45
Şekil 4.44. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (kötü aydınlanmada) (EA31a).....	46
Şekil 4.45. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (iyi aydınlanmada) (EA31b).....	46

Şekil 4.46. Batarya çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA32a)	47
Şekil 4.47. Batarya çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA32b).....	47
Şekil 4.48. Süper kapasitör çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA33a).....	48
Şekil 4.49. Süper kapasitör çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA33b)	48
Şekil 4.50. DC makine çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA34a)	49
Şekil 4.51. DC makine çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA34b).....	49
Şekil 4.52. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (kötü aydınlanmada) (EA35a)	50
Şekil 4.53. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (iyi aydınlanmada) (EA35b).....	51
Şekil 4.54. Batarya çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA36a).....	51
Şekil 4.55. Batarya çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA36b).....	52
Şekil 4.56. Süper kapasitör çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA37a).....	52
Şekil 4.57. Süper kapasitör çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA37b)	53
Şekil 4.58. DC makine çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA38a)	53
Şekil 4.59. DC makine çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA38b).....	54



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 2.1. Pil ve Süper kapasitör performans karşılaştırması	6
Çizelge 2.2. 25°C'de süper kapasitörlü ve süper kapasitörsüz enerji depolamasının karşılaştırılması	7
Çizelge 2.3. 0°C'de süper kapasitörlü ve süper kapasitörsüz enerji depolamasının karşılaştırılması	7
Çizelge 2.4. Li-ion pil ve süper kapasitör özellikleri	8
Çizelge 3.1. Kullanılan model karakteristikleri	19
Çizelge 4.2. DC Makinenin ve enerji depolamalarının çalışma durumlarının özeti	55



SİMGELER VE KISALTMALAR

Sembol	Açıklama
%	: Yüzde
°C	: Selsius Derece
€	: Euro
A	: Amper
Ah	: Amper saat
BES	: Pil enerji depolama
C	: Kondansatör
cm	: Santimetre
DC	: Doğru Akım
dk	: Dakika
ECU	: Enerji Kontrol Ünitesi
EES	: Elektrik Enerjisi Depolama
ESS	: Enerji Depolama Sistemi.
F	: Farad
g	: Gram
GW	: Gigavat
h	: Saat
HESS	: Hibrit Enerji Depolama Sistemi.
I-OUT	: Çıkış akımı
IT	: Bilgi Teknolojisi
kg	: Kilogram
kVA	: Kilovolt amper
kW	: Kilovat
kWh	: Kilovat saat
LA	: Kurşun-asit
m	: Metre
MPPT	: Maksimum Güç Noktası Takibi.
P-PV	: Fotovoltaik güç
PTMA	: Nitroksit-Polimer Redox Süper Kapasitör
PV	: Fotovoltaik.
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
R	: Direnç
RTE	: Teknoloji Verimliliği Değerlendirilme.
s	: Saniye
SC	: Süper kapasitör.
SOC	: Şarj durumu.
V	: Volt
V-OUT	: Çıkış voltajı
VRB	: Vanadyum Redoks Akü
VRLA	: Valf Ayarlı Kurşun Asit
Wh	: Vat saat

1. GİRİŞ

Artan enerji talebi, fosil yakıtların tükenmesi ve kirlenici enerjilerin tüketimini sınırlama ihtiyacı, yeni temiz ve sürdürülebilir enerji kaynakları bulmak anlamına gelmektedir. Yenilenebilir enerjiler, özellikle güneş enerjisi, küresel ısınma ile bu acil beklentiden daha fazlasını karşılayabilir. Güneş enerjisinin kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürülmesine izin veren sistemdir, elektrik üretiminde gittikçe daha fazla yer almaktadır. Örneğin 2009 ve 2014 yılları arasında güneş enerjisi üretimi 20.4GW'dan 177GW'ya 8 kat artmıştır. Bu, dünyadaki elektrik üretiminin yaklaşık %1'ini temsil etmektedir. Dönüşüm sistemleri sayesinde, iletim ağına bağlanabilir veya yalıtılmış bir sitedeki bir cihazı çalıştırabilir. Yenilenebilir enerji kaynakları, serbest ve tükenmez olma avantajına sahiptir ancak süreksiz bir enerji arz eder. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için enerji depolayan bir kompanzasyon sistemi kullanılması gerekmektedir. Örneğin, Avrupa'da, Fransa, fotovoltaik sistemlerden üretilen elektriği 0.10€/kWh halkına sunarken, elektrik şirketlerinden 0.60€/kWh sunmaktadır. Büyük fiyat farkı göz önüne alındığında, halk güneş panel sistemleri kurmaya teşvik edilmektedir[1].

Son yıllarda, fotovoltaik dönüştürme cihazlarının kurulumu artmaktadır. Bu cihazlar, ev elektriği temini ve güneş kolektörlerine veya pompalara elektrik temini gibi çok çeşitli uygulamalara sahiptir. Fotovoltaik enerjinin depolanması esas olarak pillerle sağlanır, ancak başka araçlar da mümkündür. Piller yüksek özgül enerjiye sahiptir. Nispeten kısa bir ömürle (yaklaşık 1000 şarj döngüsü) ve bakıma ihtiyaçları vardır. Bu yüzden, fotovoltaik enerji uygulamalarının elektrik gücünün düzenlenmesi çok yavaş dinamiklere sahip piller tarafından garanti edilemez. Daha yüksek güç yoğunluklarına sahip yeni nesil süper kapasitörler ile önemli güç talepleri karşılanabilir. 1990'larda, süper kapasitörler bilgi teknolojileri ve telekomünikasyon alanında anlık ve önemli ölçüde düşük özgül enerji bileşenleri sağlamak için kullanılmaya başlanmıştır. Daha yakın zamanlarda, yaklaşık 0.3 ila 30 saniyelik çok hızlı tepki süreleri ve yüksek aktif güçleri sayesinde, süper kapasitörler hibrit araçların geliştirilmesini sağladı. Frenleme sırasında geri yükleyen süper kapasitörler, özellikle başlatma sırasında gerekli güç zirvelerini de karşılamaktadır[2].

Akülerden daha az kirliliğe neden olan ve daha uzun kullanım ömrü (500.000'den fazla şarj döngüsü) ile bakımda daha hafif olan malzemelerden üretilen süper kapasitörlerin fotovoltaik enerji depolama sistemlerine entegrasyonu önemlidir. Bununla birlikte, süper kapasitörlerin tek başına kullanımı zordur ve genellikle hibrit

araçlarda olduğu gibi piller veya diğer enerji kaynakları ile birleştirilir. Daha düşük kurulum maliyeti olan enerji depolama sistemlerinde gelişmiş olan hibrit elektrik depolama sistemleri verimli ve ekonomik bir çözümdür [3]. Sistemin özerkliğini sağlamak için piller kullanılır. Pil boyutunun yanlış seçilmesi sistemin boyutunu artıracaktır. Bu nedenle süper kapasitörler, güç fazındaki sistemlerin toplam enerji talebini karşılamak için aküleri desteklemek için kullanılmalıdır [4]. Bu gözleme dayanarak, hibrit akü-süperkapasitör depolama sisteminin güneş panelleri tarafından gerçekleştirilen ışınlamadaki değişiklik nedeniyle dalgalanmaları telafi etmesini sağlar. Burada, yüksek güçlü süper kapasitörlerin katkısı, güneşten kaynaklanan hızlı dalgalanmaları telafi etmektir; pil ise, uzun süre güneş panellerindeki dalgalanmaları dengelemek için yararlıdır [5].

Fotovoltaik sistemlerinde enerji güç düzeltilmesi için süper kapasitörlerin entegrasyonu, aktif güç talepleri sağlanması veya hatta kaydedilen voltaj dalgalanmalarının düzeltilmeleri mümkün kılacaktır. Süper kapasitörler fotovoltaik dönüşümden enerji depolamak için bir cihaz olarak içeren bir dizi uygulamadan bahsedilmektedir. Ancak bu uygulamaların çoğu çalışma aşamasındadır. Gücünü etrafına döşenen güneş panellerinden alan araç motoru, güneş paneli ile çalışan bir su pompası veya bir fotovoltaik hücreden enerji alan kablosuz sensör gibi örnekler çalışmalar mevcuttur. Süper kapasitörlerin bir fotovoltaik enerji dönüşüm cihazına entegrasyonunu öngörmek için, elektrik enerjisinin şarj/deşarj döngülerinin simülasyonuna izin veren güvenilir ve erişilebilir bir modele sahip olmak gerekir. Böylece bu donanımların çeşitli koşullar altında testlerini yaparak faydalı olup olmayacaklarına karar verilebilir.

Bu amaca ulaşmak için, üç farklı simülasyon karşılaştırmalı bir çalışma yapılmıştır. İlk bölümde, süper kapasitörlerin güneş enerjisi depolama teknolojisindeki etkileri, özellikle bir güneş kaynağı ile çalışan bir DC makinesinin çalışması bağlamında sunulmaktadır. Tezin problemini çözmek için süper kapasitörler tarafından fotovoltaik elektrik depolamanın ilgisi gösterilmiştir. İkinci bölümde, ilk bölümde belirtilen aynı sistem modeli tekrar kullanılmıştır, ancak bu sefer sadece pillerden oluşan bir depolama sistemine sahiptir. Güneş sistemindeki pillerin önemini vurgulamak için modelin pilli çalışma durumu incelenmiştir. Üçüncü bölümde, hibrit akü-süperkapasitör sistemine sahip fotovoltaik enerji depolama modeli incelenmiş ve değerler simülasyon ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar tartışılmış, hibrit güneş

enerjisi depolama sistemindeki (HESS) pillerin ve süper kapasitörlerin önemi vurgulanmış ve bazı önerilerde bulunulmuştur.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

P.Thounthong'a göre 2016 yılında, süper kapasitörlerin elektriksel tepkisi normal kapasitörlerle karşılaştırdı ve sonuçlar aşağıdaki gibi olmuştur. Süper kapasitörler kısa dönemlerde büyük akım yoğunlukları sağlayabilir (yüksek güç); eşdeğer bir hacimde, akümülatörlerden 20 ila 50 kat daha az elektrik enerjisi depolarlar, ancak normal dielektrik kapasitörlerden yaklaşık 100 kat daha fazla depolanır, bu nedenle bunlara "süper kapasitörler" veya ikincil jeneratörler denir. Bu bileşenin tarihi 19. yüzyılın ortalarında 1853'te, fizikçi Hermann von Helmholtz tarafından kapasitiflik olarak adlandırılan çift elektrik tabakası olayıyla başlamıştır. Bu fenomenin modellenmesi, özellikle Helmholtz, Gouy ve Chapman, Stern ve Grahame'nin çalışmaları ile yirminci yüzyılın ortalarına kadar uzanmaktadır. General Electric'in sulu bir elektrolitik bileşen ve gözenekli karbon elektrotlar için ilk patenti 1957'den beri etkindir. 1969'da Amerikan şirketi Sohio Corporation'ın ikinci bir patenti olan daha yüksek gerilimlere dayanan süper kapasitif cihazlar çıkartılmıştır. Sulu olmayan elektrolitlerin kullanımı 1971'de NEC'ye aktarıldı ve çift katmanlı bir elektrikli ilk süper kapasitör başarıyla pazarlanmıştır. Öncelikle bellek yedeklemeleri gibi düşük güçlü uygulamalar için tasarlanmıştır (0.5Wh.kg-1'in özgül güç enerjisi düşüktür ve birkaç farad'ı kapsar). 1970'lerin ve 1980'lerin sonunda, birçok şirket süper kapasitörler üretmeye başlamıştır. Panasonic, Matsushita Electric Industrial Company olarak bilinen "Gold Capacitor" serisi ismini 1978'de korumaya alınmıştır. 1987 yılında Elna, düşük güç uygulamaları için "Dynacap" adlı bir dizi yayınlanmıştır. 90 yıllarda süper kapasitörler ortaya çıkmaya başlamıştır. 1989'da ABD Enerji Bakanlığı (DOE) tarafından kısa vadeli hedef için 5Wh.kg-1'den büyük özel enerji cihazları, uzun vadeli hedef için özel güç (2003'ten sonra) 15Whkg-1'den daha büyük özel enerji cihazları ve 2kWkg-1'den daha büyük özel güçler için bir geliştirme programı başlatılmıştır. Bu bileşenler, hibrit araçlardaki akülere veya yakıt hücrelerine ek olarak, hızlanma aşamaları sırasında gerekli olan gücü ve fren aşamaları sırasındaki geri kazanımı sağlar [17].

2017 yılında yaptıkları yayında Akram ve arkadaşları miliamperden mikroampere küçük akım süper kapasitörlerinin birkaç volt olarak piyasaya sunulma belirlenmiştir. Önemli uygulamalarında, ana güç kaynağı bağlantısı kesilmesi sırasında korunma için yararlı olan bellek yedekleme ve diğer işlevler açıklanmıştır. Maliyetleri ve bakımları genellikle akülerden çok daha düşük olduğundan ve kullanım ömürleri çok daha yüksek olduğundan, birçok taşınabilir donanım ve güç kaynağında kullanılmaya başlanmıştır. Bununla birlikte, 1990'ların başından bu yana, enerji ihtiyaçlarının ve

özellikle gücün daha büyük olduğu uygulamaları hedefleyen daha büyük üst kapasitörlerin ortaya çıkmasıyla ikinci bir atılım olmuştur. Gelişimleri, enerji-güç kullanımının sadece akümülatörler veya kapasitörler tarafından daha iyi karşılandığı belirli kullanımlar belirtilmiştir. Aslında, bu süper kapasitörler genellikle, her cihazın tamamlayıcı bir rol oynadığı hibrit bileşenlerde kapasitörler, akümülatörler ve hatta yakıt hücreleri için yardımcı olarak kullanılabilenliği görünmektedir. Genel olarak, bir süper kapasitör ile bir akümülatör kombinasyonu, ilk güç taleplerinin bir filtreleme rolüne sahip olmasını sağlar, böylece ikinci enerji kaynağının potansiyelini arttırmalıdır [2], [3]. Uzun vadede, süper kapasitörler güneş enerjisini kullanarak izole tesislerde bağımsız olarak elektrik enerjisi depolamak ve tedarik etmek için performans, kullanım ömrü ve güvenilirlik açısından tatminkar olacaktır.

2006 yılında Şule KUŞDOÇAN yaptığı çalışmada, hibrit enerji depolama sistemleri akü-süperkapasitör çalışmalarında, akü depolama enerjisi ve süper kapasitörler kullanılarak sistem optimize edilmiştir. Yenilenebilir enerji sistemlerindeki (Fotovoltaik sistemler) güç değişikliklerini düzeltmek için önemli rol oynamıştır. Güneş ve rüzgar gibi değişken yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik üretilerek, sistem esnekliğini artırarak ve enerji depolamayı sağlayarak güç değişikliklerinin azaltılabileceği kanıtlanmıştır. Çalışmalarında mevcut enerji depolama sistemleri değerlendirilmiştir. Yenilenebilir enerji santrallerindeki teknik ve ekonomik gereklilikleri, depolama sistemlerinin uygulamaları, hibridizasyon kısıtları ve verimliliği artırmak için gerekli depolama teknolojileri analiz edilmiştir [5].

M.E.Glavin ve arkadaşları 2007'deki çalışmalarında, tüm bağımsız fotovoltaik sistemler, kullanılabilir ve gerekli enerji arasındaki tutarsızlığı gidermek için bir enerji tamponunun gerekliliği belirlenmiştir. Akü teknolojisi, özellikle kurşun asit akü, kullanılan en popüler enerji depolamasıdır. Bununla birlikte, fotovoltaik uygulamaların depolanmasında, pil genellikle sistemde en kısa kullanım ömrüne sahiptir, sistem güvenilirliği ve performansı üzerinde derin bir etkiye sahiptir. Fotovoltaik paneller akünün şarj edilmesi için ideal bir kaynak değildir, çünkü kaynak güvenli değildir ve büyük ölçüde hava durumuna bağlıdır ve optimum şarj/deşarj döngüsü garanti edilemez. Bir hibrit sistemi kullanılarak tüm sistemi, pilin ömrünü uzatmak için daha verimli ve güvenilir hale getirilebilir [6].

M.E.Glavin ve arkadaşları, 2008 yılında Valf Regüle Edilmiş Kurşun Asit (VRLA) üzerine yaptıkları çalışmalarda, bağımsız fotovoltaik (PV) sistemlerin çoğunun yetersiz güneş radyasyonuna sahip olduğu için yüke sürekli enerji sağlamak için bir

enerji depolama tamponunun gerekli olduğu belirlenmiştir. Tipik olarak, bu uygulama için Vana Ayarlı Kurşun Asit (VRLA) piller kullanılmıştır. Bununla birlikte, motor aküden çalıştırılmak gibi büyük akım talebi akü plakalarını kırarak akünün hasar görmesine neden olmuştur. Büyük akım talebi elde edilmenin alternatif yolu, pilden sürekli enerji sağlanırsa ve süper kapasitörlerle birleştirerek yükü anında besleyebildiği hibrit bir depolama sistemidir. Fotovoltaik enerji kontrol ünitesindeki (ECU) süperkapasitörün rolü Matlab/Simulink modelleri kullanılarak incelenmiştir. ECU tarafından fotovoltaik sistemlerinde hibrit sistemi akü süper kapasitör yüküne giden güç akış izlenmiş ve optimize edilmiştir [7].

2008'de T.A.Singo ve arkadaşlarının çalışmasında, piller ve ultra kapasitörler kullanılarak hibrit enerji depolama sistemi uygulanmıştır. Bu çalışmanın amacı tüketicinin talebini karşılamak için kaynaklardan gelen enerji akış yönetilmesi ve optimize edilmesidir. Güç talebi sırasında, ultra kapasitörler devreye girer, bu nedenle piller daha iyi koşullarda çalışır ve derin deşarjları önlenmiş olur. Ultra kapasitörlerin rolü, özellikle sıcaklık göz önüne alındığında çok önemlidir. Sonuçlar, tüm sistemin performansı ve avantajları doğrulanmak için simüle edilmiştir [8].

M.E.Glavin ve arkadaşları 2008 yılında, rüzgar sistemine sahip deniz elektrik sistemlerinde, dizel jeneratörü, rüzgar santrali tarafından sağlanan ana kaynağa yardımcı güç olarak kullanılmıştır. Süper kapasitör kullanılması bataryalı enerji depolama sisteminin aktif gücü, pilin kullanımının ömrü azaltılacağı düşünülerek dalgalanmaları düzeltmek için kullanılabilir. Hibrit elektrik depolama sistemleri bazı araştırmacılar tarafından sunulmuş ve kara rüzgar santrallerinde de kullanılmıştır. Bu sistemler kurşun asitli bir batarya ile üretilmiştir ve fotovoltaik sistemin çıkış gücünü yumuşatmak için ana önlem olarak bir süper kapasitör kullanılmıştır[6].

Pil ve süper kapasitör performans karşılaştırması Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Pil ve Süper kapasitör performans karşılaştırması

	Kurşun Asit Akü	Süper Kapasitör
Enerji Yoğunluğu	<1000	<10 000
Ömür (Şarj-Deşarj Sayısı)	<1000	>500 000
Şarj/Deşarj Verimliliği	%70-%85	%85-%98
Şarj Süresi	1-5 saat	0.3 – 30 sn
Deşarj Süresi	0.3-3saat	0.3 – 30 sn

(M.E. Glavin ve arkadaşları, 2008)

2008 yılında T.Singo ve arkadaşları tarafından bir enerji depolama sistemi optimize edilmek için süper kapasitörler kullanılmıştır. Bu enerji depolaması bulunan boş pil şarj edilmek için iki günden az sürmüştür. Sistem otonom modundayken süper kapasitörler sayesinde enerji dengesi sağlanıp pilin derin deşarjları önlenmiştir. Değerlendirmede, pillerdeki kayıpların Çizelge 2.2'de gösterildiği gibi daha düşük olduğu açıklanmıştır.

Çizelge 2.2. 25°C'de süper kapasitörlü ve süper kapasitörsüz enerji depolamasının karşılaştırılması

	Süper kapasitörsüz	Süper kapasitörlü
Batarya Voltajı (V)	50.63	50.63
Bataryadan Enerji (Wh)	4261	4261
Süper kapasitörden Enerji (Wh)	0	6.66
SOC (Şarj oranı) (%)	83	83.05

(T. Singo ve arkadaşları, 2008)

Pillerin performansı 0°C'de %25 yükselmiş simülasyonda tespit edilmiştir. Bu veriler Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. 0°C'de süper kapasitörlü ve süper kapasitörsüz enerji depolamasının karşılaştırılması

	Süper kapasitörsüz	Süper kapasitörlü
Batarya Voltajı (V)	50.44	50.46
Bataryadaki Enerji (Wh)	3004	2965
Süper kapasitördeki Enerji (Wh)	0	6.66
SoC (Şarj oranı) (%)	80.07	81.06

(T. Singo ve arkadaşları, 2008)

Süper kapasitörlerin eklenmesinde pillerdeki kayıplar azaltıldığı gösterilmiştir. Bu avantaj düşük sıcaklıklarda daha önemli olmuştur. Bu nedenle, özellikle sıcaklığın (düşük sıcaklıkta düşük verimli piller) etkisi göz önünde bulundurularak pillerin ebatlarını küçültmesi mümkün görülmüştür. Bir başka görünmüş etki de süper kapasitörlerin deşarj akımları sınırlandırılmalıdır. Bu durum pil ömrünün ve sürdürülebilirliğinin artması sağlanmaktadır. Süper kapasitörler kullanımı tüm sistemin verimliliği artırmıştır [8].

Hibrit enerji depolama 2011 yılında P.Simon tarafından iki veya daha fazla farklı depolama teknolojisinin bir sisteme entegrasyonu olarak tanımlanmıştır. Bu şekilde özel gereksinimler karşılanır ve farklı avantaj depolama yöntemleriyle sistem performansı iyileştirilerek özelliklerinin kombinasyonu gerçekleştirilmiştir. Enerji, güç, ömür, deşarj süresi ve diğer özelliklerin birleşimi, günümüzde var olan tek depolama

teknolojisi ile karşılanamayacağı kanıtlanmıştır. Süper kapasitörler yüksek güce ve kısa sürede hızlı deşarja sahiptir ancak enerji yoğunlukları sınırlıdır. Piller uzun süre yüksek enerji depolar ancak güç yoğunlukları sınırlıdır. Bu cihazlar birlikte kullanılması yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sağlar, hızlı tepki verir ve hem kısa hem de uzun deşarj karşılayabilir [9].

- ✓ Yüksek enerji verimlilik teknolojisi (RTE ~% 95);
- ✓ Yüksek güç yoğunluğu (800-2000W / kg) ve enerji yoğunluğu pillerden daha yüksektir;
- ✓ Hızlı tepki;

Çizelge 2.4. Li-ion pil ve süper kapasitör özellikleri

	Süper kapasitörsüz	Süper kapasitörlü
Deşarj Süresi	3 – 5dk	~1sn
Şarj Süresi	>6dk	~1sn
Ömür (Şarj-Deşarj Sayısı)	<5,000	>1,000,000
Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	100 - 150	5
Güç Yoğunluğu (kW/kg)	<1	>10
Çalışma Sıcaklığı (°C)	-20°C - +70°C	-40°C - +70°C
Verimlilik	%70 - %95	>%95
Birim Enerji Fiyatı (€/Wh)	0.8 – 1.5	8 – 15
Birim Güç Fiyatı (€/kW)	60 – 120	20 – 40

(P. Simon, 2011)

2012 yılında Guishi Wang ve arkadaşlarının çalışmalarında, standart Vanadyum akış pilli (Vanadium Redox Battery VRB) enerji depolama sistemlerinin verimliliğini artırmak için bir VRB ve süper kapasitör hibrit enerji depolama sistemi önerilmiştir. Önerilen sistemin operasyonel performansı analiz etmek için MATLAB/Simulink/PLECS (Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation) ortamında hibrit enerji depolama sistemi içeren fotovoltaik sistemi eşdeğer bir elektrik modeli uygulanmıştır. Büyük ölçekli PV enerji santrallerinin arz güvenilirliğini arttırmak için enerji depolama sistemleri olarak sabit pil kullanılmıştır. Böylece fotovoltaik elektrik kaynağı şebekeye yüksek performansı sağlanır. Son zamanlarda enerji depolama teknolojilerinden biri olan piller vanadyum akış pilidir. Megavat aralığında ticarileşmeye başlamıştır ve yenilenebilir enerji endüstrisi gittikçe süper kapasitörler daha fazla ilgilenmektedir. Vanadyum akış pilli enerji depolama sistemlerinin büyük ölçekli bir fotovoltaik tesisatında yeni teknik zorluklar ortaya çıkarılmıştır. Ancak, çıkış

gücü nominal gücü %20'sinden çok olduğunda vanadyum akış pilinin verimliliği önemli ölçüde azaltıldığı kanıtlanmıştır [10].

2013 yılında yaptıkları araştırmalarda Amine Lahyani ve arkadaşları, piller üzerindeki stres azaltmak için 500kVA invertörlerde kullanılan süper kapasitörler, hibrit süper kapasitör-pil enerji depolama sistemi maliyet açısından incelenmiştir. MATLAB/Simulink kullanılarak süperkapasitör ve pil modelleri geliştirilmiştir. Süper kapasitör ile bataryayı birleştiren tasarlanmış sisteminin mimarisi ve simülasyon yapılmıştır. Süper kapasitörler, şarj sırasında bataryaya uygulanan en yüksek gücü dalgalanma ve kısa şebeke kesintileri sırasında tam güç sağlamak için yüksek güçlü depolama cihazları olarak kullanılmıştır. Süper kapasitörler tarafından uygun bir oranda şarj edilerek karşılanabilecekleri gösterilmiştir. Şarj performansı göstergeleri süper kapasitör üzerindeki etki vurgulanmıştır. Bu çalışmada belirtilen parametreler değişimlerine göre süper kapasitörler maliyetine göre optimal sayıda süperkapasitör uygulamak için kapsamlı bir analiz yapılmıştır[11].

A.Vlad ve arkadaşları 2014 yılında, yüksek enerjili ve yüksek güçlü elektrokimyasal enerji depolama cihazları üzerinde farklı temel çalışmalar yapılmıştır. Her iki özellik tek malzemede yerine getirilmesi, malzemenin iç kısıtlamaları tarafından mümkün olmadığı açıklanmıştır. Burada, problemi çözmek için bir Li-ion pil malzemesi (LiFeP04) nitroksit polimer redoks (PTMA) süper kapasitör ile hibritlenerek yüksek enerji ve yüksek güç enerji depolama sistemi tasarlamak için bir yaklaşım ortaya koyulmuştur. Pilin 5 dakikadan daha kısa sürede tam şarj edilmesine eşdeğer hızda şarj olduğu gösterilmiştir. Çift bileşenlerin sinerjisi olarak üstün döngüsel kararlılığın yanı sıra tek tek elemanlardan elde edilemeyecek olan gelişmiş güç ve enerji yoğunluğu elde edilmiştir [12].

C. Sarrazin ve arkadaşları 2014'teki süper kapasitörler üzerinde yaptıkları çalışmalarında, süper kapasitörler enerji depolama sisteminin kullanımında iyi potansiyel faktörler getirilmiştir. Akülerle veya yakıt hücreleriyle kombinasyonlar, aracın aküsünden enerji tüketimini azaltır. Ölçümler, kapasitif enerji depolaması araçtaki güç piklerini %40 azalttığı gösterilmiştir. Bu sonuç, altyapı boyutlandırması için kavramsal seçimde yansıtılmaktadır: şarj merkezleri birbirinden uzatılabildiği zaman, maliyetler sabit tutularak veya altyapının özellikleri korunarak sistem performansı ve işletimi iyileştirilir. Hesaplamalarda merkezler arasındaki mesafenin %70'e kadar artırılabilirliği açıklanmıştır. Araçlarda frenleme sırasında enerji geri kazanımı ve çok uzun kullanım ömrü sayesinde süper kapasitörler hibrit araçların ve

toplu taşıma araçlarının geliştirilmesinde önemli bir rol oynayabileceği doğrulanmıştır [13].

H.Wang ve arkadaşları 2016 yılında yaptıkları çalışmalarında fotovoltaik sistemlerde hibrit akü-süper kapasitör enerji depolama şarj/deşarj kontrol stratejisi ile çift BUCK-BOOST belirlenmiştir. DC/DC invertörün şarj vedeşarj kontrolü, akü-süper kapasitör hibrit enerji depolaması etkili olduğu gösterilmiştir. Avantajlar tam olarak gerçekleştirme yöntemi, pilin ve süperkapasitör enerji depolama sisteminin ömrünü uzatmak ve fotovoltaik güç maliyetlerini azaltmak mümkün olmuştur. Stratejisinde, güç dalgalanması akü-süper kapasitör hibrit enerji depolaması ile etkin bir şekilde kolaylaştırılır ve DC hattın voltaj dalgalanması %0,5'ten %0,36 -%0,1'e düşürülmüştür. DC borunun voltajı etkin bir şekilde dengelenir ve enerji depolama sisteminin genel performansı fotovoltaik gücü kalitesi artırılır [14].

LVDC-MG modeli, 2018 yılında M.Gaetani-Liseo ve arkadaşları tarafından analiz edilmiştir. LVDC-MG modeli, OpzV Ld piller üzerinde birleştirilen süper kapasitörlerdir. Bu model farklı LVDC-MG yük tipleri (aydınlatma ve elektrik prizleri) için simüle edilmiştir. ADREAM BiPV DB'den çıkarılan güç yük profilleri, süper kapasitörler gerçek çalışma koşulları altında pil ömrü üzerindeki etkilerini analiz etmek için kullanılmıştır. Bu analizde süper kapasitörler pillerdeki mikro döngüleri önleyerek pil ömrü olumlu bir etki olduğu kanıtlanmıştır. Süper kapasitörler kullanımına karar vermeden önce, LVDC-MG'yi simüle edilen ve sonuçlara göre, Ld aküye az miktarda süper kapasitör eklenmiştir. Böylece depolama sisteminin LCOE (Levelized Cost Of Energy)'si bazı güç-yük profilleri için azaltılabilir. Ayrıca otonom fotovoltaik enerji depolama sistemi uygulamasında bataryanın ekolojik maliyetinden dolayı, süper kapasitörlü hibrit enerji depolama sistemleri daha çekici, ve ilginç haline getirmiştir [15].

Değişken rüzgar hızının olasılık yoğunluğu elde edilerek ve olasılık yoğunluğu eğrisi analiz edilerek, Peng Yu ve arkadaşları 2018'de, sürekli dalgalanma ve tepe dalgalanmasına ayrıştırılarak dalgalanan rüzgar enerjisi incelenmiştir. Çalışmalarında, sürekli dalgalanmanın karakteristiğine göre (yüksek dalgalanma) gerçek zamanlı dalgalanan rüzgâr enerjisinde enerji depolama sistemi incelenmiştir. Bu sistemin yüksek güç yoğunluğu, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun çevrim ömrü performansına sahip olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Enerji depolama sistemi performansının karşılaştırmalı analizi sayesinde, batarya ve süperkapasitör hibridizasyonu sırasıyla sabit ve tepe dalgalanmalı bir enerji depolama alanı olduğu varsayılmıştır. Bu göreve

göre, bir akü süper kapasitör hibrit sisteminin enerji depolama performansı iyileştirilmiştir [16].

Enerji depolama sistemleri üretimden iletme ve son olarak müşteriye dağıtımına kadar farklı elektrik sistemlerine entegre edilebilir. Bu çalışmalar, pillerin ve süper kapasitörlerin enerjisi ve yoğun güç depolama için birbirlerinin tamamlayıcısı olduğu gösterilmektedir.



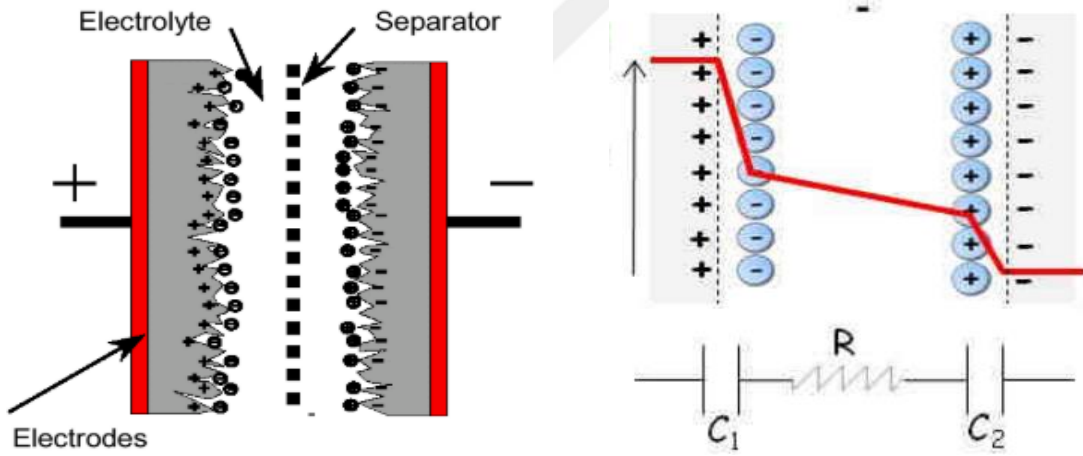
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Süperkapasitör

Süper kapasitörler, genellikle bir elektrolit ile ayrılan iki özdeş elektrottan oluşan elektrikli depolama cihazlarıdır. Jeneratörler, şarj edilebilir hücreler ve akümülatörlerin aksine tekrar şarj edilebilir jeneratör sistemleri veya kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yakıt hücreleri olarak adlandırılmıştır.

Süper kapasitör temel yapısı, genellikle organik veya sulu elektrolit içine emdirilmiş aktif karbondan alüminyum ve elektrotlardan yapılmış akım toplayıcılar tarafından oluşturulmuştur. Bunları izole etmek için, montajı geleneksel kapasitörler [9], [17] gibi yapılan iki elektrot arasına bir ayırıcı yerleştirilmiştir. Süper kapasitörler temel yapısı ve eşdeğer devresi Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Süperkapasitör yapısı ve basitleştirilmiş devre (H. Gualois ve diğerleri, 2008 ve P. Simon, 2011)

Süper kapasitörlerde enerji depolama prensibi ile elektrikselsel çift tabakanın yapısı ve enerji depolama potansiyeli ilk olarak 19. yüzyılın ikinci yarısında Helmholtz tarafından incelenmiştir. Bir asır sonra, birinci nesil endüstriyel jeneratörler malzemelerin evrimi açısından oldukça iyi durumdaydı. Ancak hızlı ve güvenli bir şekilde tekrar şarj edilebilen enerji kaynaklarına ihtiyaç vardı.

Süper kapasitörlerin genel çalışma prensibi, bir elektrolit ve geniş yüzey alan olarak sıralanabilir. Elektrotunun ara yüzünde bir çift elektrokimyasal tabaka

oluşumuna dayanır. Cihaz uçlarına bir potansiyel fark uygulanır. Yükün elektrostatik depolanması, seri olarak iki kapasitör görevi gören iki elektrot-elektrolit ara yüzünde gerçekleşir. Sistem her seferinde mükemmel şarj, tam deşarj ve verimlilik sağlanmaktadır. Gerçekten de, süper kapasitörde voltaj uygulandığında, her iki elektrot-elektrolit ara yüzünde bir boşluk şarj bölgesi oluşturulur. Buna elektrikli çift katman denir. Bu nedenle, enerji depolama elektrostatiktir ve pillerde oldukları kadar uzak değildir, çünkü elektrokimyasal reaksiyon yoktur [12], [16].

Aktif karbon üzerine inşa edilen bir anot-katot yapısı nedeniyle geleneksel kapasitörlerden çok daha yüksek bir aktif yüzeye sahiptir. Bu nedenle, çok yüksek kapasite değerlerinin (1 ila 5000F) elde edilmesini sağlar. Süper kapasitörlerin potansiyeli, pilleri veya yakıt hücreleri ideal şekilde tamamlanan yedek depolama öğeleridir. Yüksek bir voltaj ve yüksek bir çıkış akımı elde etmek için çok sayıda süperkapasitör hücresinin seri-paralel yapıları kullanılmak mümkündür. Temel ilişkiler doğrusal bir kapasite için yazılmıştır:

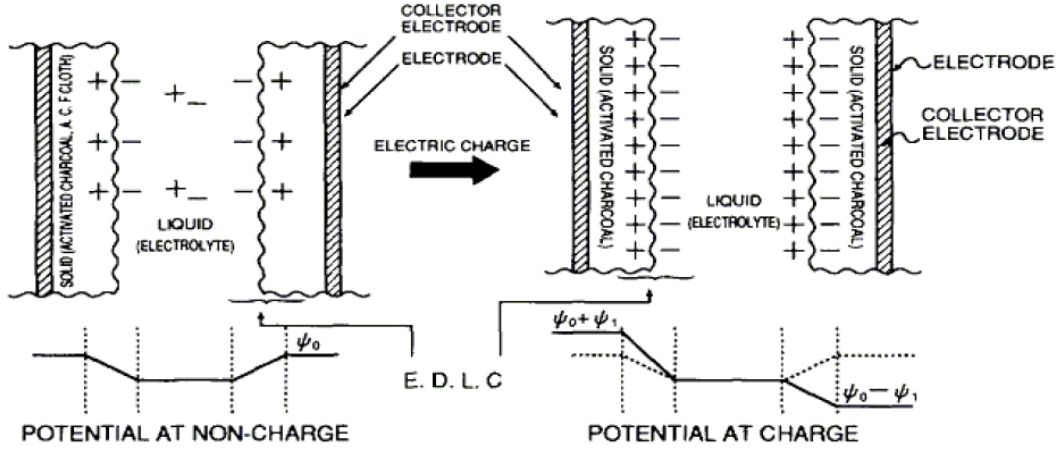
$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon \frac{A}{d} \quad (3.1)$$

ve

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3.2)$$

Burada C kapasitans, Q elektrik yükü, V uygulanan voltaj, ϵ yalıtım malzemesinin dielektrik sabiti, A yüzey, d kalınlığı ve W depolanan elektrostatik enerjidir.

Süper kapasitörlerde enerji depolama benzer şekilde yapılır, ancak Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, elektrot (elektronik iletken) ve elektrolit (iyonik iletken) arasındaki ara yüz klasik kapasitörlerden farklıdır.

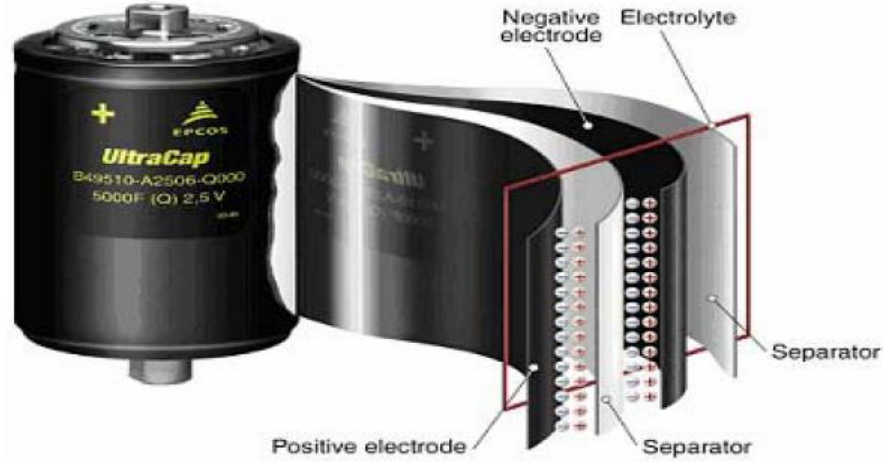


Şekil 3.2. Süper kapasitör şematik diyagramı (P. THOUNTHONG, 2016.)

Dielektrik rol oynanan çözücü moleküllerdir, bu nedenle yalıtım kalınlığı birkaç Angström'dür. Bu nedenle, bu bileşenlerin yüzey kapasitesi tipik olarak $10\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$ ve $30\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$ arasındadır. Bu, süper kapasitörler yüksek kapasitesinin nedenlerinden biridir, diğeri elektrot ve elektrolit arasında gözenekli elektrot malzemeleri kullanılarak elde edilen muazzam temas alanıdır. Örneğin, hali hazırda aktif karbon kullanımları $1500\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ve $2000\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ tipik yüzey alanlarına sahiptir. Çözücü tarafından sağlanan dielektriğin "moleküler" rolünün bir başka sonucu, voltajın organik çözücü için 2.5V 'te ayrışmasından dolayı sınırlandırılmasıdır.

Böylece, bir süperkapasitör, Şekil 3.2'de şematik olarak gösterilen bir elektrokaplama ile emdirilmiş bir yalıtkan ve gözenekli zar (iyonik iletimi sağlamak için) ile ayrılmış iki gözenekli elektrotta oluşturulur. Elektrikli çift katman, her elektrot-elektrolit ara yüzünde gelişir, bu nedenle süper kapasitör iki kapasitör seri kombinasyonu olarak görülebilir (Şekil 3.3). Gelişmiş pozitif elektrottaki ilk C_1 ve negatif elektrot üzerindeki diğeri C_2 . Böylece toplam kapasite denklem 3.3'teki gibi elde edilebilir [18]:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (3.3)$$



Şekil 3.3. Süper kapasitör yapısı (P. THOUNTHONG, 2016.)

Günümüzde en çok kullanılan teknoloji aktif bir karbon elektrotlulardır. Bu sektörde, süper kapasitörler elektrikli çift katman prensibi ile çalışır ve simetrik yapıdadır. Ancak bu durum sistemin tamamen eşit olduğu anlamına gelmez. Uygulamada, anyonlar genellikle katyonlardan daha az hidrat içerir. Dolayısı ile daha kolay mikro gözeneklere ulaşır ve daha düşük bir kalınlık tabakası oluşturur. Sonuç olarak, anot tarafındaki kapasitör değerleri, katot tarafındaki kapasitörün değerlerinden yüksek olduğu gözlenmektedir.

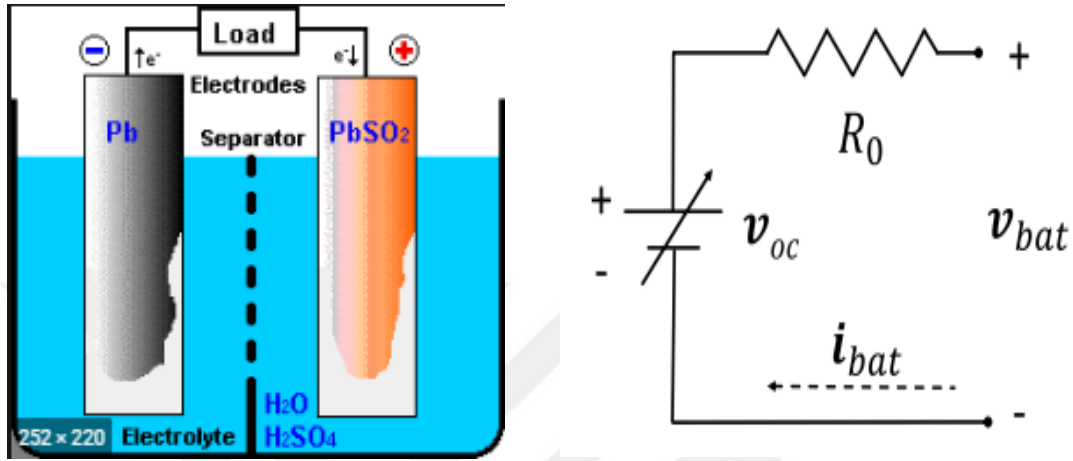
Elektrotların farklı olduğu asimetrik cihazlar olarak adlandırılan örnekler de mevcuttur. Negatif bir elektrot ve aktif karbonda polarize edilebilen metal hidroksit içeren bir faradik pozitif elektrot (örn. Nikel hidroksit). Bu cihazların tipik çalışması hibrit bir yapıdır, negatif elektrot tarafı elektrostatik olarak ve pozitif elektrot tarafı elektrokimyasal olarak enerji depolanmaktadır. Sonuç olarak, pozitif elektrotun kapasitansı negatif muadilinden daha yüksektir, ortaya çıkan kapasitansı büyük ölçüde temsil edilir [18].

3.1.2. Batarya

Bataryalar ve akümülatörler, enerjiyi kimyasal formda depolayan ve elektrik formuna döndüren elektrokimyasal sistemlerdir. Akım patlamaları, saniyede yer değiştiren elektron miktarı ile orantılıdır. Hizmet ömrü, farklı maliyet yatırımı ve zaman sabiti uzlaştırılan birçok teknolojik varyasyonu bulunmaktadır.

Tüm geleneksel şarj edilebilir bataryalar genellikle elektrokimyasal depolama sistemleri, akış bataryaları ve ikincil şarj edilebilir bataryalardır. Enerji, enerji

verimliliğine ve küçük fiziksel değişikliklere sahip geri dönüşümlü bir süreçle elektrik enerjisinden kimyasal enerjiye ve tersi yönde dönüştürülür. Bununla birlikte, kimyasal reaksiyon hücrelerin yaşam döngüsü ve enerji depolaması zamanla azaltılabilir. Bu tip bataryalar, zararlı emisyon olmadan şarj ve deşarj fazlarını değiştirerek elektrik enerjisi depolama ve serbest bırakma işlevine sahiptir ve daha az bakım gerektirir [19].

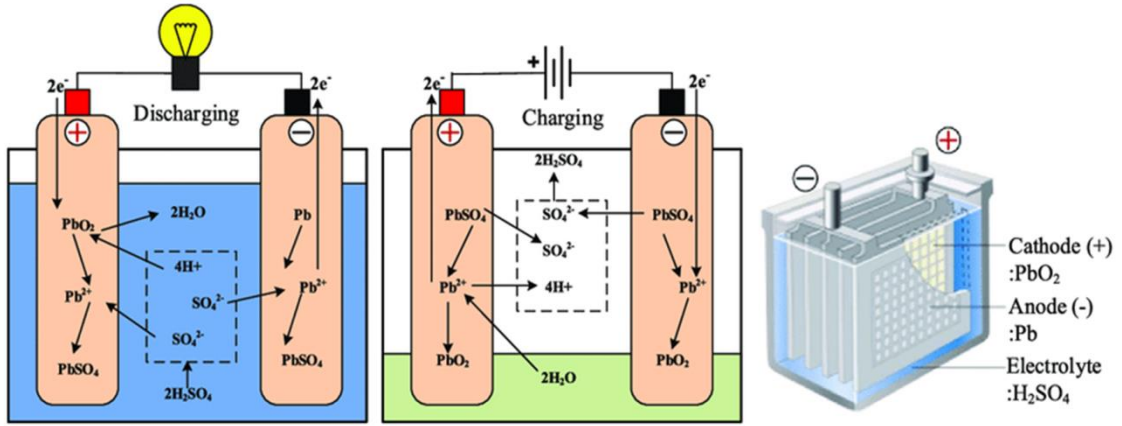


Şekil 3.4. Kurşun asit akü yapısı ve basitleştirilmiş devre (Jean-Loup PRENSIER and others, 2004, David Rosewater and others, 2019)

Kurşun-asit aküler 1860'tan beri ticari şekilde enerji kaynakları olarak kullanılmaktadır. Bu piller her içten yanmalı motorda bulunur ve tipik olarak acil durum güç kaynağı, yenilenebilir enerji depolama ve sağlamlık, güvenli çalışma, geniş sıcaklık toleransı ve şebeke depolama ucuz olduğundan depolama için kullanılır. Akü bir negatif elektrot Pb, bir pozitif elektrot PbO₂ ve bir elektrolit çözeltisi H₂SO₄'ten oluşur [18]. İki elektrot sıvı veya jel formunda aynı elektrolitik çözeltiliye daldırılır. Çözelti ile elektronlar ve iyonların çözelti içinde yer değiştirmesinin kaynağı olan elektrotlar arasındaki reaksiyondur. Dolayısıyla elektrolitin işlevi iyonik iletimi sağlar ve kimyasal reaksiyona katılmaktır. Gözenekli bir yalıtım (veya ayırıcı) iyonların geçişine izin verirken iki elektrotun ayrı durması sağlar [20], [21].

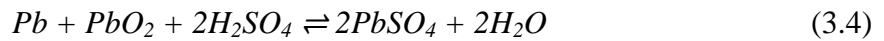
Bir elektrot elemanı elektrik motor gücü yaklaşık 2V'dir ancak şarj durumuna ve sıcaklığa (+1.8mV/°C) bağlıdır. Uzun ömürlü bir yatırım maliyeti sulunan ve bağımsız fotovoltaiik kurulumlarda sıklıkla kullanılan açık pillerde, elektroliz fenomeni nedeniyle su buharlaşması sık sık bakım (saf su ilavesi) gerekmektedir. Bununla birlikte, kapalı tip valf ayarlı kurşun asit akülerde bir emniyet valfi bulunur ve jelleşmiş elektrolitin aksine normalde hidrojen ve oksijenin kaçmasına izin vermezler, dolayısı ile bakım gerektirmezler. Yeterli ki büyük boyuta (şarj-deşarj döngülerinin genliğinin

azaltılması), normal su ve kabul edilebilir bir sıcaklıkta doldurulmasına bağlı olarak ömürleri yirmi yıla kadar çıkartılabilir [22].



Şekil 3.5. Kurşun Asit akü işlemi: Boşaltma aşaması, Şarj aşaması ve Akü prototipi (M.A. Hannan and others, 2016)

Akım, bir alıcıya güç vermek için pozitif elektrottan negatif elektroda bir metal tel (iletken) yoluyla hareket eden tüm elektronların hareketi ile oluşturulur. Bu elektron transferinden gelen iyonlar, katodu anoda birleştirmek için bırakarak elektrolitten geçer. Ardından pil deşarj olur. Bu nedenle bir pil, her şeyden önce iki “oksidan indirgeyici” çift (örneğin: Kurşun/Kurşun oksit, Karbon/Lityum kobalt oksit veya Karbon/Fosfat) değişim elektronları ile karakterize edilir. İki plakanın birleşmesi bir bataryanın birincil varlığını oluşturur.



Deşarj sırasında, elektrokimyasal reaksiyon kendiliğinden olur, böylece kimyasal potansiyellerin dengesini sağlamak için reseptör yoluyla elektronların yer değiştirmesini sağlar ve akımı oluşturur. İki elektrot aynı potansiyele sahip olduğunda, batarya daha fazla akım şarj etmez. Şarj aşaması sırasında, işlem deşarjın tersidir: şarj sırasında, pil haricen sağlanan akımı alır. Akünün içinde, elektrotların kimyasal potansiyelleri artar ve bu nedenle gerilim artar. Biriken kimyasal enerji, zıt yöne elektrokimyasal reaksiyonlarla kendini gösterir.

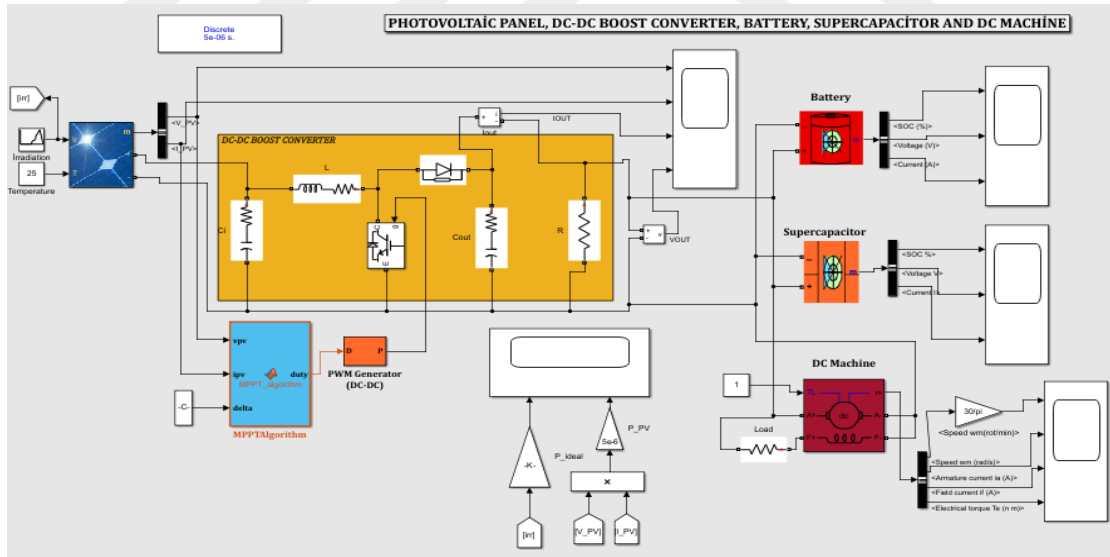
Bu tip piller kompakt bir hacme sahiptir ve büyük bir alan kaplamazlar bu yüzden titreşime karşı direnç gösterirler. Bu tip akü, şarj fazı sırasında ünite içindeki sudaki hidrojen ve oksijeni yeniden birleştirme, böylece su kayıplarını sınırlama

özelliğine sahiptir. Elektrolit jel aküler, jel içerisindeki elektrolit ile yapılır; bu, asit ihtiva etmek için kısmen katı olan ve sızıntı olmayan jelatinimsi bir kütledir. Bu tip piller, diğer standart pillere kıyasla daha yavaş şarj gerektirir. Bununla birlikte, jel elektrolitin içinde bataryaya kalıcı zarar verebilecek gaz kabarcıkları oluşabilir [19].

Kurşun-asit elektrokimyasal piller, maliyet ve kullanım ömrü açısından doğru performansa sahip yığın depolama çözümlerine izin verir. Ancak uzun süre çok pahalı kalan Li-iyon piller, elektrikli araç pazarının patlaması sayesinde hala rekabet edebilecek güçtedirler.

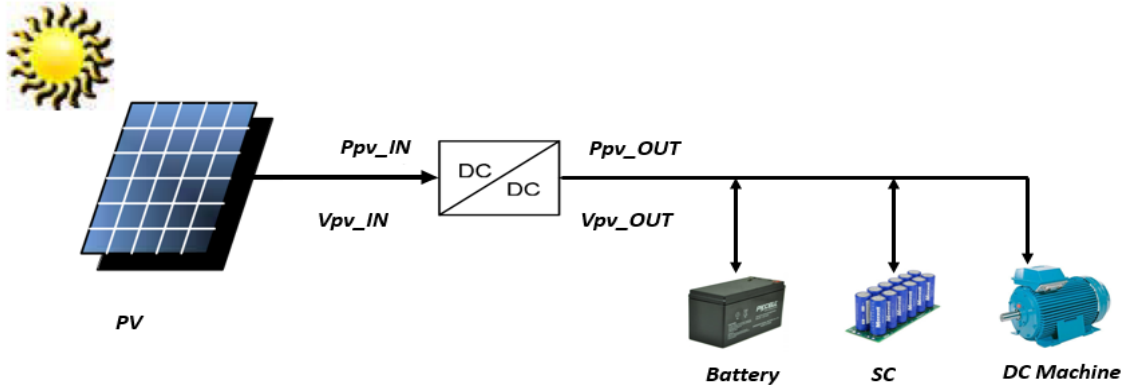
3.2. Metot

Bu çalışmada kullanılan yöntem esasen MATLAB/Simulink ortamında simüle edilen bir devreye dayanmaktadır. Simülasyonları gerçekleştirmek için oluşturulan yapıda, hibrit batarya-süper kapasitör enerji depolama sistemi, güneş paneli tarafından bir DC-DC BOOST konverter tarafından beslenmektedir. Bu sistemdeki enerjiyi tüketmek için de bir DC makine bağlanmıştır.



Şekil 3.6. Hibrit enerji depolama sistemine bağlı bağımsız fotovoltaik

Bağlı devrede ana bileşenler güneş paneli, DC/DC boost dönüştürücü, kurşun asit akü, süperkapasitör ve DC makinesidir. Çizelge 3.1 bize bileşenin farklı özelliklerini vermektedir. Tam simülasyon devresi Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.7. Üzerinde çalışılan tüm sistem (M.E. Glavin and others, 2008)

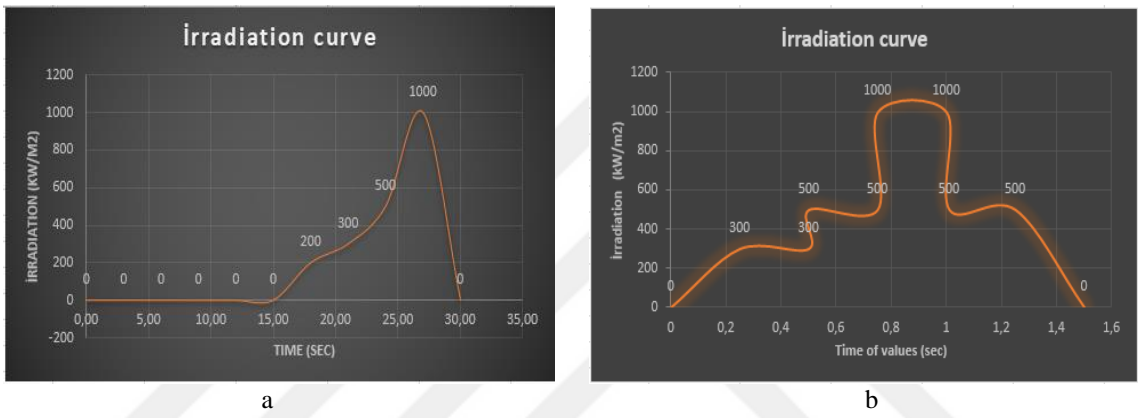
Çizelge 3.1. Kullanılan model karakteristikleri

	Parametre	Parametre Değeri
PV Modül: 1Soltech 1STH-215-P	Voc,n	36.3V
	Isc,n	8.21A
	Rs	0.221Ω
	Rp	313.4Ω
	a	0.98Ns
	Ns	60
	Tn	25°C
	Gn	1000 W/m ²
	Ki	0.102A/C
	Kv	-0.3609 V/C
Genel Süper Kapasitör Modeli	Vuc,n	240V
	Ruc	8.9Ω
	Cuc	99.5F
	Ns	48
	Np	1
Kurşun Asit Batarya	Vb,n	240V
	Cb,n	16.2Ah
DC Makine Modeli	Rar	[0.6 Ω 0.012 Ω]
	Lar	1.8H
	Rf	[240 Ω 120 Ω]
	Laf	1.8H
	J	1 kgm ²
	Bm	0 Nms
	Tf	0 Nms
	Te	1 rad/s

Model verileri Çizelge 3.1'te sunulmaktadır. Depolama birimi sayısı DC makinesinin nominal gerilimine ve akımına karşılık gelecek şekilde seçilmiştir [22]: $V_{m,n}=240V$ ve $I_{m,n}=16.2A$. Bu nedenle, nominal gerilim $V_{b,n}=240V$ ve nominal kapasitansı $C_b=16.2Ah$ olan bir kurşun-asit pil ve nominal gerilim $V_{uc,n}=240V$ olan genel bir süper kapasitör, birlikte hibrit depolama sistemimizi oluşturur. Üçü seri ve

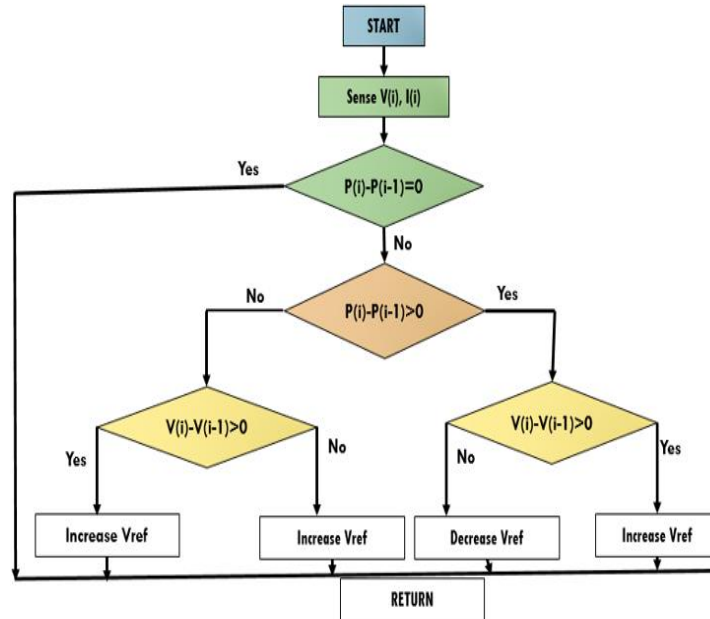
ikisi paralel tip 1Soltech 1STH-215-P ile beş fotovoltaik panelden oluşan bir modül kullanılmıştır (V_{oc} , $n = 36.3V$ ve I_{sc} , $n = 8.21A$). DC makine özellikleri şunlardır: Kalem gücü = $3731W = 5.0HP$, dönme hızı $\omega_n = 1220$ rpm ve $T_{e,n} = 29.2Nm$ dönme hızı ile orantılı tork T_e . Motoru korumak için 1Ω direnç kullanılmıştır. Üç aşama ($t_0 + 2.8s/4.8s/6.8s$) şeklindedir.

Farklı ışınlama formlarına göre iki simülasyon durumu gerçekleştirilmiştir. Biri ışınlama Şekil 3.8a'da tarif edilirken diğeri Şekil 3.8b'de tarif edildiği şekilde yapılmıştır.



Şekil 3.8. Simülasyonda kullanılan ışınma dalga formları

Önerilen maksimum güç noktası takip algoritması Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Maksimum Güç Noktası Takip Algoritması (EA7c)

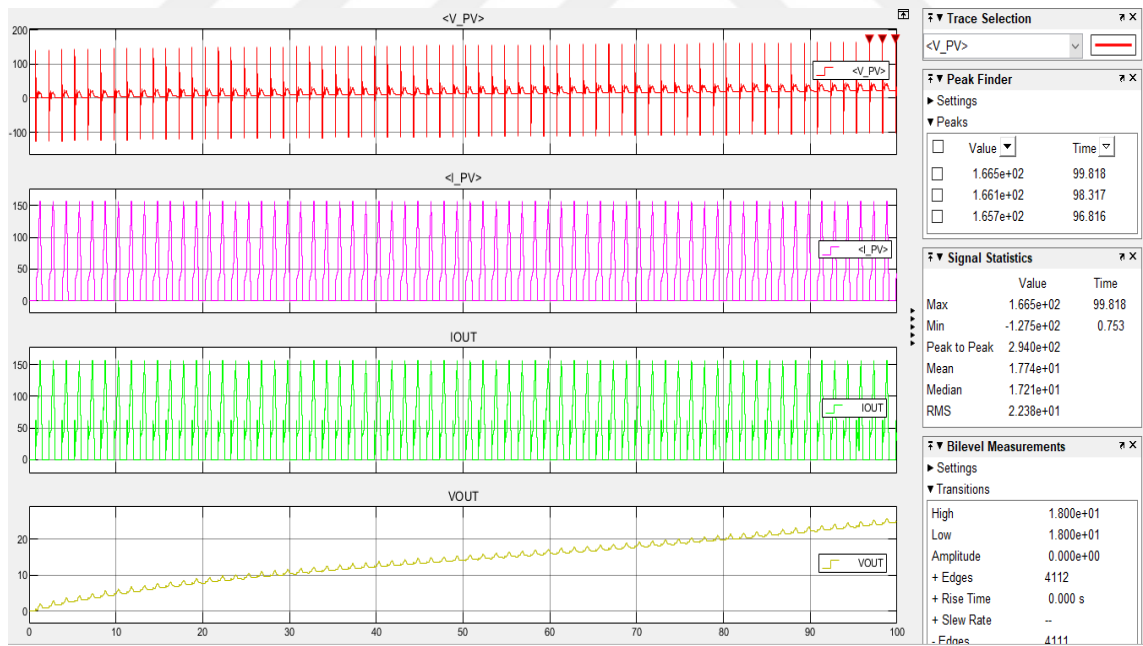
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Simülasyonlar, Şekil 4.1'de gösterildiği gibi iki farklı ışınlama formunda (a ve b) yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

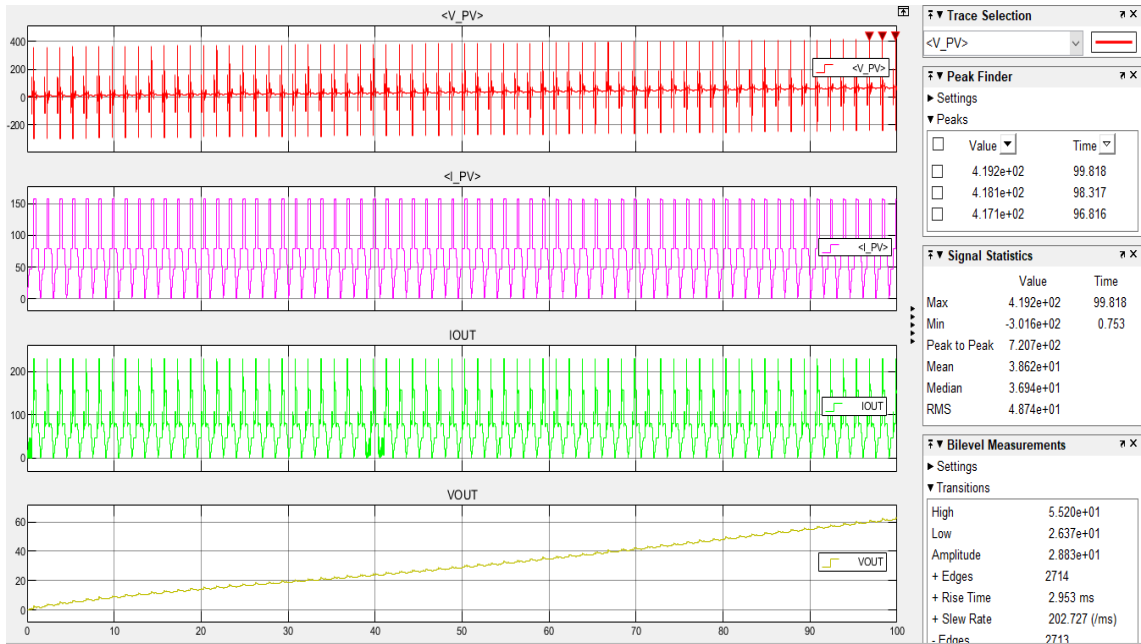
4.1. Fotovoltaik enerji depolama sisteminde süperkapasitör etkileri

4.1.1. Süper kapasitör nominal voltajı 0V iken

Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı Şekil 4.1'de ve Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Algoritmanın basamak boyutu 6 saniyeye ayarlanmıştır, bu da 6 saniyede bir yenilenmiş voltaj referansının verildiği ve sonuç olarak voltaj dalga formunun merdiven benzeri olduğu anlamına gelir. İlk simülasyonda, yalnızca nominal voltajı 0V olan bir süper kapasitör Şekil 4.3'te gösterildiği gibi DC makinesine paralel bağlanmıştır.

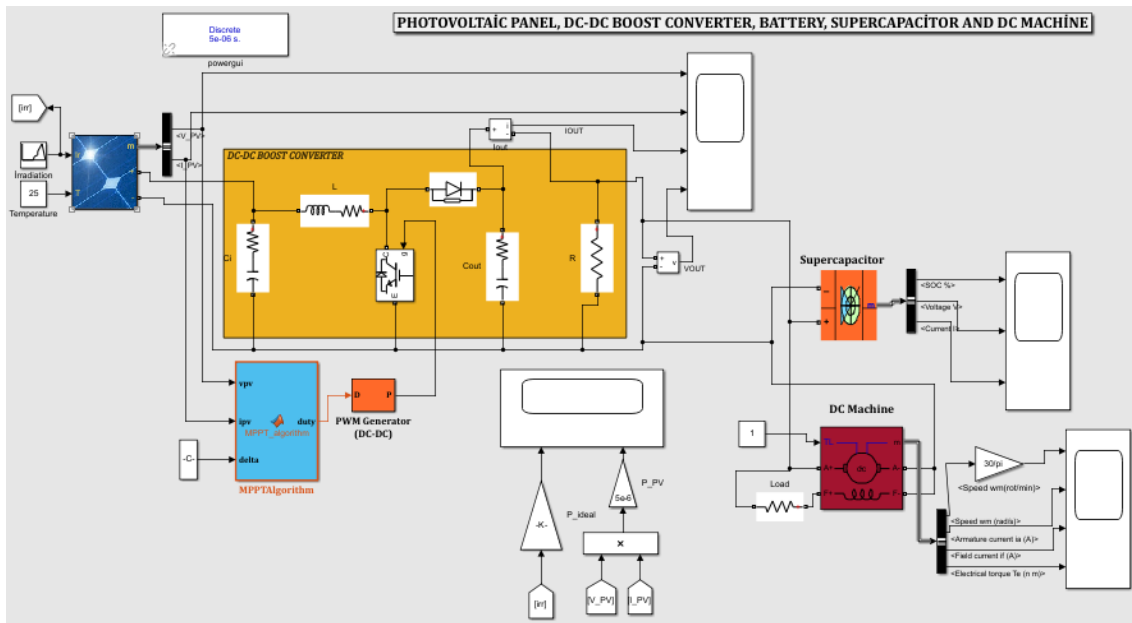


Şekil 4.1. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (kötü aydınlanmada) (EA8a)

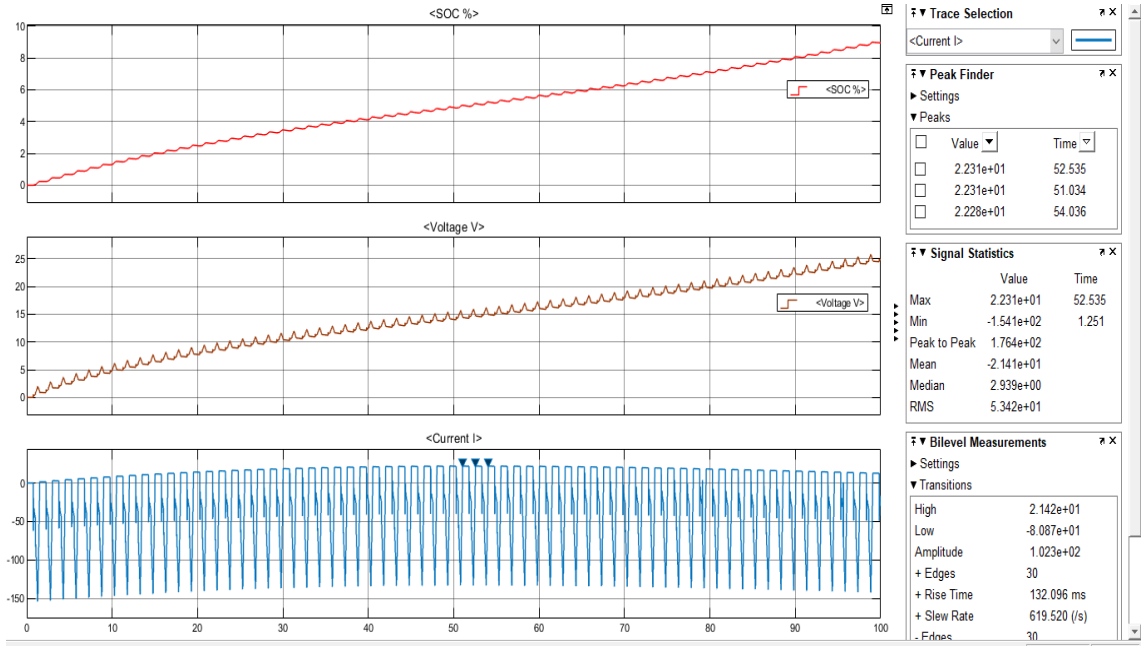


Şekil 4.2. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (iyi aydınlanmada) (EA8b)

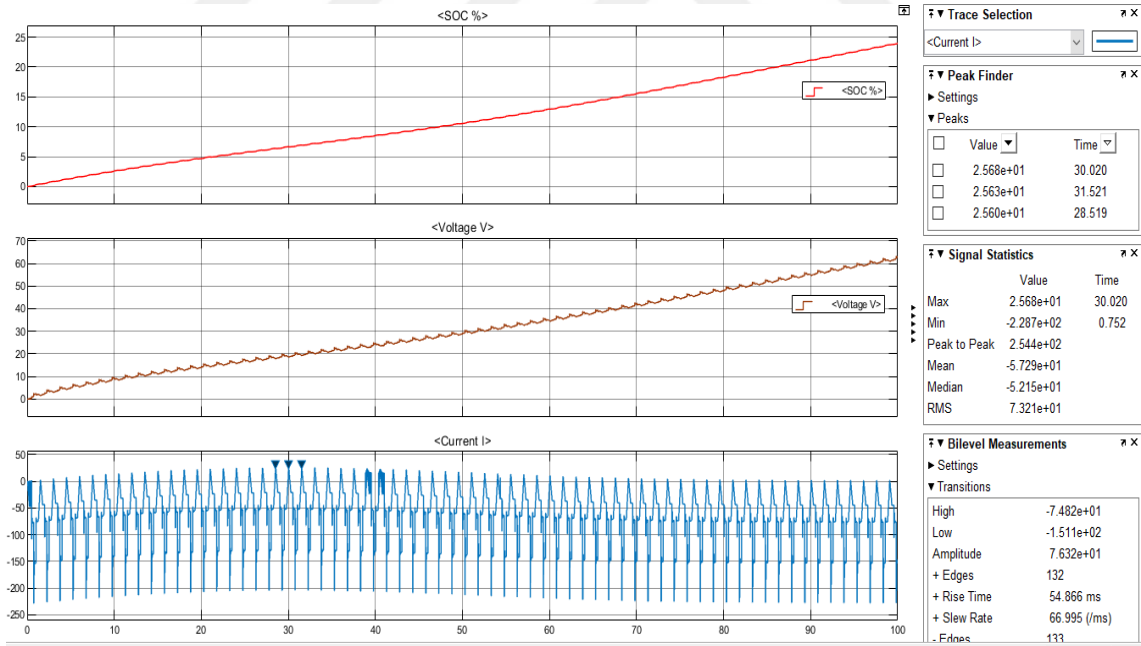
DC/DC boost dönüştürücüsünün kayıpsız olmadan ideal olduğu kabul edilmiştir. DC-bus gerilimi V_{OUT} , yaklaşık $0,25V/s$ ve $0,61V/s$ değerinde stabil ve lineer bir hızla artmıştır. 100. saniyede V_{OUT} , şekil 4.1'de yaklaşık $25V$ ve şekil 4.2'de $61V$ 'dir. Bu çok zayıf voltaj durumunda, süperkapasitörün SoC değeri yavaş yavaş ancak %10 ve %24'e ulaşabilmiştir. Süper kapasitörün şarj olma oranı, üzerindeki gerilim ve üzerinden akan akım Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te farklı ışınlama durumları için verilmiştir. PV panel güç talebini karşılayamadığı görülmektedir.



Şekil 4.3. Süper kapasitör bağlı güneş paneli sistemi (EA9)



Şekil 4.4. Süper kapasitör çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA10a)

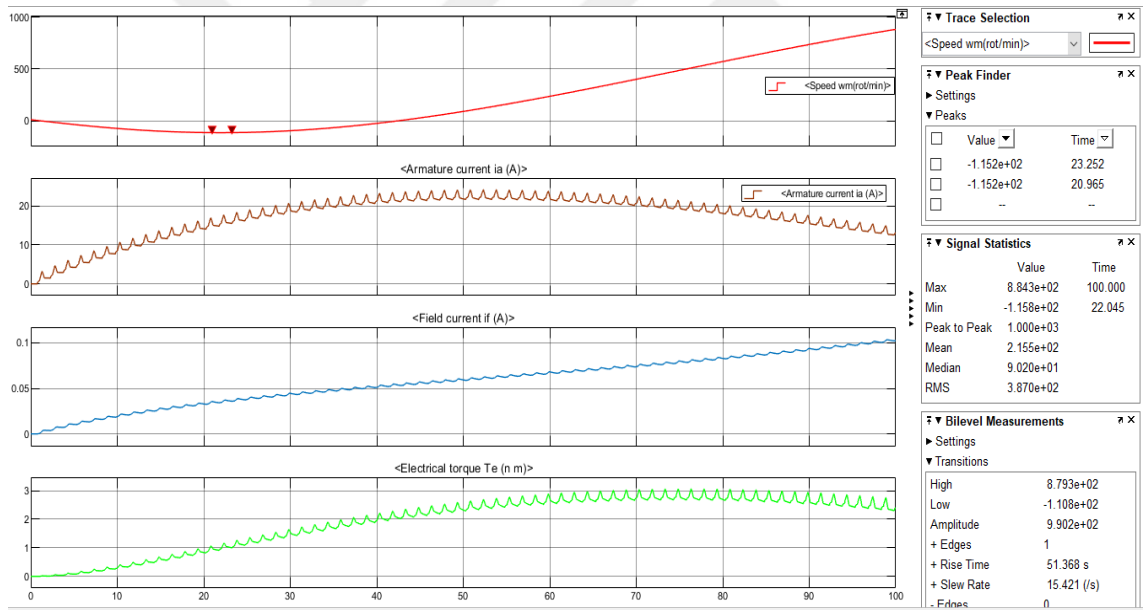


Şekil 4.5. Süper kapasitör çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA10b)

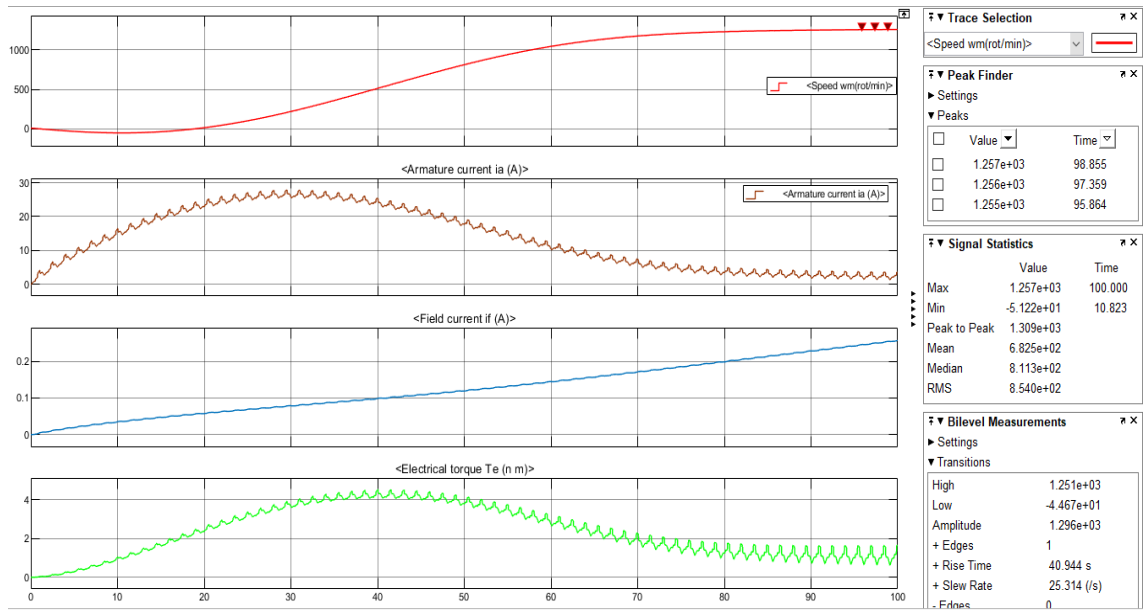
Şekil 4.6 ve 4.7’da, makinenin minimum çalışma voltajı PV paneli çıkışı tarafından karşılanmadığından, makinenin hızı sıfıra inmiştir. Kötü ışığa için 42. saniyeden (Şekil 3.8a) ve daha iyi ışınlama için 20. saniyeden sonra (Şekil 3.8b) makinemizin hızı düşmeye başlamıştır. 80 saniye sonra makinenin hızı 500

devir/dakikayı geçmiş ve DC makine 70 saniyeden sonra nominal değerine ulaşmıştır. Bunun nedeni, DC/DC boost dönüştürücünün zaman içinde bir jeneratör gibi çalışması ve daha iyi bir ışımaya iyi bir çıkış performansına sahip olmasıdır. Son olarak Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te, süper kapasitörün negatif aralıktan başlaması mevcut I_{sc} , takviye modunun aktif olduğunu göstermiştir. Ancak 0V başlangıç voltajı ile bu mümkün olmamaktadır. DC/DC boost dönüştürücüsünün V_{OUT} çıkışındaki düşük voltaja rağmen süper kapasitörün şarjı artmaya başlamıştır. Süper kapasitör ağda bulunan enerjiyi emer ve 100. saniyede Şekil 4.4'da %9 ve Şekil 4.5'de %24 oranında şarj olmuştur.

Bu bölüm, enerji depolama sistemi makinenin enerji talebini karşılamadığında DC/DC takviye dönüştürücüsünün enerji tedarikçisi rolünü oynadığını durumu ortaya koymaktadır [24]. Ancak enerji kaynağının yetersiz olduğunu söyleyebiliriz çünkü fotovoltajik kaynak dalgalanıyor, kararlı değil ve ışınlama formuna bağlıdır.



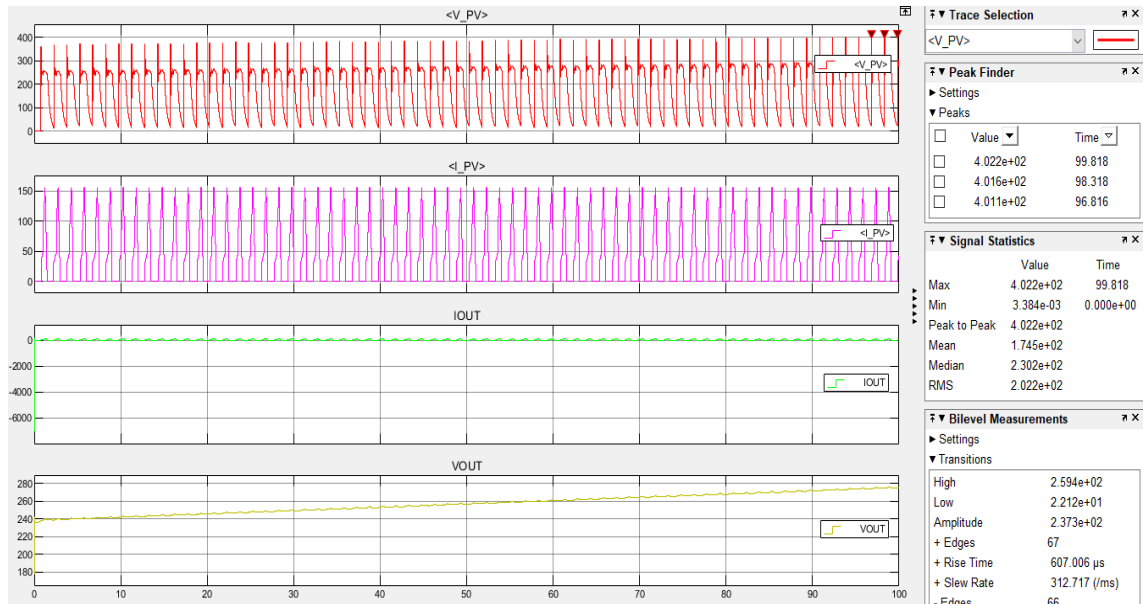
Şekil 4.6. DC makine çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA11a)



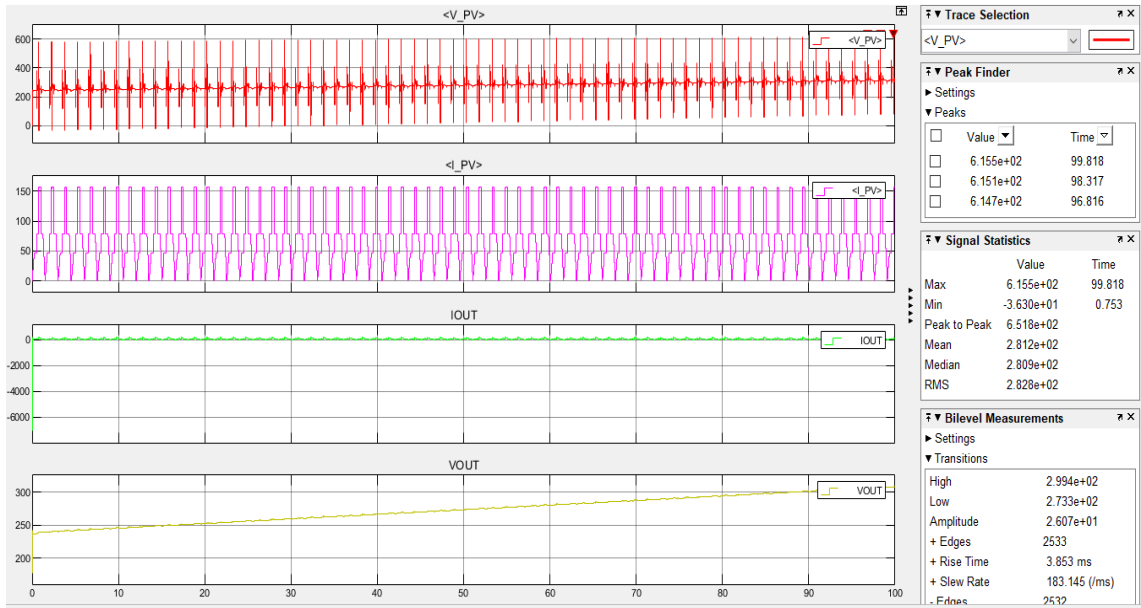
Şekil 4.7. DC makine çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA11b)

4.1.2. Süper kapasitör nominal voltajı 240V iken

Güneş panelinin terminal voltajı ve akım dalga formu ve çıkışları Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da gösterilmektedir.

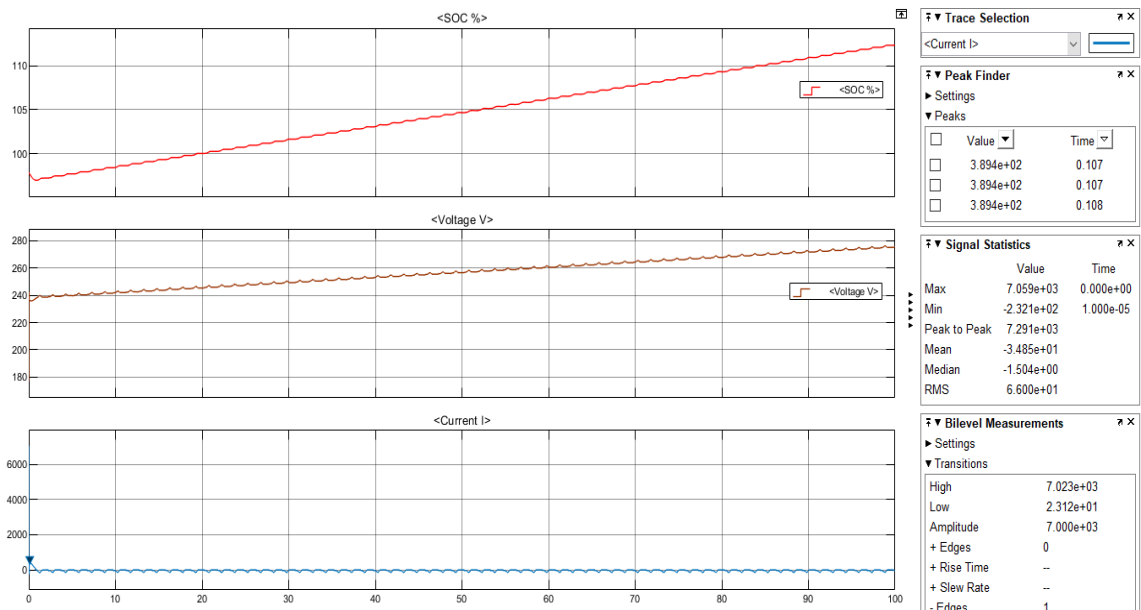


Şekil 4.8. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (kötü aydınlanmada) (EA12a)

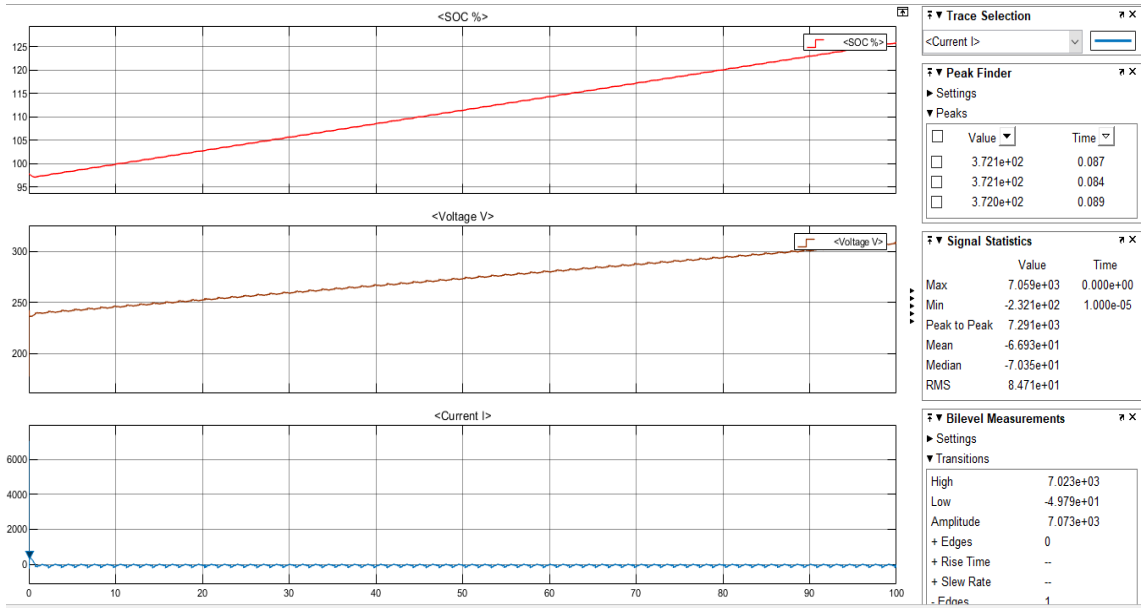


Şekil 4.9. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (iyi aydınlanmada) (EA12b)

V_OUT, yaklaşık olarak 240V voltaj ile başlamıştır ve Şekil 4.8'de 0,18V/s ve Şekil 4.9'de 0,63V/s gibi düzgün bir doğrusal bir hız ile artmıştır. 100 saniye sonunda V_OUT Şekil 4.8'de yaklaşık 278V ve Şekil 4.9'da 303V'a ulaşmıştır. Voltaj seviyesindeki küçük artış DC/DC boost konvertörün görevini yaparak DC makineyi beslediğini ve süper kapasitörün sarj ihtiyacını karşıladığını göstermektedir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 arasındaki küçük farkın sebebi, ışınlama değişikliğinden kaynaklanmaktadır.



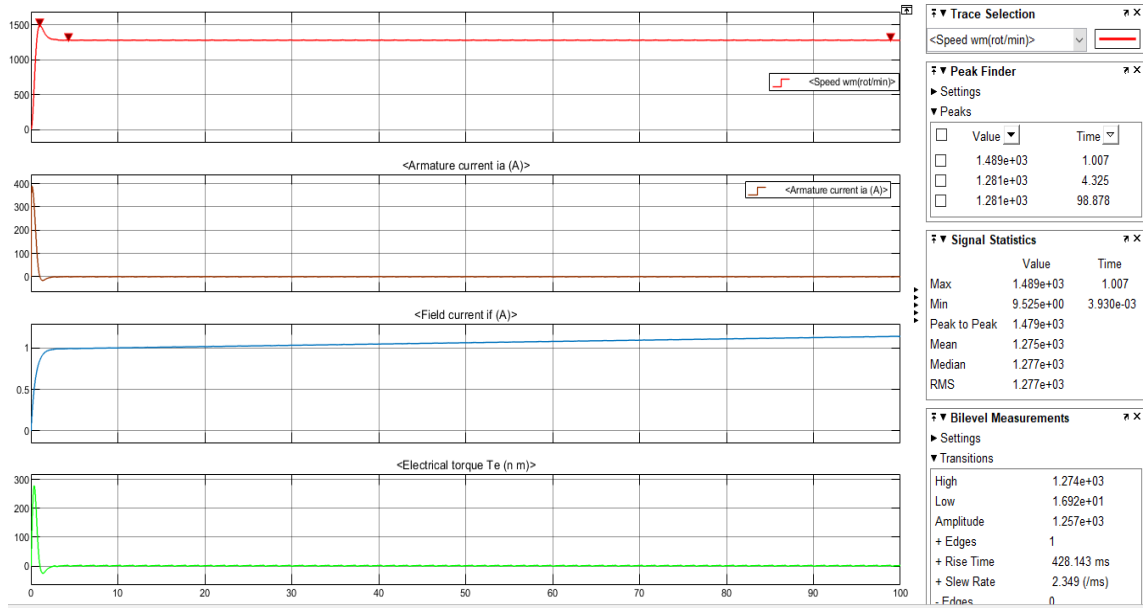
Şekil 4.10. Süper kapasitör çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA13a)



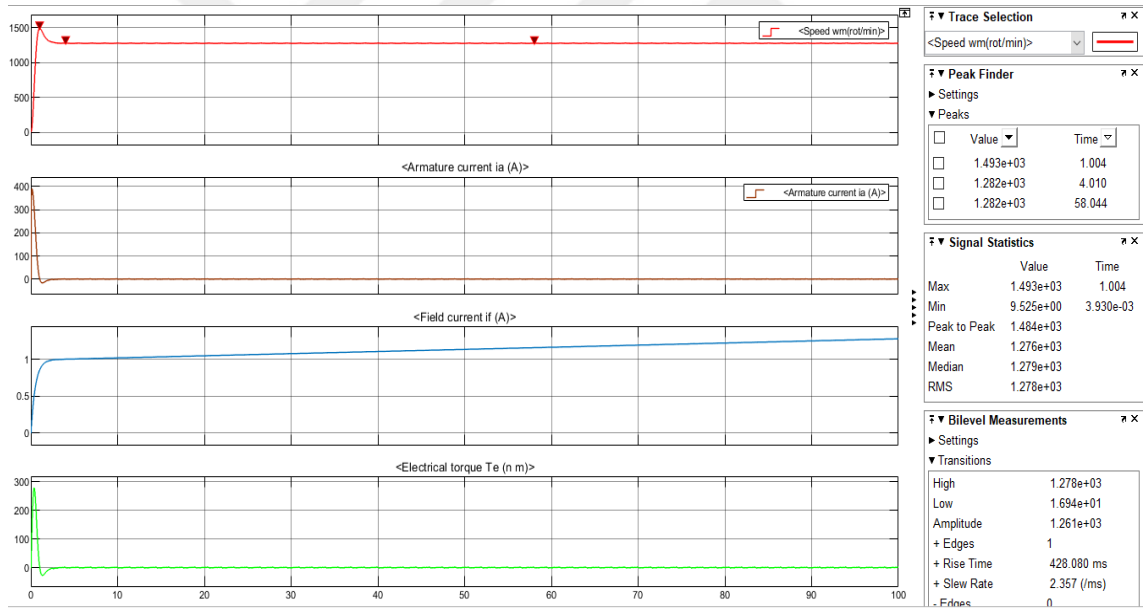
Şekil 4.11. Süper kapasitör çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA13b)

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de 0 ile 2. saniye arasında süper kapasitörün şarj seviyesi %100'den %97'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Süper kapasitör 2. saniyeden sonra süper kapasitör tekrar şarj olmaya başlamaktadır. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te, makinenin çalıştırılması çok hızlı bir şekilde gerçekleştirilmiş ve 1s'den önce 1489rpm'nin üzerinde bir hıza ulaşılmıştır. Böylece, makine 4. saniyede 1280 rpm nominal hızına ulaşmıştır. Çok hızlı başlatma ve nominal hız ile istenen optimum çalışma 4s olarak elde edilir. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te başlangıçtaki yük kapasitesi %97'ye düşene kadar süperkapasitörün $t=0s$ ve $t=1s$ arasında çok hızlı bir deşarjı gözlenmiştir. Daha sonra 2. saniyenin sonunda, sistem DC/DC boost dönüştürücüsünün çıkışı aracılığıyla beslendiğinden normal bir tekrar şarj gerçekleşmiştir. Bu hızlı deşarj, DC Makinenin nominal hızına çok hızlı bir şekilde ulaşmak için başlangıçta talep ettiği yüksek güç talebini karşılar.

Bu bölümde, süper kapasitörün, şarj edildiğinde DC makinenin yüksek güç yoğunluğunun çok hızlı talebini karşılamak için ideal bir unsur olduğunu görebiliriz. Uzun süreli ışımaya fonksiyonu ile fotovoltaik panel DC makinesinin uzun süreli enerji talebini karşılamak için uygundur. İyi bir ışımaya sahip bağımsız güneş enerji sistemindeki süper kapasitör, DC makinesinin en iyi şekilde çalışmasını hızlı bir şekilde elde edilmesini sağlayabilir. Yüksek güç yoğunluğu ve çok hızlı deşarj imkânı veren süper kapasitör, DC makinesinin hızlı başlatma ihtiyaçları için uygundur. DC makine kayıt altına alınan sürede nominal bir hıza ulaşmayı başarmıştır.



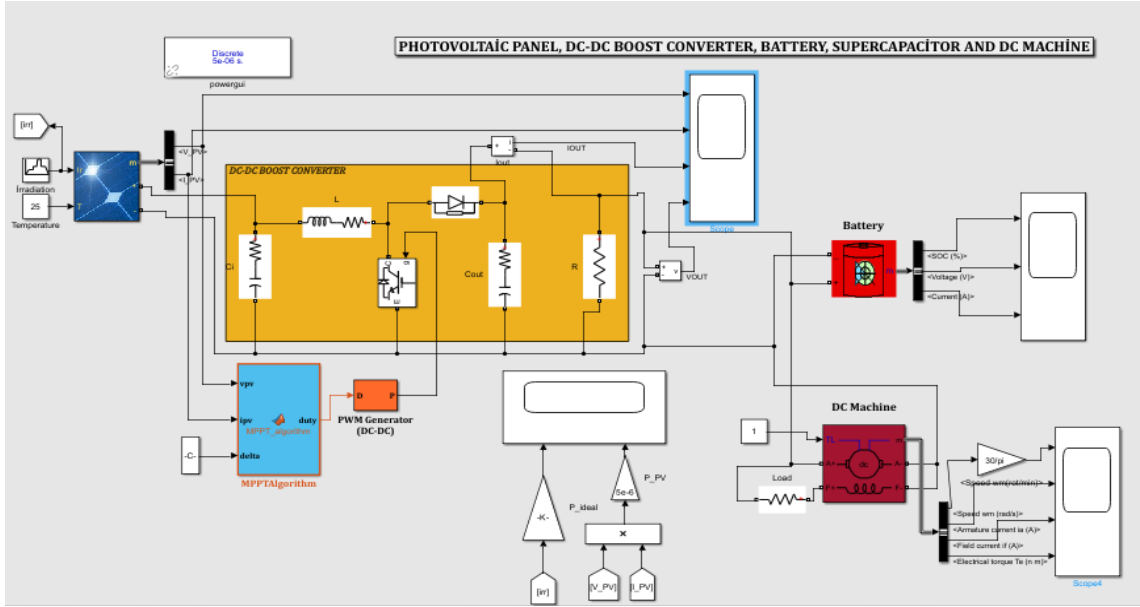
Şekil 4.12. DC makine çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA14a)



Şekil 4.13. DC makine çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA14b)

4.2. Fotovoltaik enerji depolama sisteminde pil etkileri

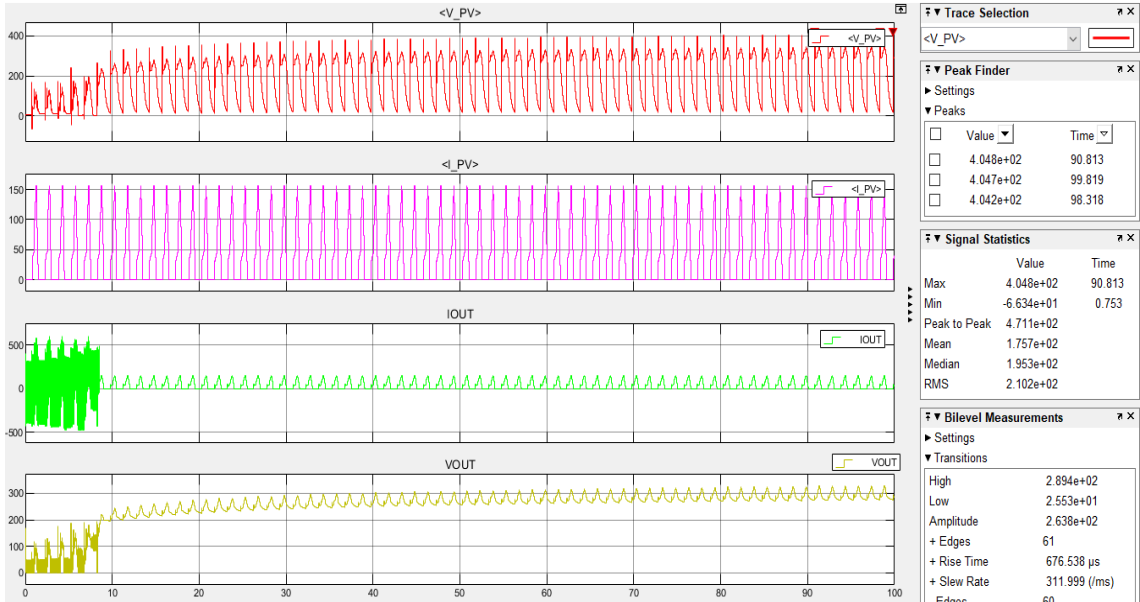
İkinci simülasyon yapısında, yalnızca pil enerji depolaması Şekil 4.14'te gösterildiği gibi DC makinesine paralel bağlanmıştır.



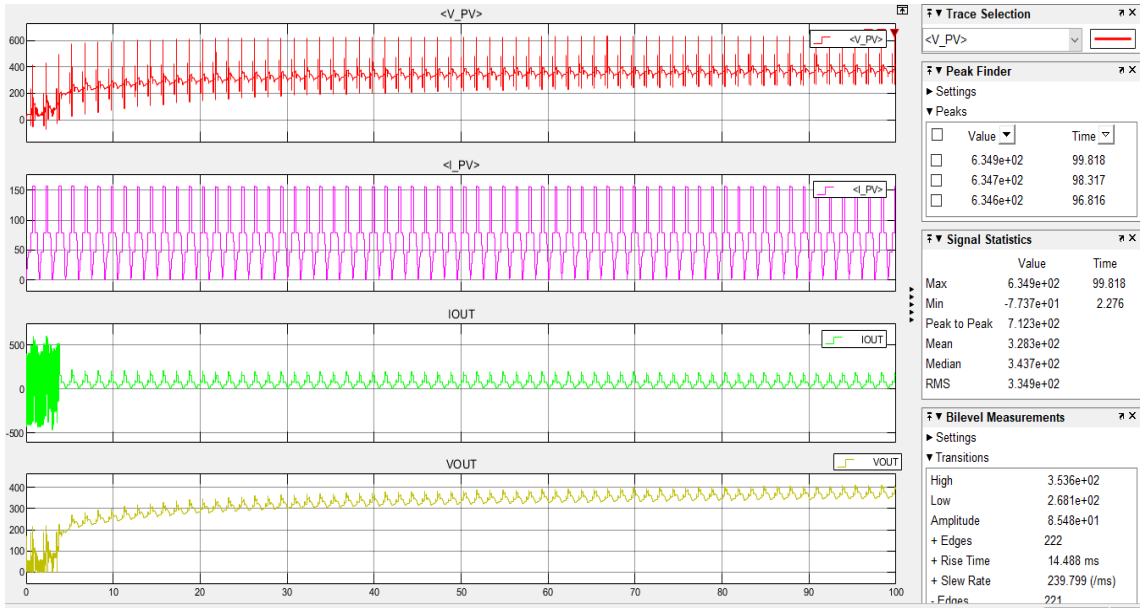
Şekil 4.14. DC makinesi ve pilli enerji depolama sistemine bağlı bağımsız bir PV panel (EA15)

4.2.1. Pilin SOC değeri %0 iken

Güneş panelinin elde edilen voltajı, akım dalga biçimi ve bunların çıkışları Şekil 4.15 ve 4.16'da gösterilmektedir.

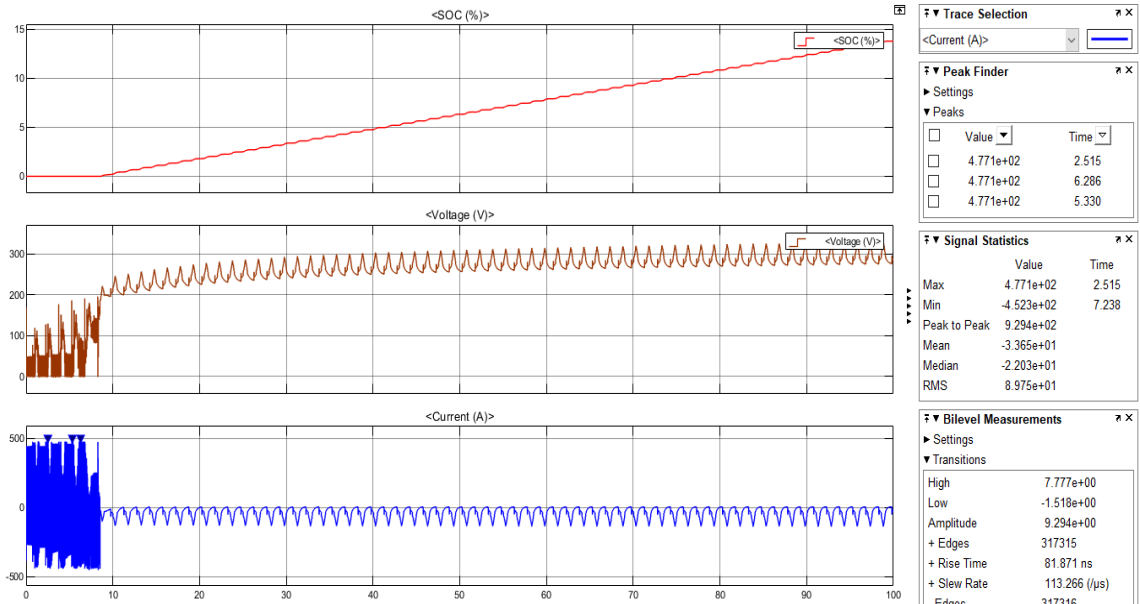


Şekil 4.15. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (kötü aydınlanmada) (EA16a)

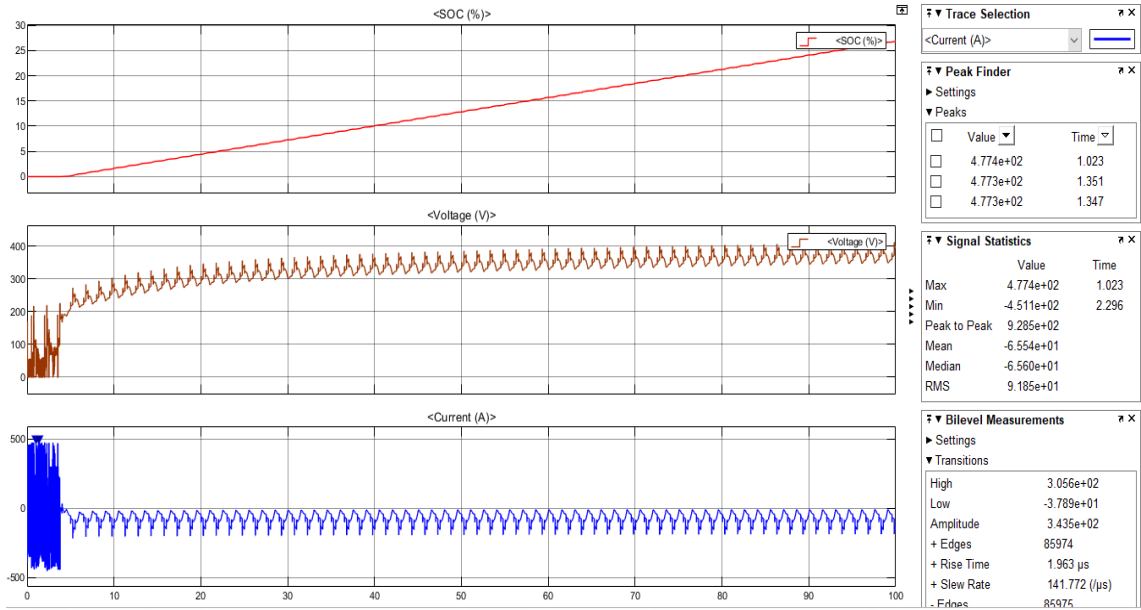


Şekil 4.16. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (iyi aydınlanmada) (EA16b)

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da görüldüğü gibi sistemin 1 ile 10. saniyeleri arasında V_OUT üzerinde 0 ile 150V arası bir gürültü gözlenmiştir. Bu voltaj değerleri DC/DC boost dönüştürücünün DC makinanın ve pilin şarj ihtiyaçlarını karşılamaya çalıştığını göstermektedir. Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 da görülen çıkışlar arasındaki farkın sebebi ışığa farklılığıdır.

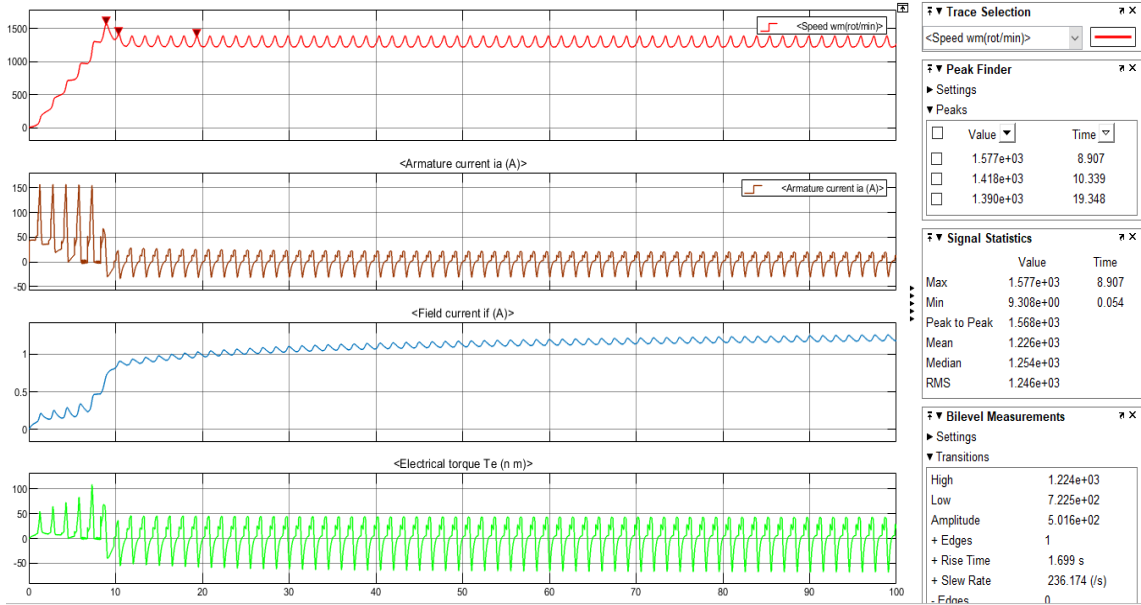


Şekil 4.17. Batarya çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA17a)

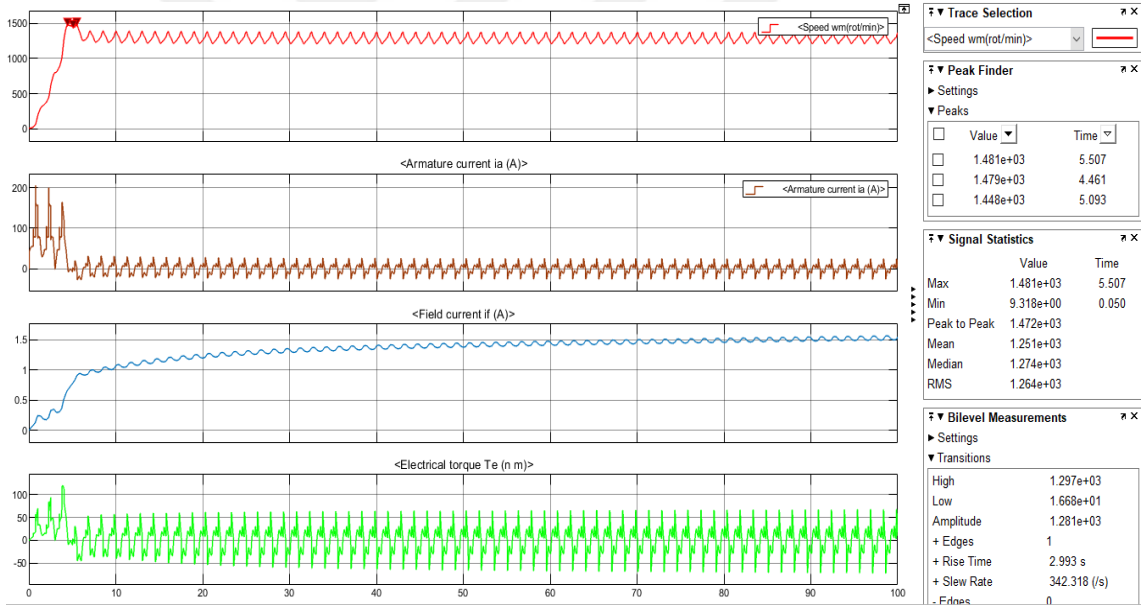


Şekil 4.18. Batarya çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA17b)

Pilin SOC değeri, Şekil 4.17'de $t=0-10$ sn arasında sıfırda kalırken, Şekil 4.18'de, sadece $t=0-5$ sn arasında sıfırda kalmaktadır. Şekil 4.17 için 10. saniyeden itibaren Şekil 4.18 için ise 5. saniyeden itibaren pillerin şarj olduğu gözlenmektedir. Şarj işlemi, Şekil 4.17'de yaklaşık $0,14/s$ ve Şekil 4.18'de $0,28/s$ 'lik bir hızla gerçekleşmektedir. Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de, makinenin başlatılması sarsıntılı bir formda gerçekleştirilmiş ve 3 saniye sonra 1481 rpm'nin üzerinde bir hıza ulaşılmıştır. Makine sarsıntılı hız dalga formundan bağımsız olarak, nominal dönme hızı 1280rpm'e, 12. saniyeden sonra ulaşmıştır. Nominal hıza 12 saniyede ulaşılmıştır, ancak motor devri 150 rmp'lik testere dişi şeklinde dalgalanmaktadır. DC makinenin çalışması boyunca testere dişi şeklinde hız değişimi gözlenmiştir.



Şekil 4.19. DC makine çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA18a)

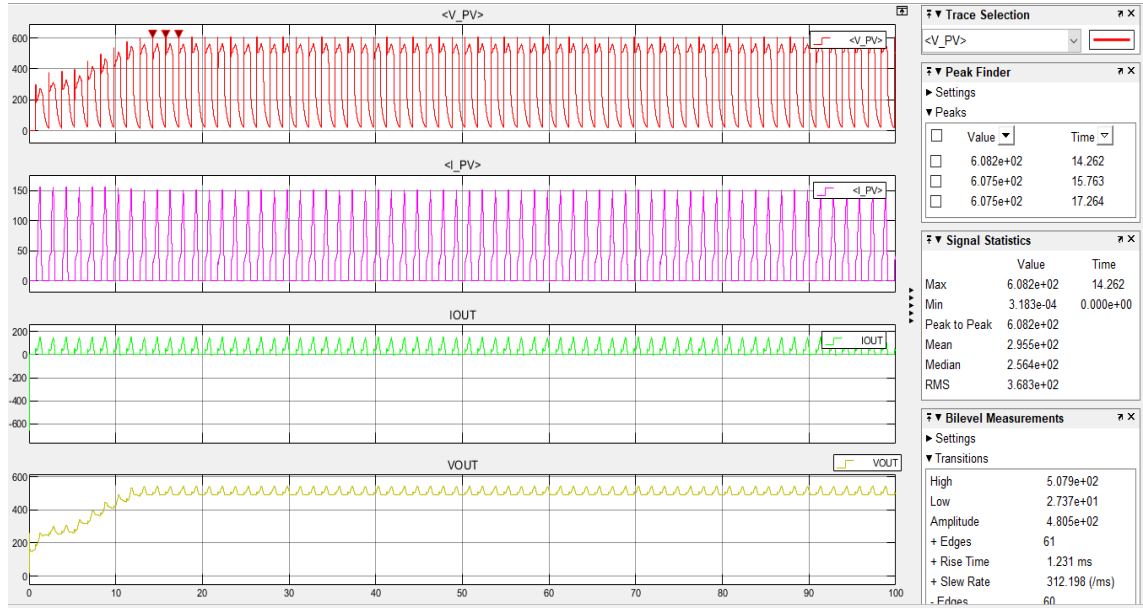


Şekil 4.20. DC makine çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA18b)

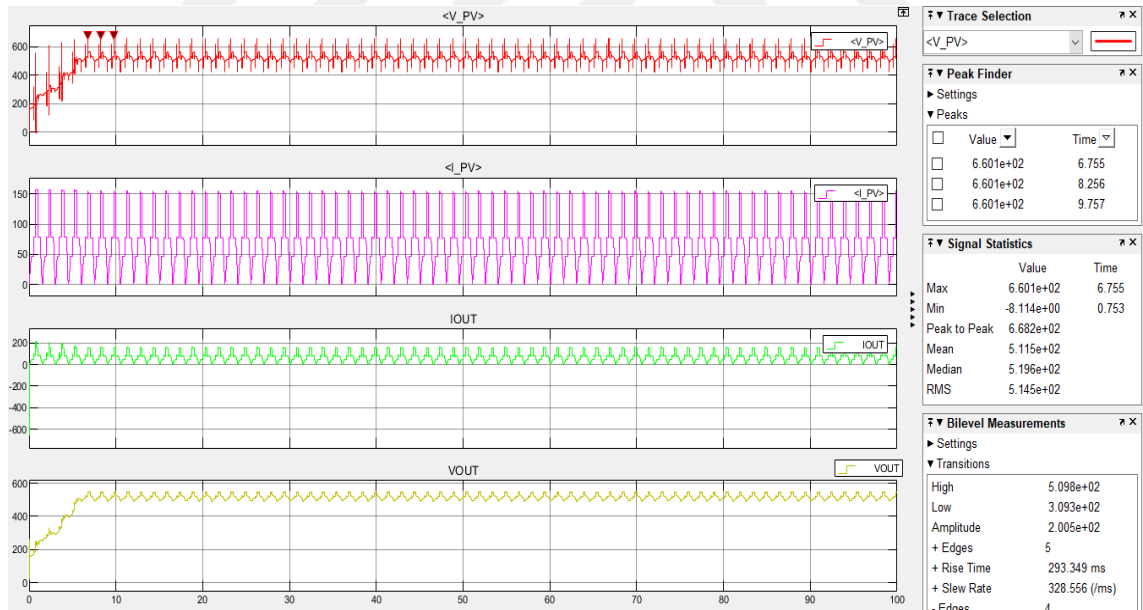
Bu bölümde yapılan gözlem, hiç şarjı olmayan pilli enerji depolama sistemi ve tek başına bir PV panelin, başlangıçta DC makinenin yüksek güç yoğunluğunun çok hızlı talebini karşılamak için ideal bir kombinasyon olmadığıdır. Uzun süreli ışıma ile DC makinesinin uzun süreli işleyişindeki enerjisi talebinin de karşılanamadığı testere dişi hızı değişimine sahip olmasından anlaşılmaktadır.

4.2.2. Pilin SOC değeri %100 iken

Burada pil tamamen dolu iken Şekil 4.14'teki yapının performansı incelenmiştir.



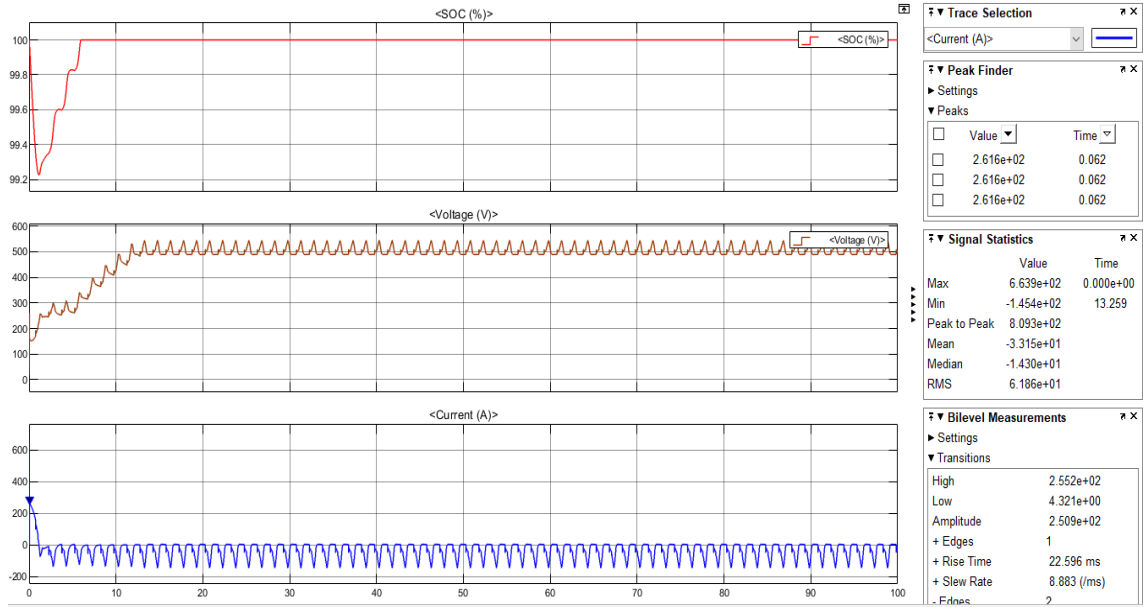
Şekil 4.21. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (kötü aydınlanmada) (EA19a)



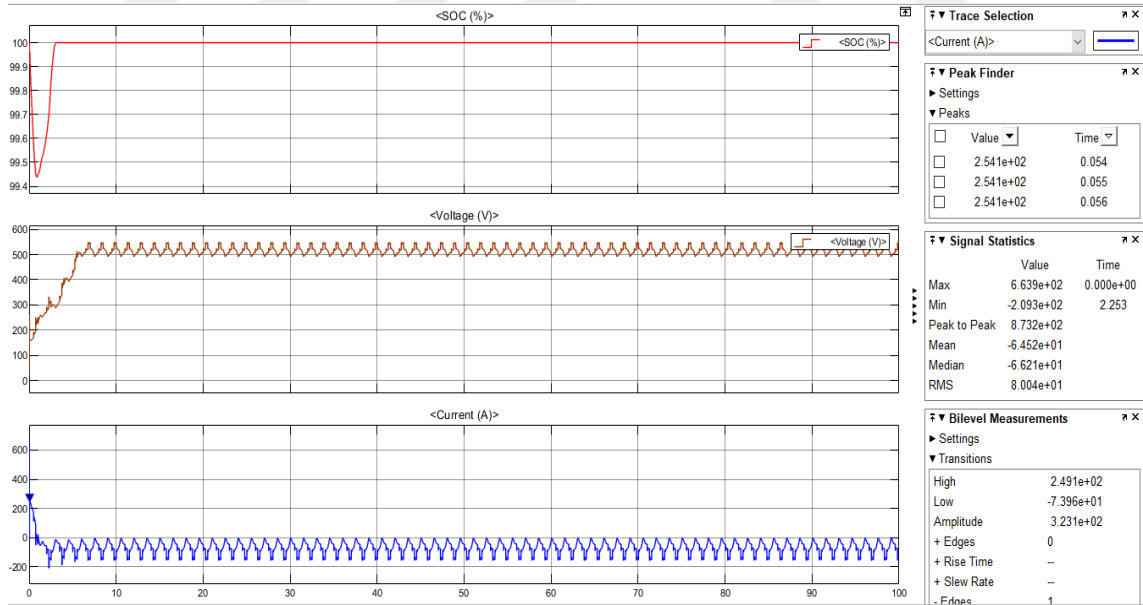
Şekil 4.22. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (iyi aydınlanmada) (EA19b)

Güneş panelinden elde edilen voltaj ve akım dalga şekli ve çıkışları Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de gösterilmiştir. Şekil 4.21 ve 4.22'de görüldüğü üzere, V_OUT çıkış voltajının eğrisinde yapılan gözlemden, 0 ile 500V aralığında 1-12. saniye arasında küçük bir testere dişi şeklinde artar şekildedir. Şekil 4.22'de, bu durumda daha iyi ışım

nedeniyle yaklaşık olarak 500V'luk kararlı çıkış voltajı, Şekil 4.21'den daha hızlı elde edilir. Bu voltaj değeri, DC/DC boost dönüştürücüsünün DC makine ihtiyacını ve pilin şarj talebini tedarik etmek için çalıştığını gösterir. Şekil 4.21 ve şekil 4.22 arasındaki küçük farklar, ışığa farkından kaynaklanmaktadır.



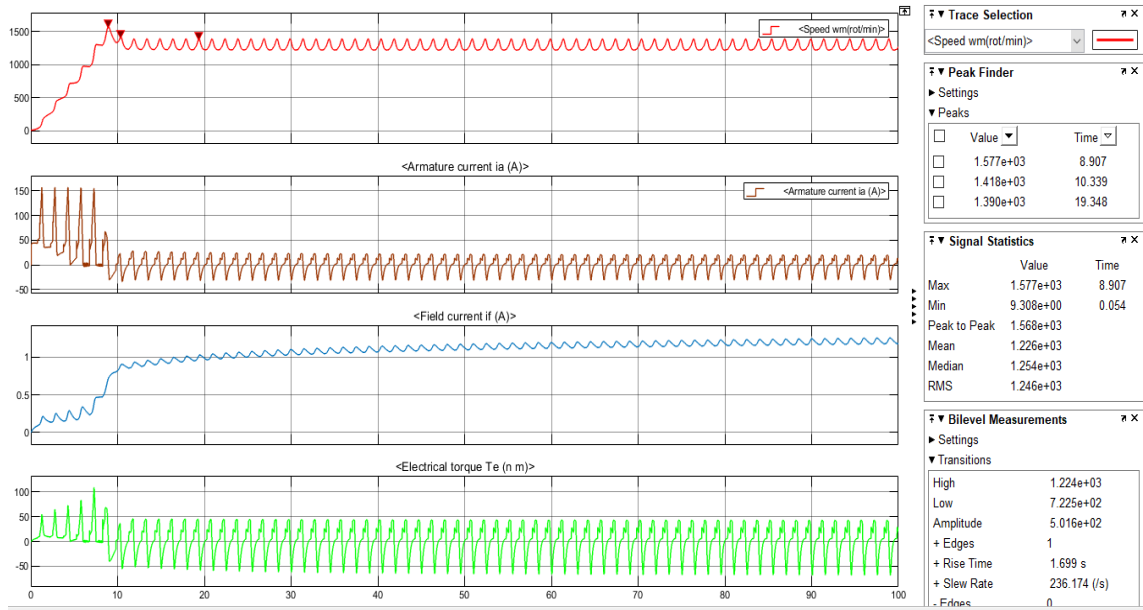
Şekil 4.23. Batarya çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA20a)



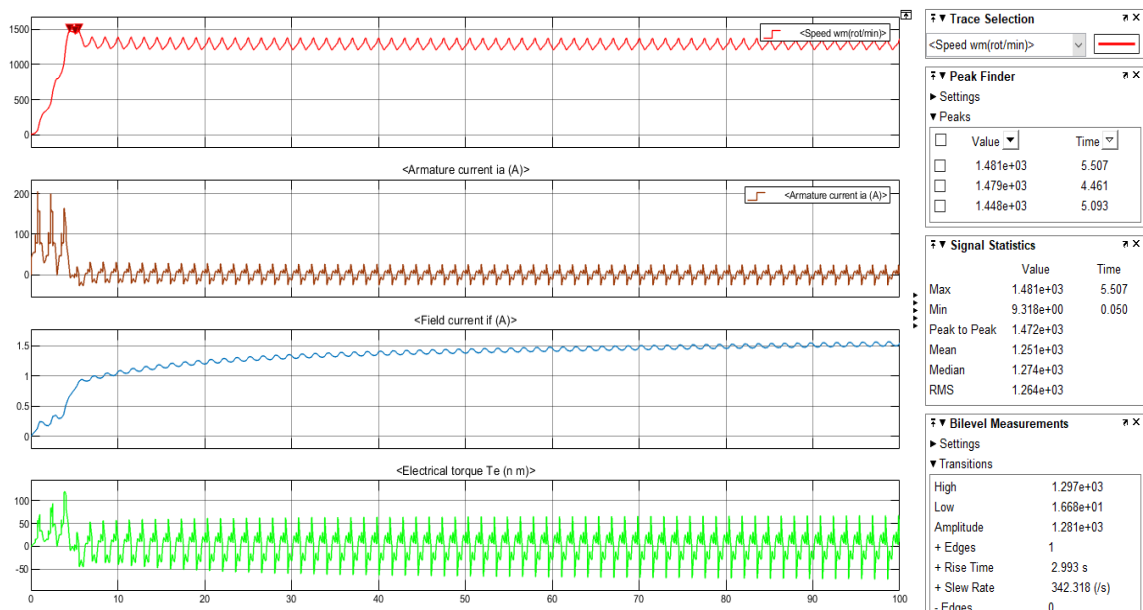
Şekil 4.24. Batarya çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA20b)

Şekil 4.23 ve 4.24'te sırasıyla $t=0-2$ sn arasında %100'den %99,2'ye ve $t=0-1$ sn arasında ise %100'den %99,45'e küçük bir deşarj gözlenir. Belirtilen zamanlardan itibaren pilin şarj olduğu gözlenir. Pilin şarj durumu aşamalı olarak artar ve Şekil

4.23'de 6. saniye sonunda ve Şekil 4.24'de 3. saniye sonunda %100'e ulaşmıştır. Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da, DC makinenin çalıştırılması çok hızlı bir şekilde gerçekleştirilmiş ve 2. saniyeden sonra 1481 rpm'nin üzerinde bir hıza ulaşılmıştır. Ancak makinenin çalışması sırasında nominal hızda testere dişi hızı gözlenir. Testere dişinin tepeden tepeye dalgalanma miktarı 150rpm'dir. DC makine, nominal hıza ulaştıktan sonra hızında testere dişi şeklinde dalgalanma olmasına rağmen düzgün çalışmıştır.



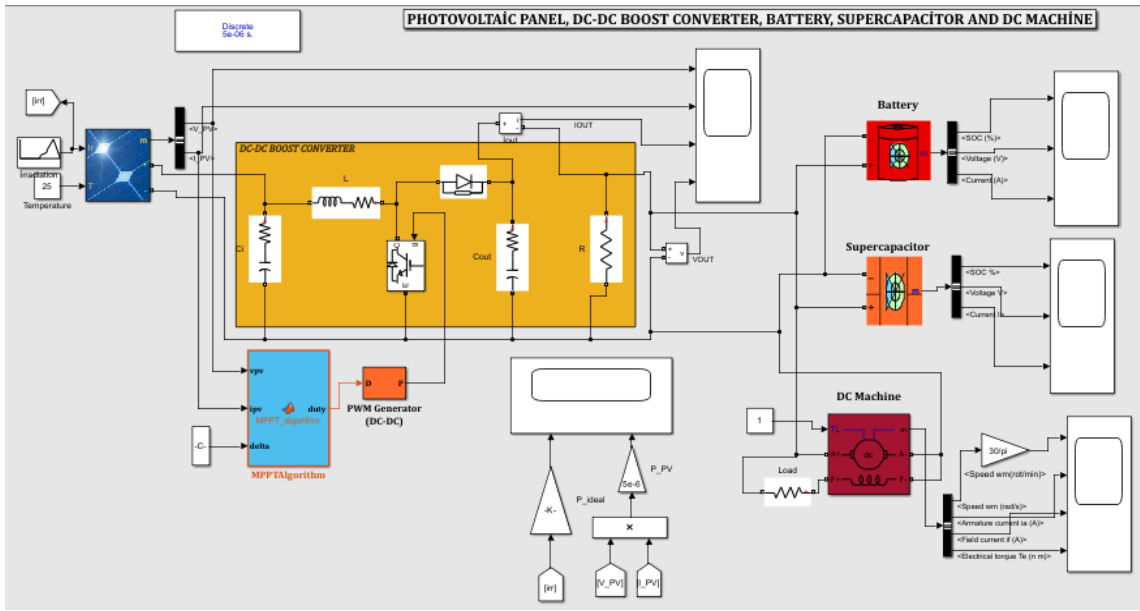
Şekil 4.25. DC makine çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA21a)



Şekil 4.26. DC makine çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA21b)

4.3. Fotovoltaik enerji depolama sisteminde süperkapasitör ve pil hibrit yapısının etkileri

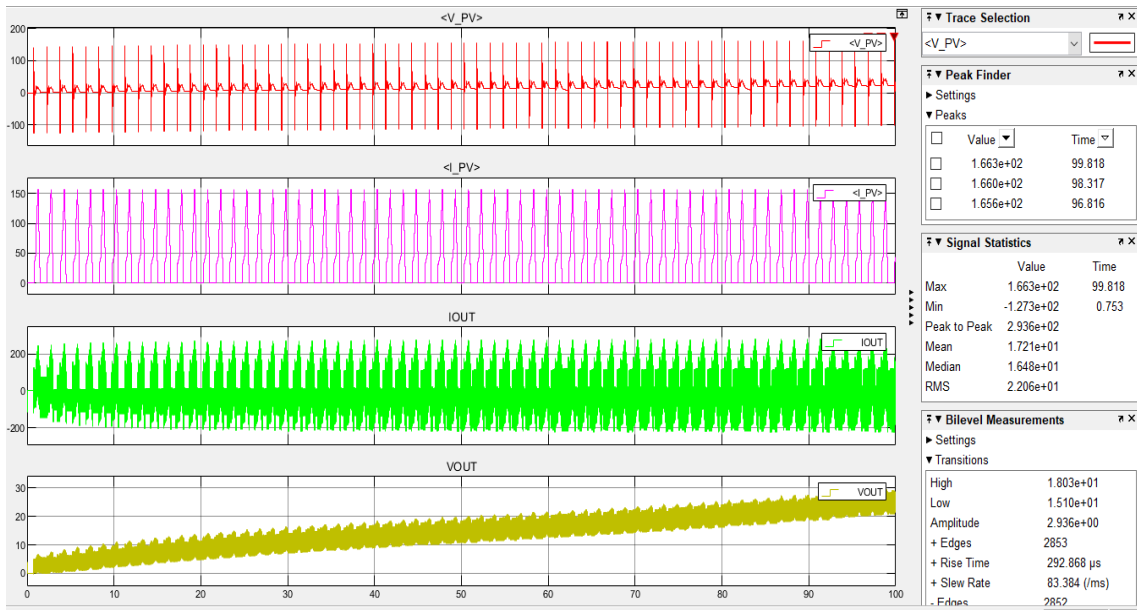
Beklentilerimizi elde edebilmek için yukarıda farklı koşullarda sistemin simülasyonu verilmiştir. Buradaki simülasyonda süper kapasitör, pil ve DC makine Şekil 4.27'de gösterildiği gibi birbirlerine paralel olarak bağlanmıştır. Daha sonra pil ve süper kapasitörün farklı şarj durumlarında sistemin tepkisi incelenmiştir.



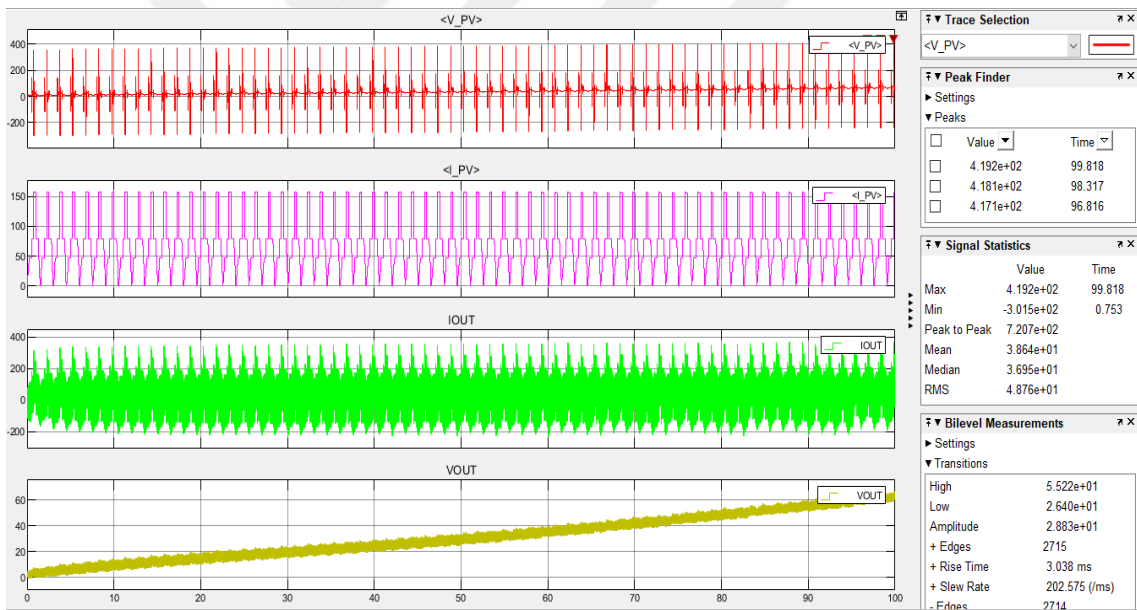
Şekil 4.27. DC makinesi ve pilli enerji depolama sistemine bağlı bağımsız bir PV panel (EA22)

4.3.1. Süper kapasitör nominal voltajı 0V ve pil SOC %0 iken

Güneş panelinin terminal voltajı, akım dalga formu ve çıkışları Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da gösterilmektedir. Önerilen MPPT algoritmasının basamak boyutu 6 saniyeye ayarlanmıştır, bu da 6 saniyede bir yenilenmiş voltaj referansının verildiği ve sonuç olarak voltaj dalga formunun merdiven benzeri olduğu anlamına gelir.

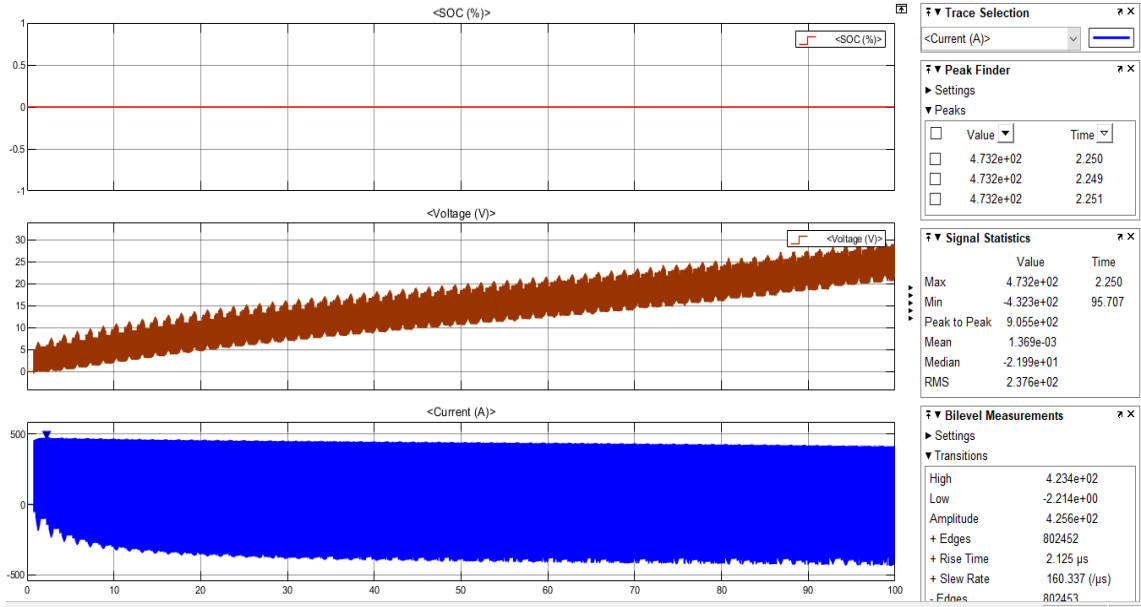


Şekil 4.28. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (kötü aydınlanmada) (EA23a)

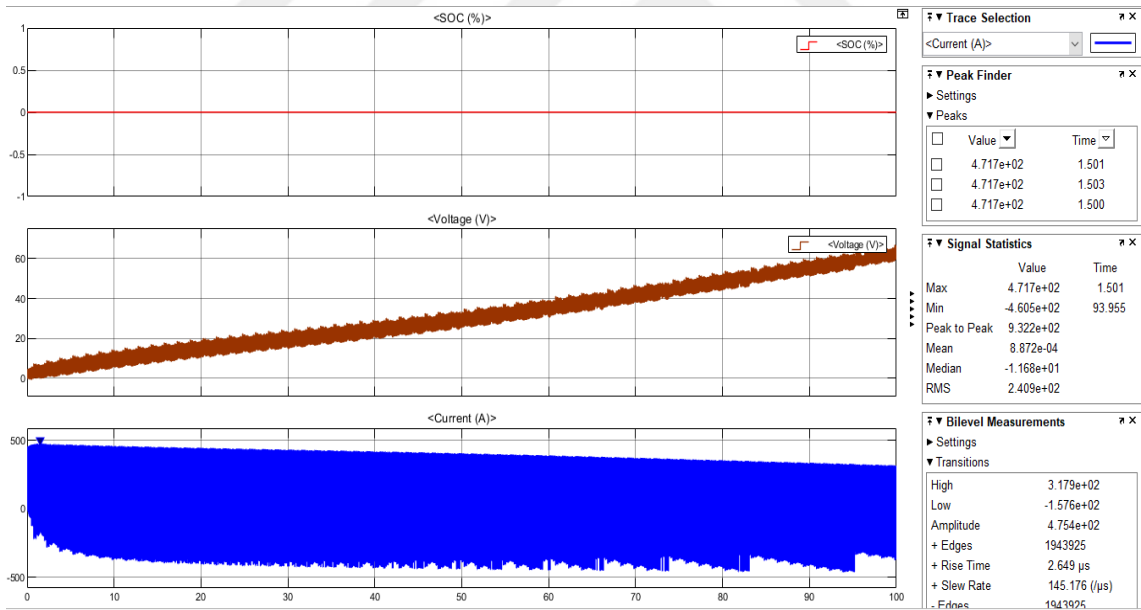


Şekil 4.29. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (iyi aydınlanmada) (EA23b)

Akü ve süper kapasitör, Şekil 4.27'de gösterildiği gibi paralel bağlanmıştır. DC/DC boost dönüştürücüsünün kayıpsız ideal olduğu kabul edilmiştir. DC-bus gerilimi V_{OUT} , Şekil 4.28'de, yaklaşık 10V gürültü ile 0,3V/s ve Şekil 4.29'da da 5V gürültü ile 0,6 V/s hızla artmaktadır. 100. saniyede V_{OUT} , Şekil 4.28'de yaklaşık 30V ve Şekil 4.29'da 60V'dur. Bu çok zayıf ve parazitli voltaj durumunda pil şarj edilememektedir ve pilin SOC değeri %0'da kalmıştır. Pilin güç sistemi, Şekil 4.31 ve 4.32'de görüldüğü gibi şarj olmamaktadır.



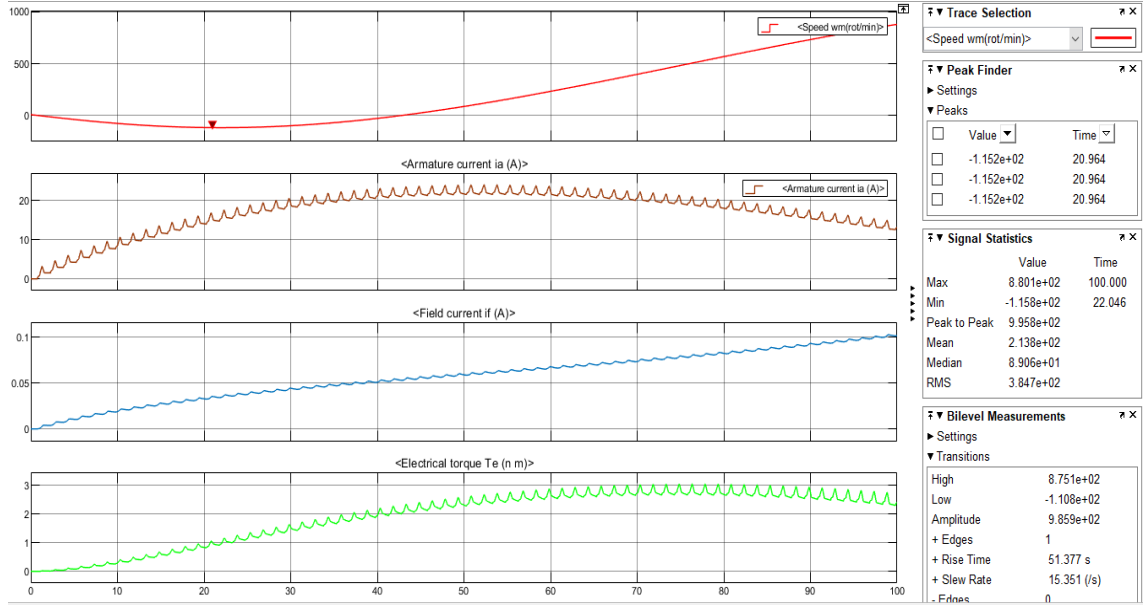
Şekil 4.30. Batarya çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA24a)



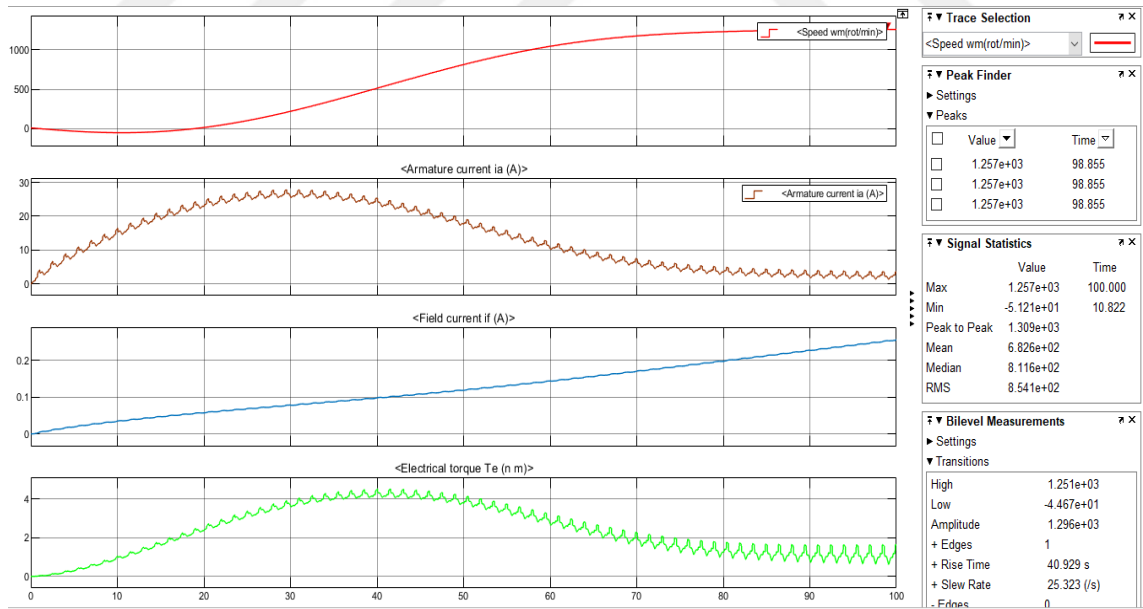
Şekil 4.31. Batarya çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA24b)

Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te, makinenin minimum çalışma voltajı ne bataryadan ne de süper kapasitörden sağlanamadığından, makinenin hızı sıfıra düşer, bu nedenle V_OUT çıkışı engellenir ve zayıflar. Ancak Şekil 4.32'deki 41-43. saniyeden sonra ve Şekil 4.33'teki 20. saniyeden sonra makinemizin hızı düşmeye başlar. Ancak 78 saniye sonra, makinenin hızı Şekil 4.32'de 500 rpm'yi geçer. Şekil 4.33'te daha iyi bir ışınlama

formu nedeniyle enerji arzı daha iyidir ve nominal makine hızı 80'lerden sonra elde edilir.



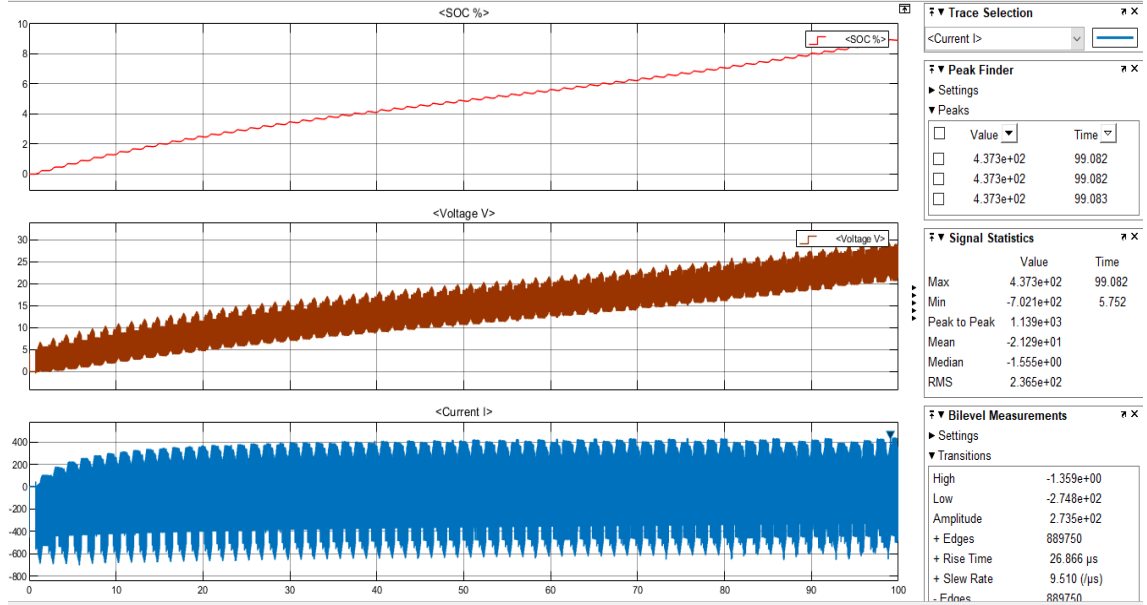
Şekil 4.32. DC makine çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA25a)



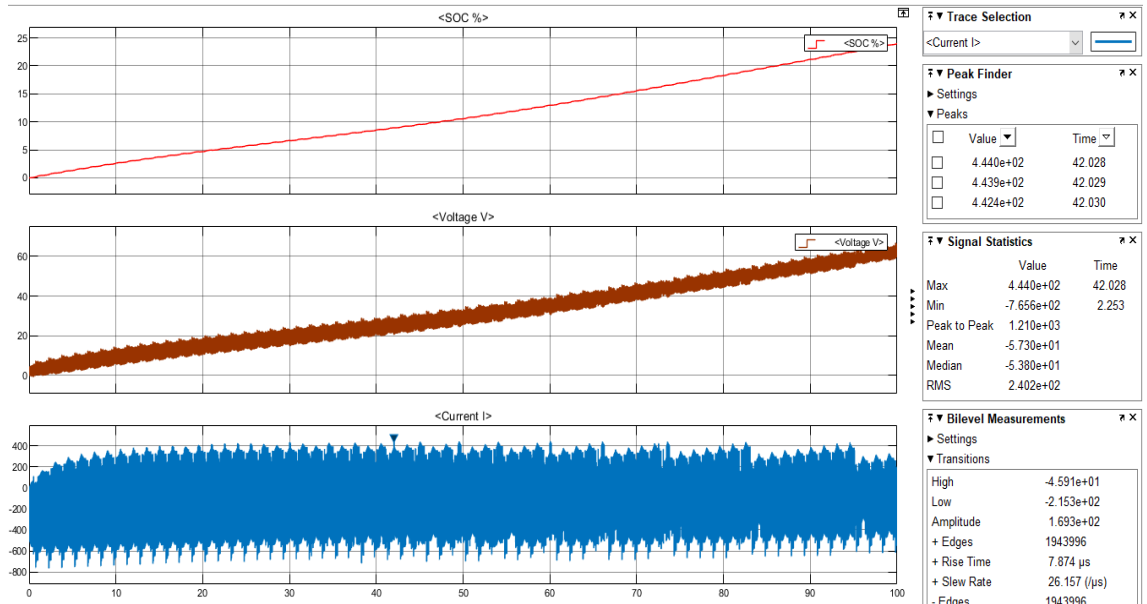
Şekil 4.33. DC makine çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA25b)

Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te süper kapasitörün akımı I_{sc} negatif aralıkta bulunduğu gözlenmiştir. Bu durum süper kapasitörün yükü beslemeye çalıştığı ancak üzerinde yeterli enerjisi olmadığı için bunu başaramadığı anlaşılmaktadır [25]. Diğer

tarafından, DC/DC boost dönüştürücüsünün V_OUT çıkışındaki düşük voltajına rağmen süper kapasitörün şarjı artmaya başlamaktadır. Süper kapasitör ağda bulunan enerjiyi emerek 100. saniyede Şekil 4.34'de %9 ve Şekil 4.35'te %23 oranında şarj olur.



Şekil 4.34. Süper kapasitör çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA26a)



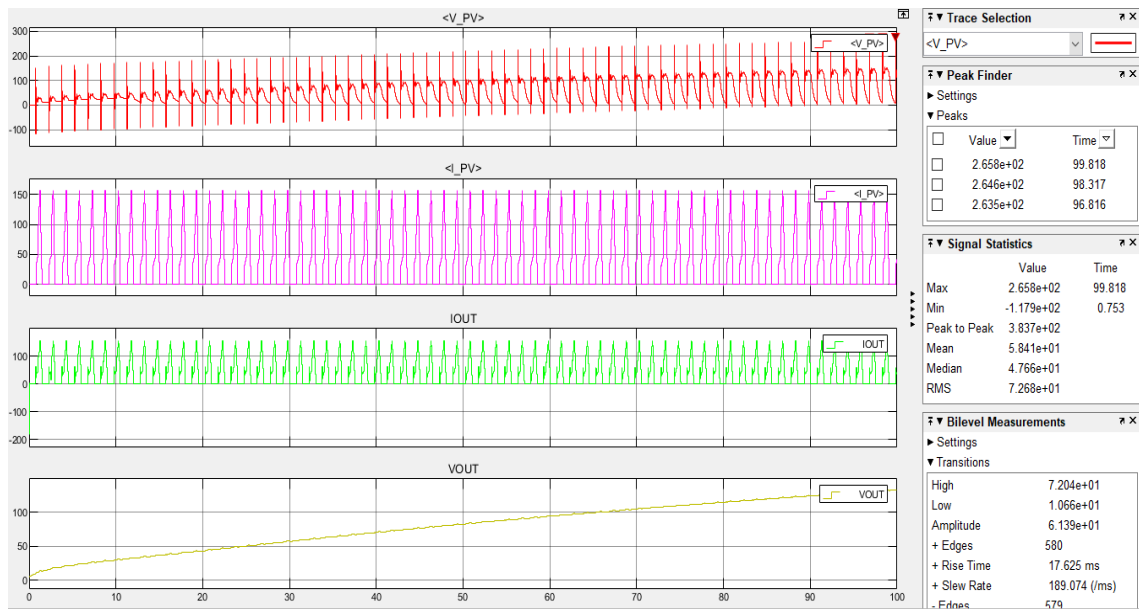
Şekil 4.35. Süper kapasitör çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA26b)

Bu bölümde, hibrit enerji depolama sistemi makinenin enerji talebini karşılamadığında DC/DC boost dönüştürücüsünün enerji tedarikçisinin rolünü oynadığı

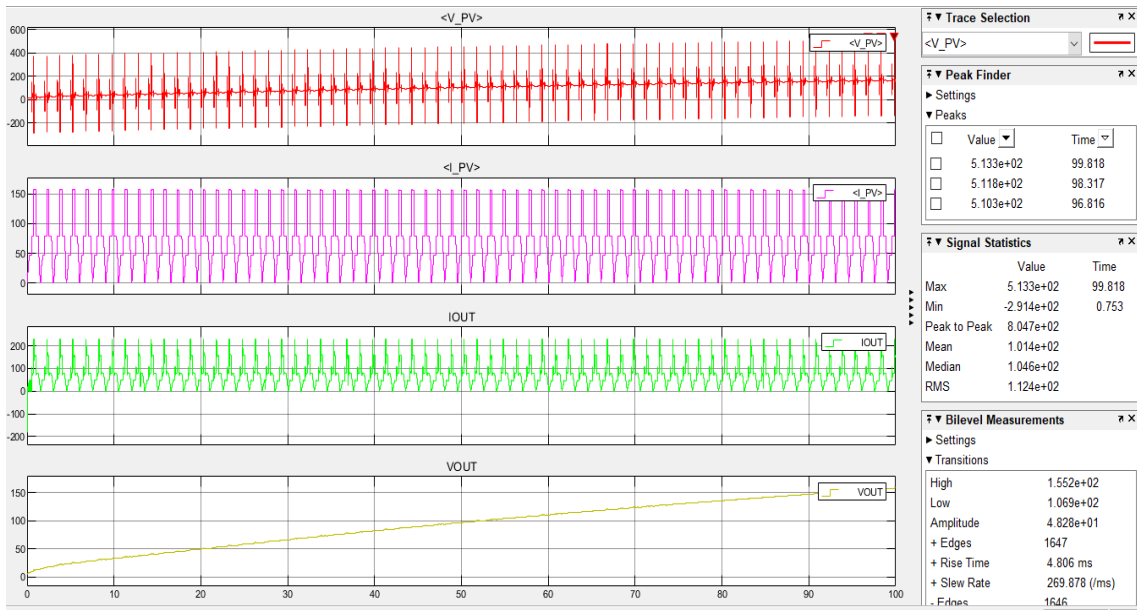
sonucuna varabiliriz. Ancak, enerji kaynağının yetersiz olduğunu gözlemleyebiliriz çünkü fotovoltaik kaynak dalgalanıyor ve kararlı değil. Sağlanan bu enerji kötü bir ışığa ile daha kötü hal almaktadır.

4.3.2. Süper kapasitör nominal voltajı 0V ve pil SOC %100 iken

PV paneli maksimum güç noktası izleme (MPPT) modunda $S=1\text{kW/m}^2$ maksimumda çalıştırılır. Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'de PV çıkışları ve sistemin çıkış voltajı (V_{OUT}) gösterilmektedir. $t=0-100\text{sn}$ arasında, V_{OUT} Şekil 4.36'da yaklaşık 0V'dan 125V'a ve Şekil 4.37'de 0V'dan 155V'a yükselmektedir.

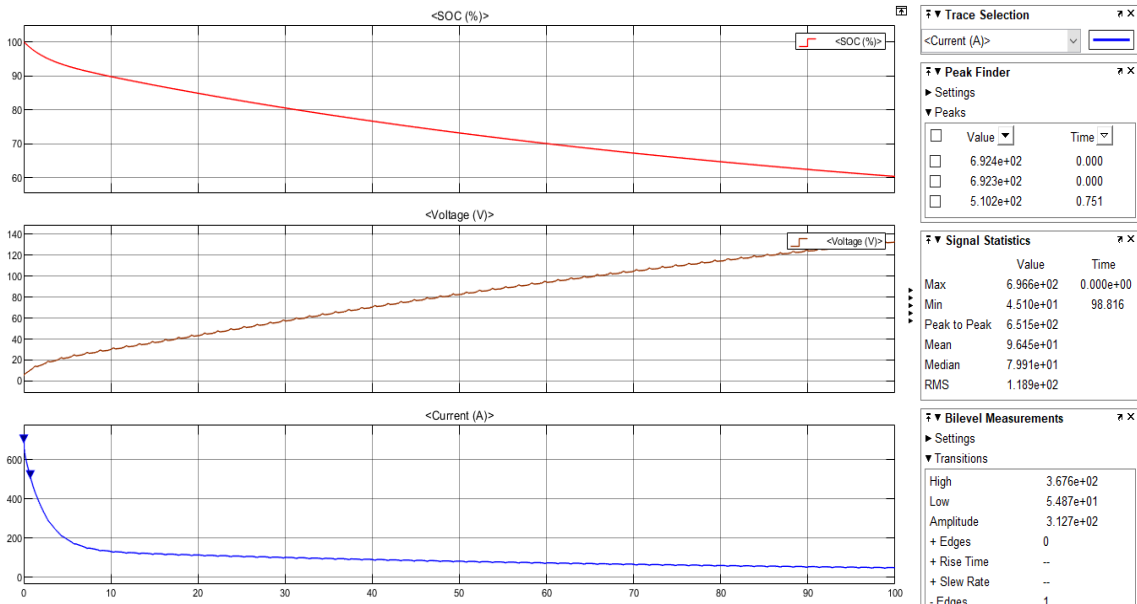


Şekil 4.36. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (kötü aydınlanmada) (EA27a)

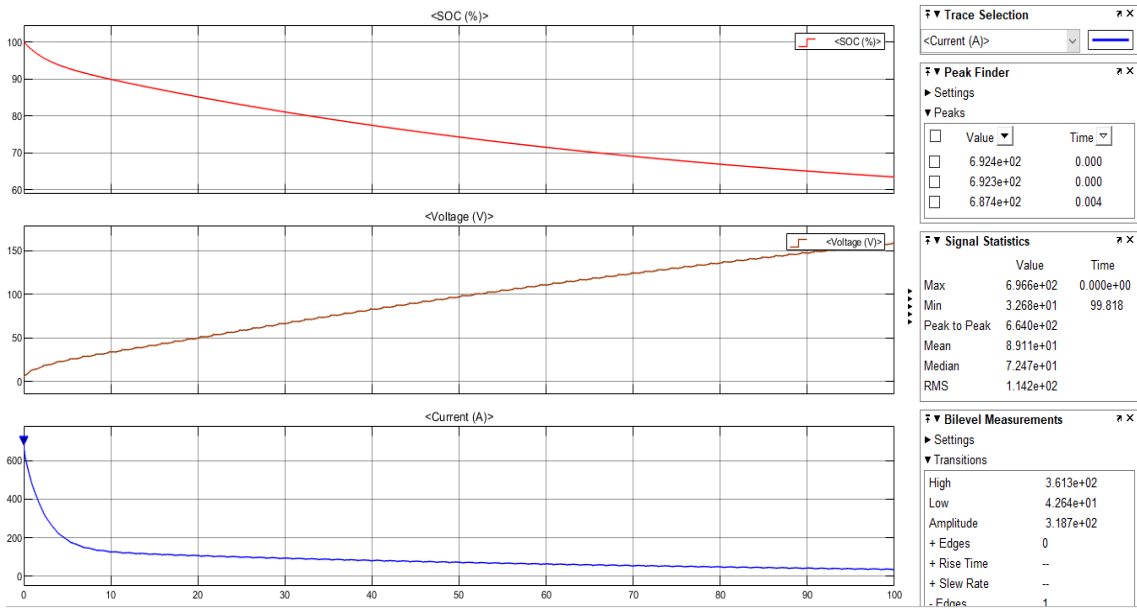


Şekil 4.37. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (iyi aydınlanmada) (EA27b)

Şekil 3.7'de görüldüğü gibi PV panel süper kapasitör, makine ve pil şarjını sağlar. DC/DC boost dönüştürücü, bu sırada çıkışları artırır. Burada bahsedilen özel batarya şarj durumunda, Şekil 4.27'de gösterildiği gibi hibrit elektrik depolama sistemi ile çalışan PV sistemi daha iyi bir V_OUT oluşturarak çıkışı 0V'dan 155V'a artırır.

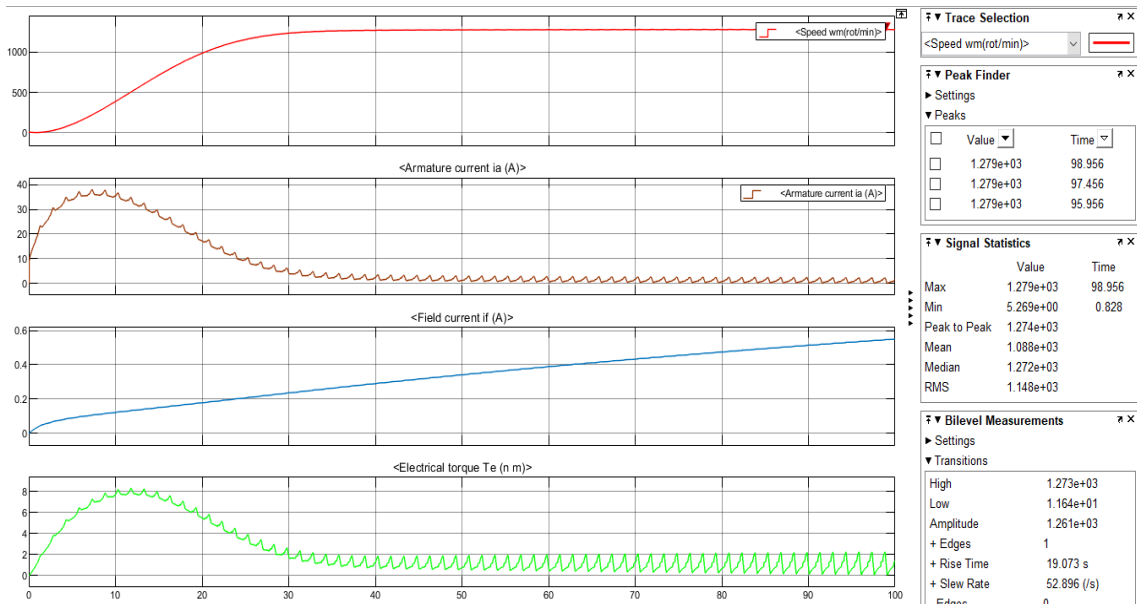


Şekil 4.38. Batarya çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA28a)

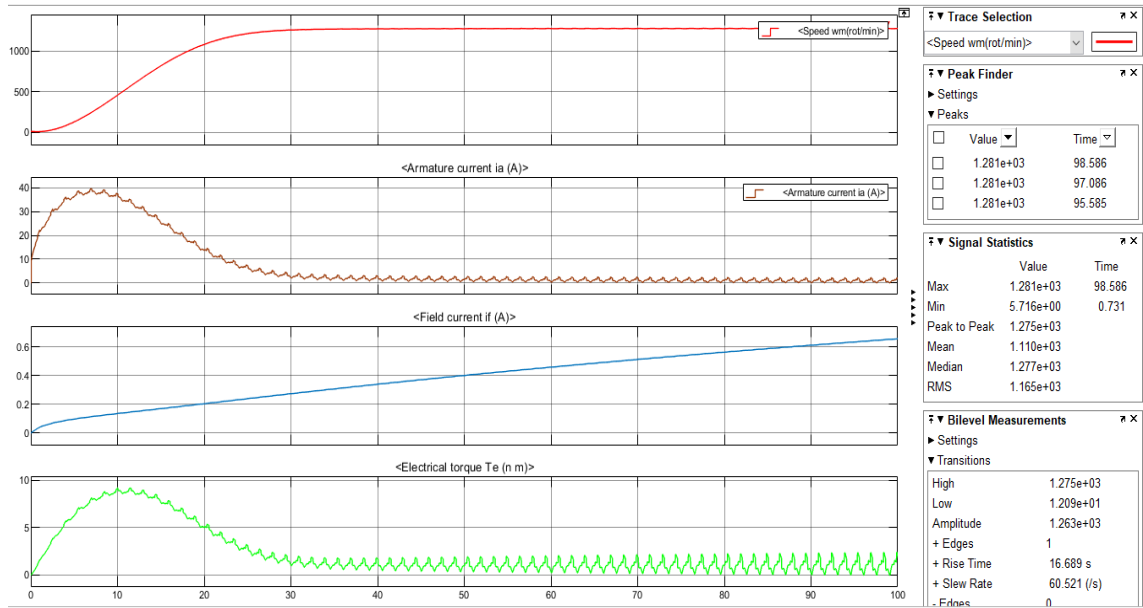


Şekil 4.39. Batarya çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA28b)

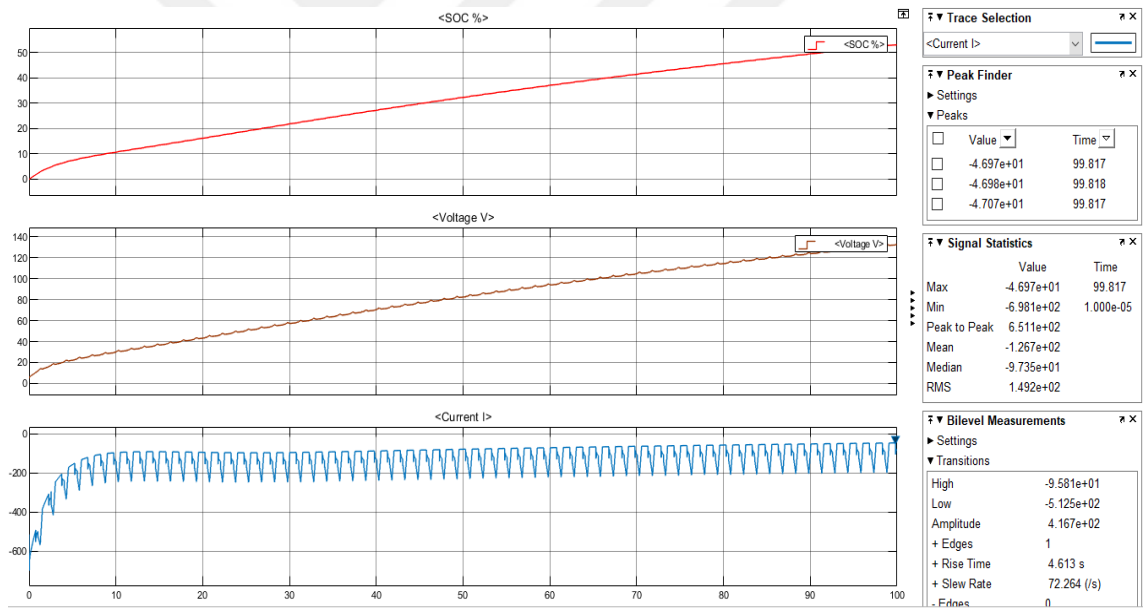
Şekil 4.38 ve Şekil 4.39'da, 1 ila 100 saniye aralığında, pilin şarj durumu %100'den, Şekil 4.39'da %64'e ve Şekil 4.38'de %60'a çok hızlı bir şekilde düşer. Buna rağmen, neredeyse 155V'a hareket eden kaynaktan gelen artan voltaj nedeniyle voltajı artar.



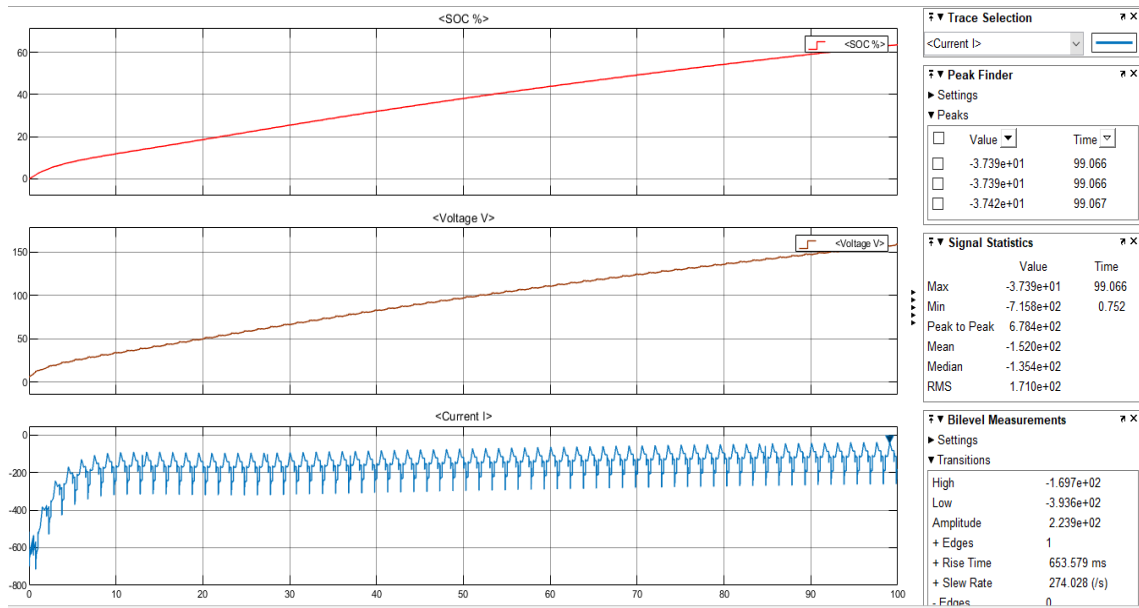
Şekil 4.40. DC makine çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA29a)



Şekil 4.41. DC makine çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA29b)



Şekil 4.42. Süper kapasitör çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA30a)

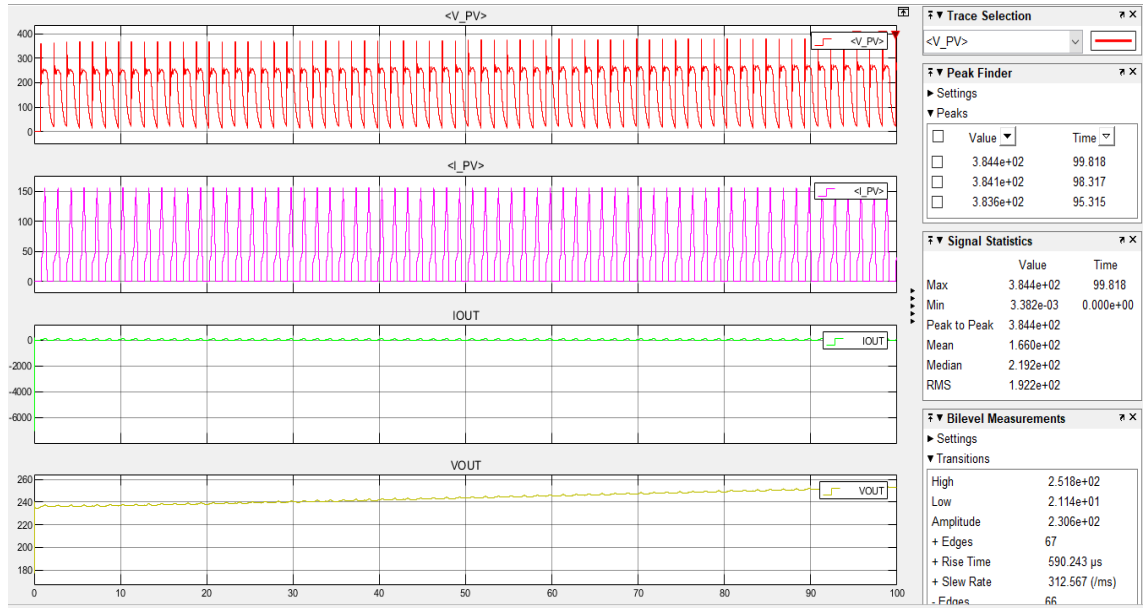


Şekil 4.43. Süper kapasitör çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA30b)

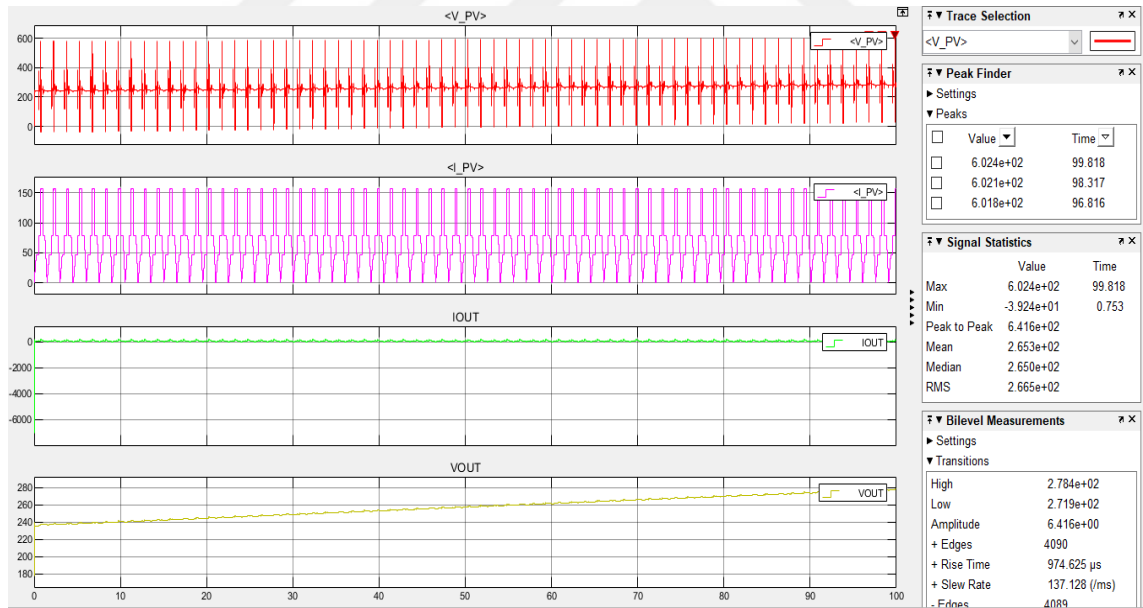
Bu durumda akü, deşarj hızından da anlaşılacağı üzere makineye gerekli çalışma enerjisini sağlayan ana kaynaktır. Şekil 4.40 ve Şekil 4.41'in bir bölümünde, makinenin nominal hızına 25 ila 30 saniye arasında ulaştığını gözlemleyebiliriz. 1 ila 30 saniye arasında 0 ila 1281 rpm arasında değişen bir hız vardır. Nominal hıza 30 saniye sonra ulaşıldığı için çok yavaş bir başlangıcı olduğu söylenebilir. Bu, pilin düşük güç yoğunluğu nedeniyle gerçekleşmektedir. Akü, bu kısımdaki makine için bir çalışma enerjisi kaynağı olarak görülmektedir. Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'te, nominal başlangıç voltajı sıfır olduğunda ve zaman $t=0$ sn olduğunda süperkapasitör makineye enerji vermez. Aniden süperkapasitör 0 ila 100. saniyeler arasında Şekil 4.42'de 53V'a ve Şekil 4.43'te 63V'a kadar şarj olur. 240V nominal gerilimde, tam şarj yaklaşık sırası ile 380sn ve 460sn olarak tahmin edilmektedir.

Bu parçadan çıkarabileceğimiz sonuç, şarj edildiğinde pilin bir süre için makinenin enerji ihtiyaçlarını özerk bir şekilde karşılayabilmesidir. Ancak akünün derin deşarjı olabilir ve makinenin çok yavaş çalıştığı gözlemlenmiştir. Bu durum en kötü ışıma ile çok daha yavaş olacaktır.

4.3.3. Süper kapasitör nominal voltajı 240V ve pil SOC %0 iken



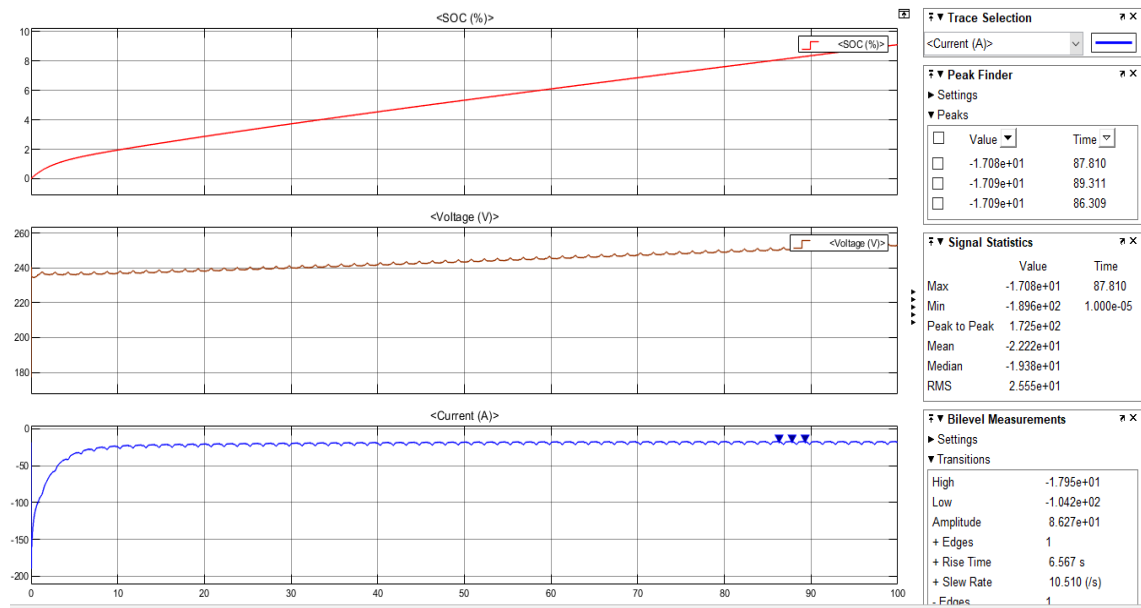
Şekil 4.44. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (kötü aydınlanmada) (EA31a)



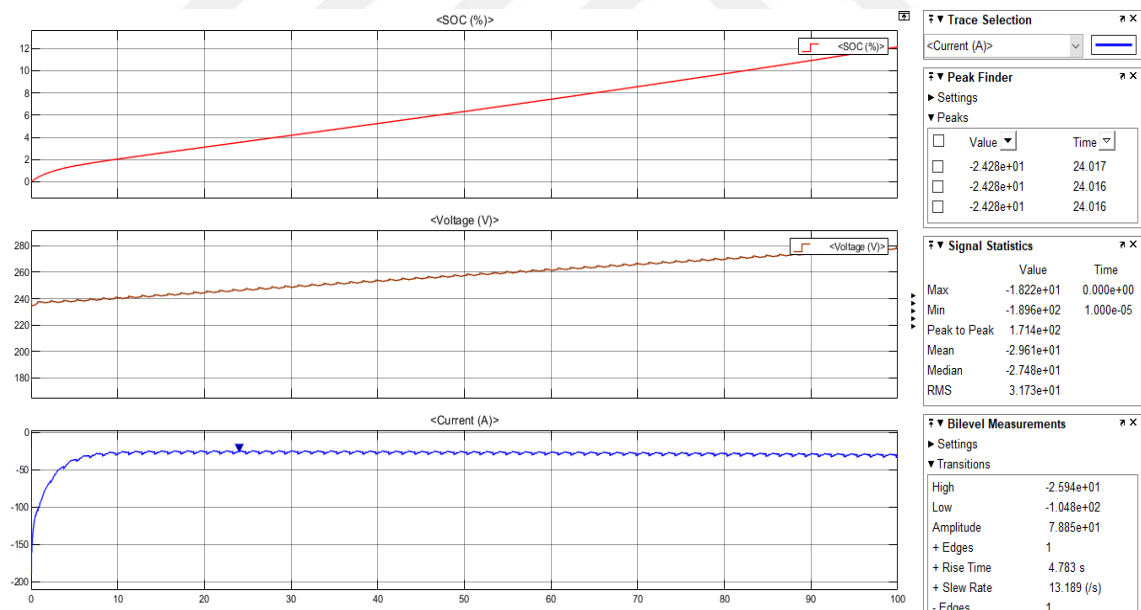
Şekil 4.45. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (iyi aydınlanmada) (EA31b)

PV panel, daha önce belirtildiği gibi maksimum güç noktası takibinde çalıştırılır. Şekil 4.44 ve Şekil 4.45, PV çıkışını ve sistemin çıkış voltajını (V_OUT) göstermektedir. V_OUT eğiminde bir artış ve t=0-100sn aralığında Şekil 4.44'te 238V'tan 256V'a ve Şekil 4.45'te 238V'tan 280V'a bir artış gözlemlenmiştir. Bu,

DC/DC boost dönüştürücüsünün enerji talebini karşılayarak normal çalıştığı anlamına gelir.

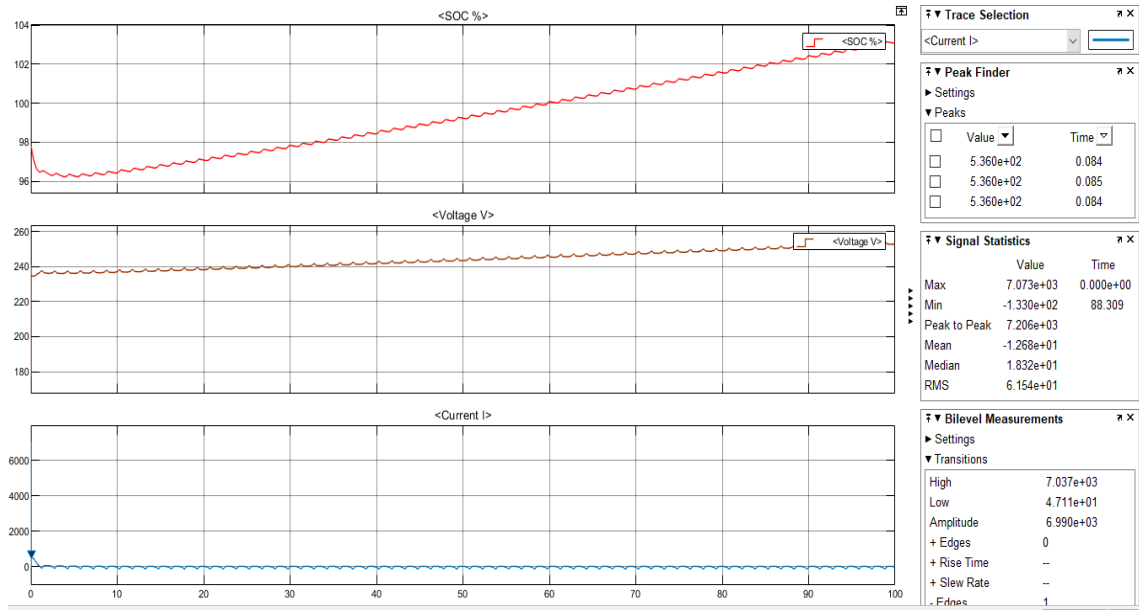


Şekil 4.46. Batarya çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA32a)

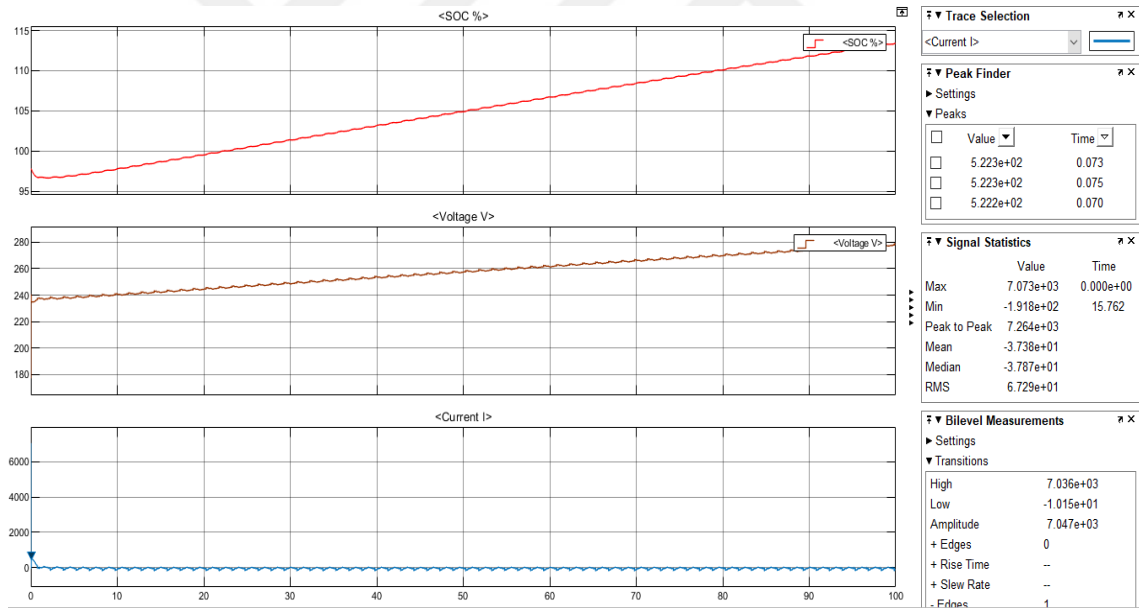


Şekil 4.47. Batarya çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA32b)

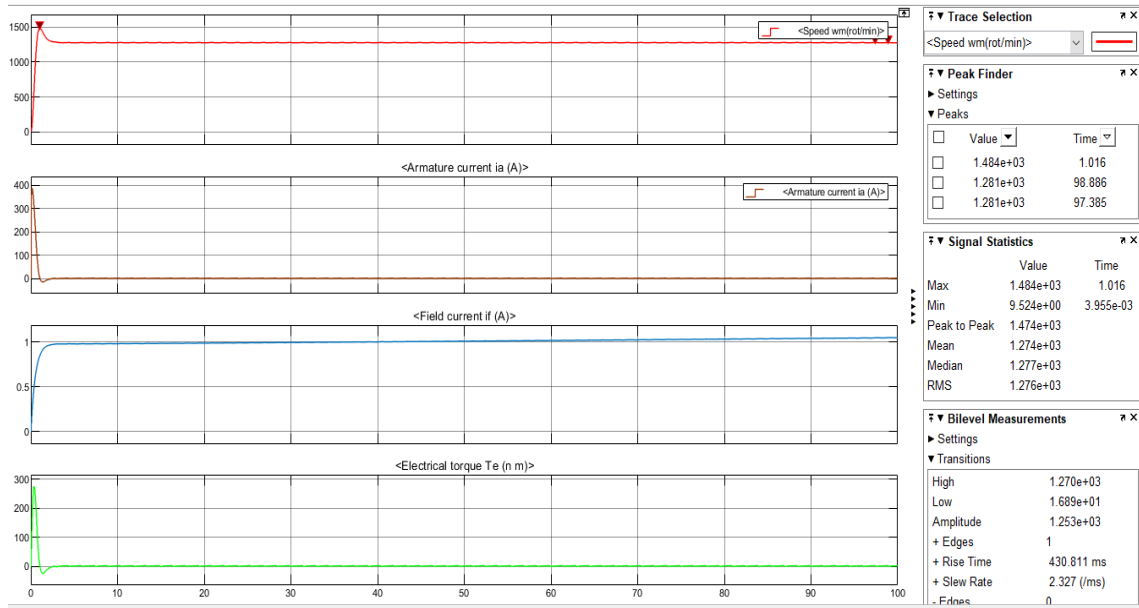
Şekil 4.46 ve Şekil 4.47'de, pil deşarj edilmeden normal şekilde şarj edilir. Böylece, yük, Şekil 4.46'da t=0-100sn arasında %0'dan %9'a ve Şekil 4.47'de %0'dan %12'ye yükselir. Bu hız ile pilin tam dolması yaklaşık 1200sn sürer.



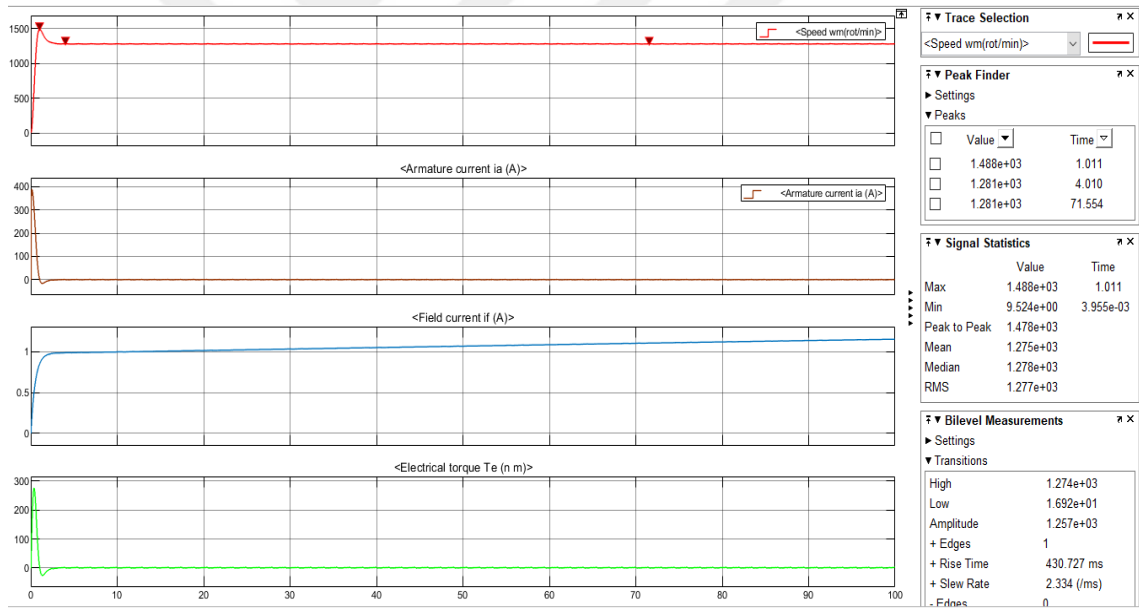
Şekil 4.48. Süper kapasitör çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA33a)



Şekil 4.49. Süper kapasitör çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA33b)



Şekil 4.50. DC makine çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA34a)



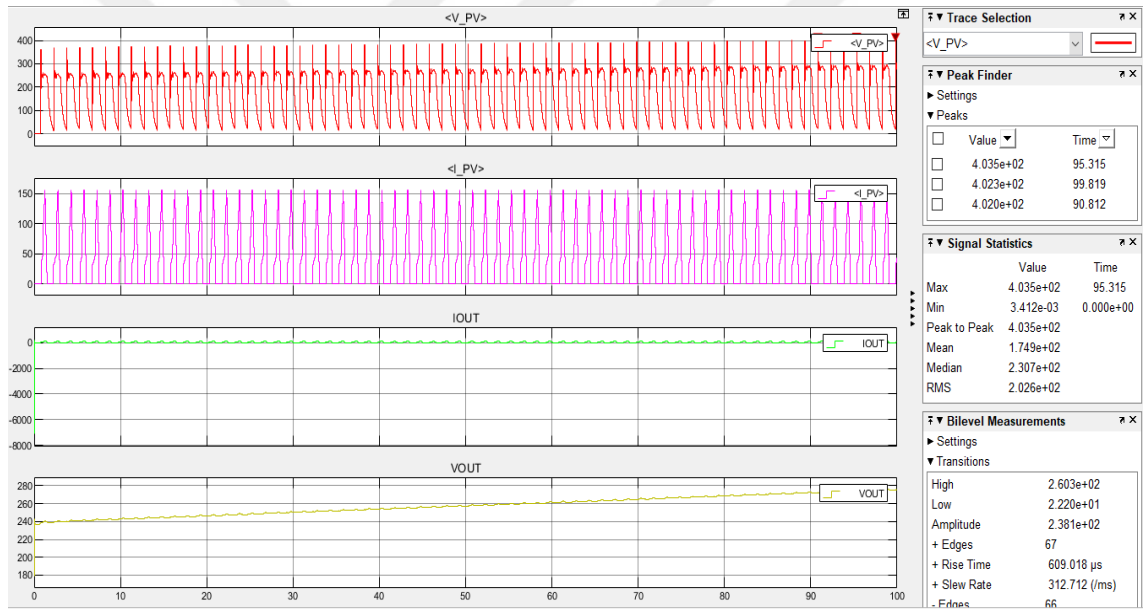
Şekil 4.51. DC makine çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA34b)

Şekil 4.50 ve Şekil 4.51'de, makinenin çalıştırılması çok hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir (Şekil 4.51'de 1,011sn ve Şekil 4.50'de 1,016s ve sadece 1s ile 1484rpm'nin üzerinde bir hıza ulaşılır). Şekil 4.50 ve 4.51'deki devir grafiği yakınlştırıldığında çok az genliğe sahip bir testere diş dikkat çekmektedir. Çok hızlı başlatma ve nominal hız 2sn de elde edilmiştir. Başlangıçta Şekil 4.48 ve Şekil 4.49 açısından, süper kapasitörde çok hızlı bir deşarj gözlenmiştir. Şekil 4.48'de %96,5'e ve Şekil 4.49'da %97'ye t=0-5sn aralığında düşmüştür. DC/DC boost dönüştürücünün DC

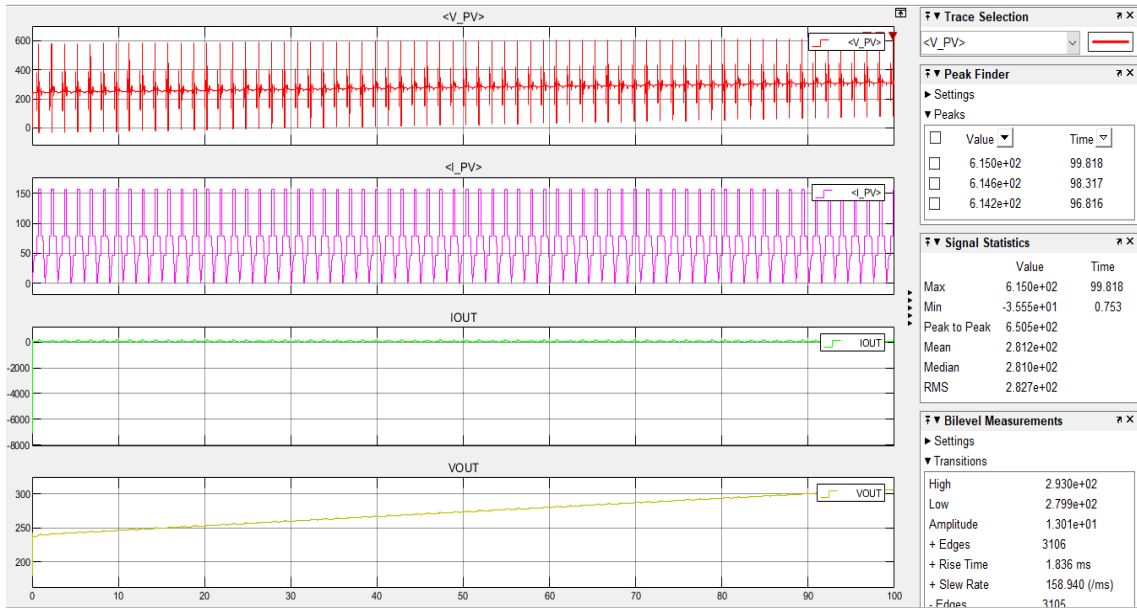
makinenin ihtiyaçlarına yetmeye başlamasından sonra 6-7 saniyenin sonunda süper kapasitör tekrar şarj olur. Bu hızlı deşarj, nominal hızına çok hızlı bir şekilde ulaşmak için başlangıçta DC makinesinin enerji yoğunluğu için yüksek talebi karşılar.

Bu bölümde, süper kapasitörün, akü tamamen boşaldığında bile, başlangıç noktasında DC makinesinin yüksek güç yoğunluğunun çok hızlı talebini karşılamak için ideal bir unsur olduğunu gözlemleyebiliriz. Yüksek güç yoğunluğu ve çok hızlı deşarj imkânı olan süper kapasitör, DC makinesinin talebini tam olarak karşılar. Makinenin başlangıcında hızlı bir şekilde nominal hıza ulaşılır. Ancak bu nominal hıza ışımanın kalitesi etki etmektedir. Makinenin hız dalga formunda çok az testere dişli gözlenmektedir.

4.3.4. Süper kapasitör nominal voltajı 240V ve pil SOC %100 iken

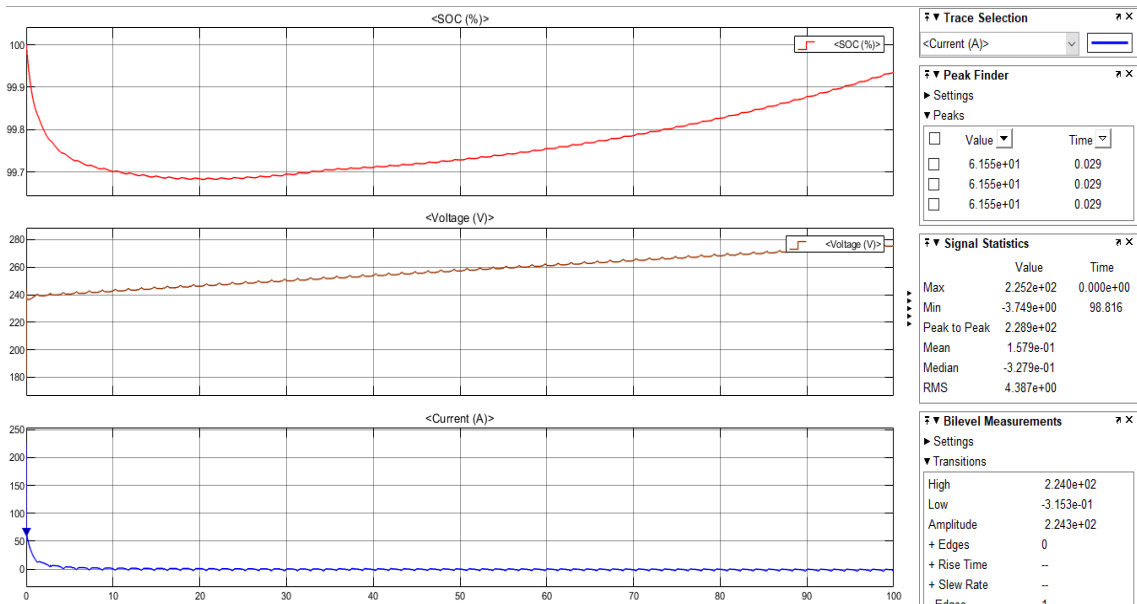


Şekil 4.52. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (kötü aydınlanmada) (EA35a)

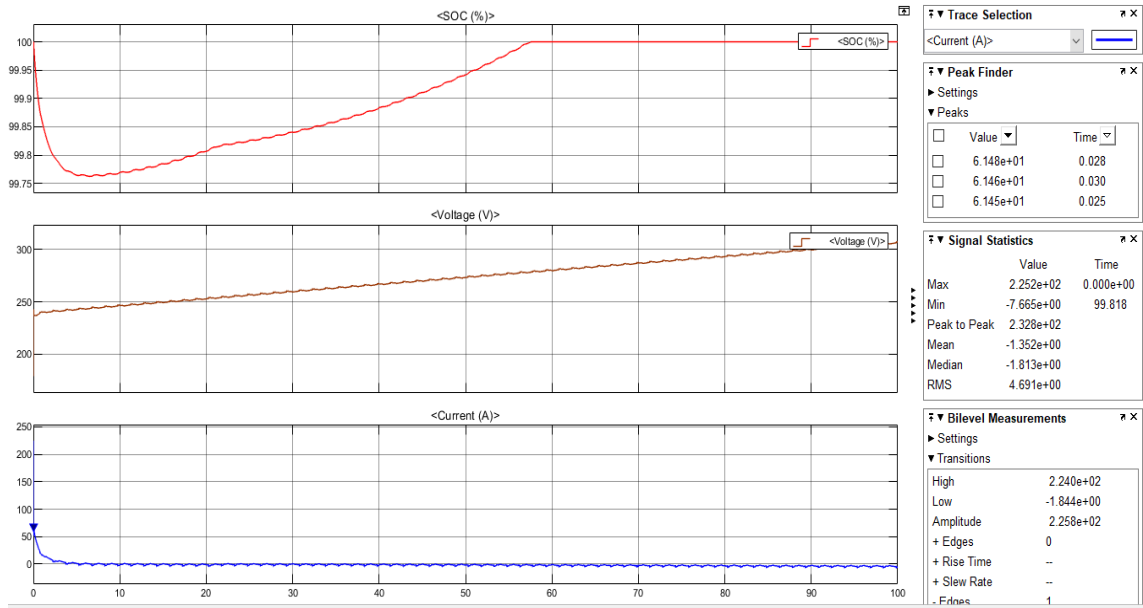


Şekil 4.53. Güneş panelinin terminal voltajı ve akımı (iyi aydınlanmada) (EA35b)

PV paneli, daha önce tanımlandığı gibi maksimum güç noktası takibinde (MPPT) çalıştırılır. Şekil 4.52 ve Şekil 4.53'te PV çıkışı ve sistemin çıkış voltajı (V_OUT) gösterilmektedir ve t=0-100sn arasında V_OUT 240V'tan 260V'a yükselmektedir. Bu artış, DC/DC boost dönüştürücüsünün akünün ve süper kapasitörün şarj talebini sağlayarak çalıştığını açıklar.

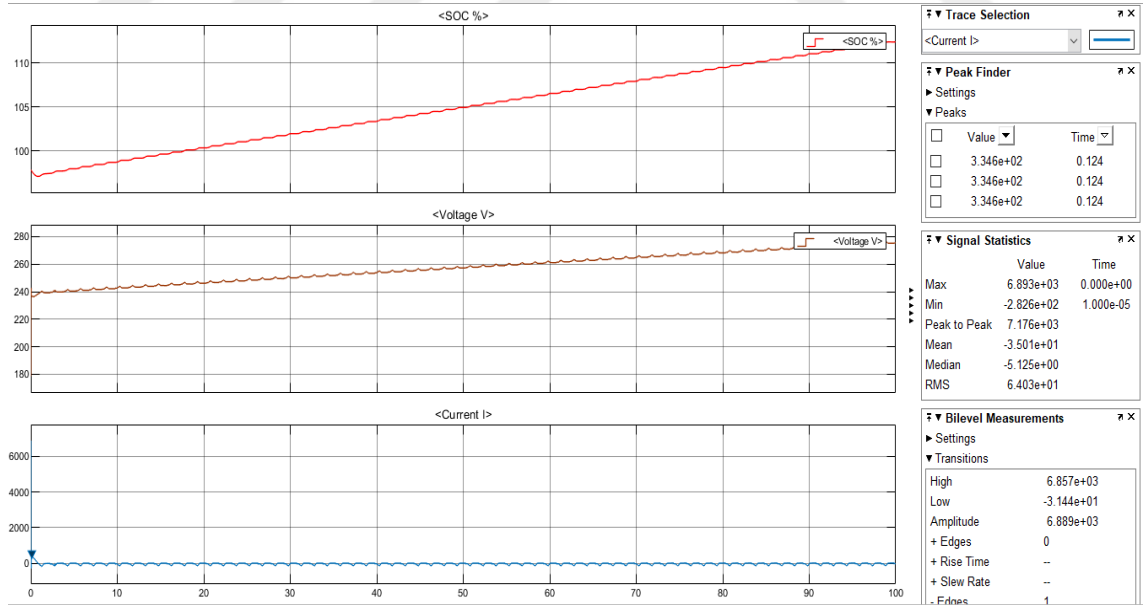


Şekil 4.54. Batarya çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA36a)

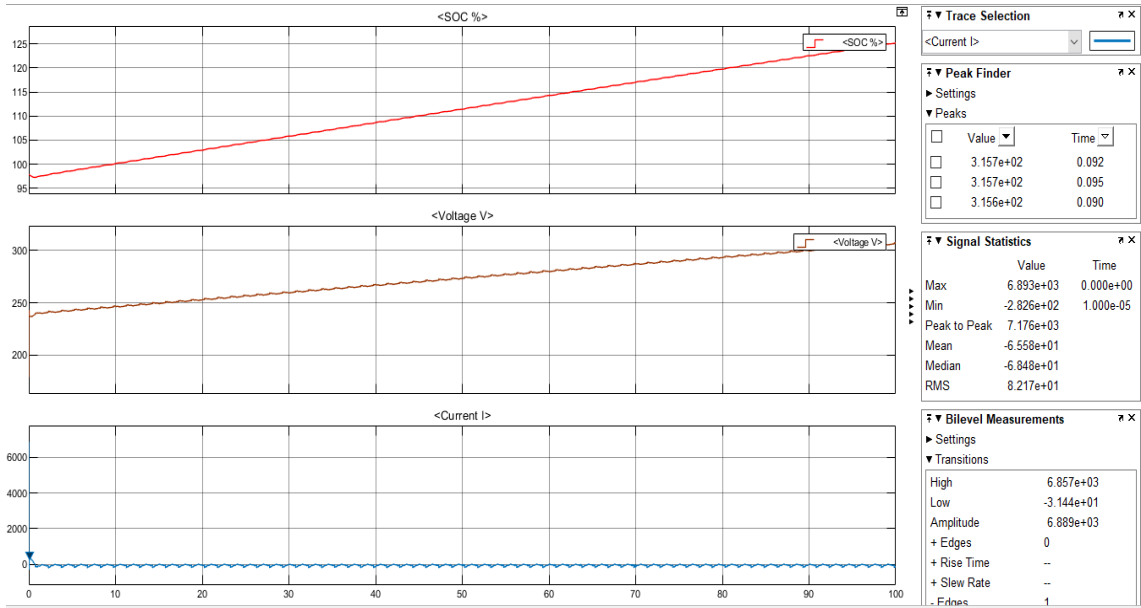


Şekil 4.55. Batarya çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA36b)

Şekil 4.54'te, $t=0-22$ sn arasında, %100'den neredeyse %99.66'ya kadar pil şarjlarında küçük bir azalma gözlenir ve şarj işlemi yavaş yavaş 22'lerden başlar. Bu durum şekil 4.55'te neredeyse benzerdir. Pil şarjı $t=0-6$ s arasında %100'den %99,76'ya düşer. 6. saniyeden sonra bir şarj gözlenir ve $t=56$ sn'de tam doluma ulaşılır.

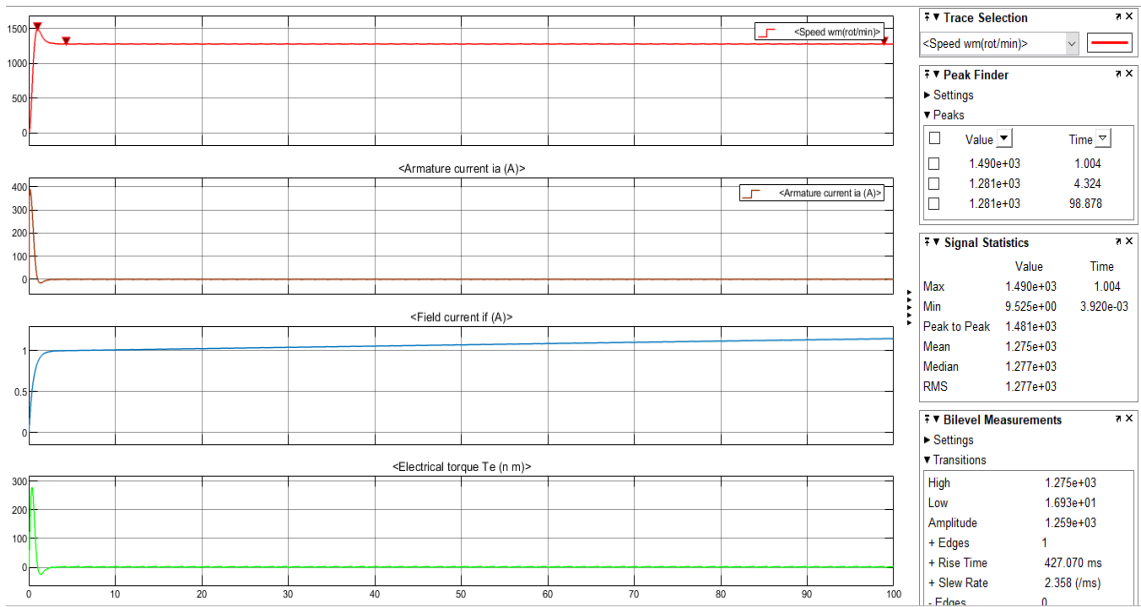


Şekil 4.56. Süper kapasitör çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA37a)

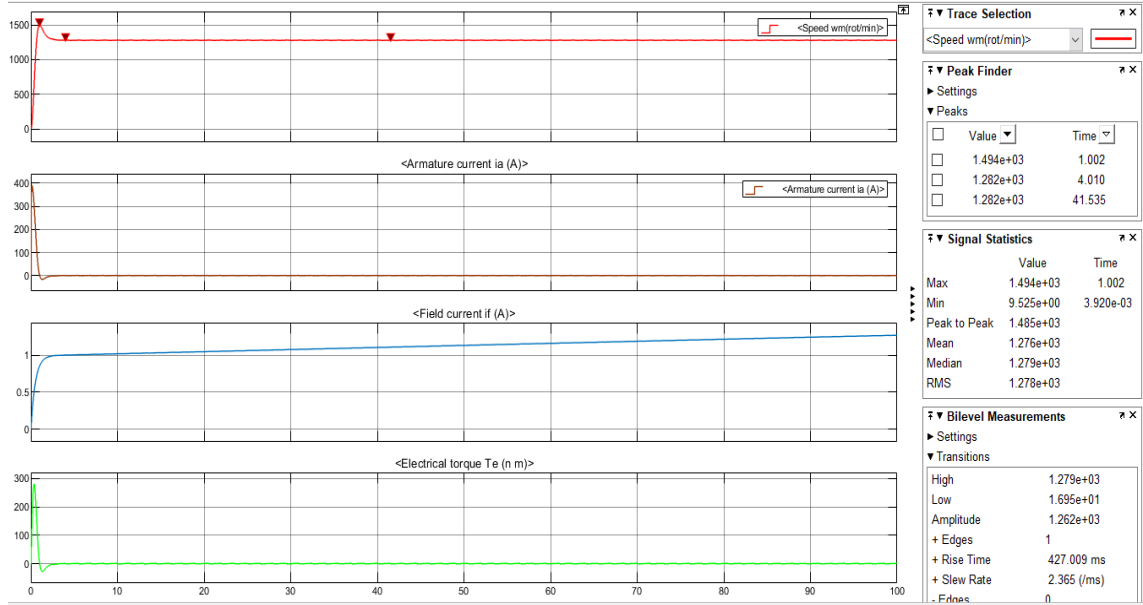


Şekil 4.57. Süper kapasitör çıkışları (iyi aydınlanmada) (EA37b)

Şekil 4.56 ve Şekil 4.57 ile ilgili olarak, başlangıçta süperkapasitörün şarjı Şekil 4.56'da %96'ya ve Şekil 4.57'de %97'ye düşer. Bu periyot $t=0-1$ sn gibi çok hızlı bir deşarjdır. Daha sonra 2. saniyenin sonunda, sistem DC/DC boost dönüştürücüsünün çıkışı aracılığıyla şarj etmek için beslendiğinden tekrar şarj olur. Bu hızlı deşarj, nominal devre çok hızlı bir şekilde ulaşmak için başlangıçta DC makinesinin güç yoğunluğu için gereken yüksek talebi karşılar.



Şekil 4.58. DC makine çıkışları (kötü aydınlanmada) (EA38a)



Şekil 4.59. DC makine çıktıları (iyi aydınlanmada) (EA38b)

Şekil 4.58 ve Şekil 4.59'da, makinenin çalıştırılması çok hızlı bir şekilde gerçekleştirildiği ve 1 saniyede 1490 rpm'nin üzerinde bir hıza ulaşıldığı görülmektedir. Böylece, makine ilk saniyede 1280 rpm nominal hızında döner. Çok hızlı başlatma ve temiz bir nominal hız ile istenen optimum çalışma 1. saniyede elde edilir.

Bu bölümde yapılan gözlem, süper kapasitör ve pilin aynı zamanda DC makinesinin enerji talebini karşılamayı başardığıdır. Bu, başlangıçta iki deşarjları ile gösterilir. Bu kısımda ideal makine hızı elde edilir. Süper kapasitör, başlangıçta DC makinesinin yüksek güç yoğunluğunun çok hızlı talebini karşılamak için ideal bir elementtir. Pil DC makinesinin uzun süreli çalışması için uygundur. Süper kapasitör ve batarya birlikte verildiğinde, DC makinesinin optimum çalışması hızlı bir şekilde elde edilir. Yüksek güç yoğunluğu içerme kapasitesine sahip süper kapasitör ve çok hızlı deşarj imkanı, DC makinesinin hızlı bir şekilde başlatılması için uygun hale gelir. Kayıt altına alınan sürede nominal hıza ulaşılır ve aynı zamanda DC makinesinin başlangıcında pilin derin deşarjı için bir çözümdür.

Çizelge 4.2: DC Makinenin ve enerji depolamaların çalışma durumlarının özeti

	Pil enerji depolaması		Süper kapasitör enerji depolaması		Hibrit süper kapasitör-pil enerji depolaması			
	Pilin SOC %0 iken	Pilin SOC %100 iken	Süper kapasitör şarj voltajı 0V iken	Süper kapasitör şarj voltajı 240V iken	Süper kapasitör şarj voltajı 0V ve pilin SOC %0 iken	Süper kapasitör şarj voltajı 0V ve pilin SOC %100 iken	Süper kapasitör şarj voltajı 240V ve pilin SOC %0 iken	Süper kapasitör şarj voltajı 240V ve pilin SOC %100 iken
Pilin deşarj durumu		0-2sn'de %100'den %99 düşmüş				100sn'de %100'den %60-%64'ye düşmüş		6-22sn'de %100'den %99'ye düşmüş
Pilin şarj durumu	5-10sn'den sonra şarja başlamış	2. saniyeden sonra tekrar yükselmiş					%9-%12 100sn'den sonra	7-23sn'den sonra tekrar yükselmiş
Süper kapasitör deşarj durumu				%100'den %97 2sn'de			%100'den %96-%97'ye 5sn'de	1sn'de %100'den %96-%97'ye düşmüş
Süper kapasitör şarj durumu			%20-%25 100sn'den sonra	2sn'den sonra tekrar yükselmiş	%8-%23 100sn'den sonra	%52-%62 100sn'den sonra	6sn'den sonra tekrar	2sn'den sonra tekrar yükselmiş
Makinenin nominal ulaşma zaman	6-12sn	6-13sn	80-150sn	0-1sn	80-150sn	30-35sn	0-1sn	0-1sn
Makinenin çalışma durumu	Hem yavaş başlatılma hem de hızda önemli dalgalanma (150rpm'lik)	Hem yavaş başlatılma hem de hızda önemli dalgalanma (150rpm'lik)	Hem çok yavaş başlatılma hem de hızda ufak dalgalanma (10rpm'lik)	Çok hızlı başlatılma ama hızda ufak dalgalanma (5rpm'lik)	Hem çok yavaş başlatılma hem de hızda ufak dalgalanma (10rpm'lik)	Yavaş başlatılma ve hızda ufak dalgalanma (5rpm'lik)	Çok hızlı başlatılma ama hızda ufakdalgalanma (5rpm'lik)	Çok hızlı başlatılma ve sabit hız

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Süper kapasitör, elektrik enerjisini depolamanın ve çok yüksek elektrik güç yoğunluğu için çok hızlı bir arz yaratmanın bir yoludur. 0,3 ila 30 saniye gibi sürelerde sisteme enerji verebilir. Güneş enerjisi sistemlerine diğer daha yavaş dinamiklere sahip depolanması araçlarına entegrasyonu çeşitli çalışmalarda öngörülmektedir. Bu tez çalışmasında, otonom bir sistem için bir fotovoltaik enerji depolama modelinde süperkapasitör ve bataryanın kullanımını incelenmiştir. Bu çalışmada bir sistem modeli, yani otonom bir güneş paneli sistemi ile çalışan bir DC makinesi incelenmiştir. Bu nedenle, iki tip ışınlama modeli ile bir güneş paneli, bir MPPT ve bir PWM içeren bir DC/DC boost dönüştürücü, elektriğin bir kurşun-asit batarya ve bir süper kapasitör ile depolanması ve bir doğru akım makinası MATLAB/Simulink'te simüle edilmiştir. Paralel olarak şematik bir temsilde çok ayrıntılı bir model, hassasiyeti nedeniyle seçilmiştir. Kullanılan süper kapasitör akünün derin deşarjları, güneş panelinin ve DC makinenin elektriksel karakteristikleri karşılamak ve bazen gerilim ayarlanarak yük dengeleme sağlar ve bu şekilde belirlenmiştir. Süper kapasitörün ve/veya akünün bulunduğu üç modelin kullanılması önerilmiştir. İlk durumda, bir süperkapasitör modülü ile ilişkili bir fotovoltaik panel içeren bir sistem için fotovoltaik enerjinin tek başına süperkapasitör tarafından depolanması öngörülmüştür. Süper kapasitörlerin şarj süresi ile belirli bir ortam sıcaklığı için solar ışığa arasında bir ilişki elde edilmiştir. Bu bölümde elde edilen eğriler, bir fotovoltaik sistemi süper kapasitörlerle oluşturmak isteyen bir kullanıcıyı veya geliştiriciyi bilgilendirmek için kullanılabilir. Çalışma, enerji depolama sistemi makinenin enerji talebini karşılamadığında DC/DC boost dönüştürücüsünün enerji tedarikçisinin rolünü oynadığını ortaya koymuştur. Ancak bu enerji kaynağı istikrarlı değildir çünkü fotovoltaik kaynak dalgalanabilir ve ışığa formuna bağlıdır. Bununla birlikte, süper kapasitörün, şarj edildiğinde başlangıçta bir DC makinesinin yüksek güç yoğunluğu için yüksek güç talebini karşılamak için ideal bir unsur olduğu gözlemlenmiştir. Uzun süreli ışığa ile ışımanın kararlı olduğu sürece uzun vadede optimum DC makine çalışması sağlanır. Bu nedenle süper kapasitör, iyi ışımaya sahip otonom bir güneş sisteminde, bir DC makinesinin hızlı bir şekilde başlatılmasına izin verebilir ve sürekli ışığa ile optimum çalışmasını sağlayabilir. Yüksek güç yoğunluğu ve çok hızlı deşarj imkanına sahip süper kapasitör, DC makinesinin hızlı çalıştırılması için uygundur. Daha sonra, optimum elektrik enerjisi depolama sürelerine sahip olmak için verilen iklimsel varyasyonları dikkate alarak çalışmaya devam etmesi mümkün olabilir.

Uygulanan yükün güç taleplerine göre, ikinci durumda tek başına pil, bir fotovoltaiik panel ve bir DC makinesi içeren bir sistemde elektrik enerjisi depolamak için kullanılmıştır. Akü, elektrik enerjisini depolamanın bir aracı olarak birleştirilmiştir. Bataryayı böyle bir sistemde tek başına kullanmanın avantajı, otonom güneş panelleri sistemi tarafından üretilen elektrik enerjisinin depolama zincirine eşlik etme ihtiyacı ile açıkça gösterilmiştir. Bu nedenle bu bölümde elde edilen eğriler, bir pil enerji depolama sistemine bağlandığında bile yüksek güç yoğunluğu talebi çok hızlı karşılamak için ideal olmadığı gözlenmiştir. Uzun süreli operasyonda sistem performansında DC makinenin çalışması esnasında testere dişi şeklinde devir dalgalanması gözlenmiştir. Böylece, enerji depolama sistemi makinenin enerji talebini karşılamadığında DC/DC dönüştürücü destek veren bir enerji tedarikçisi görevi görür. Ancak enerji kaynağı kalmaktadır çünkü fotovoltaiik kaynak dalgalanmakta ve kararlı değildir. Sağlanan bu enerji çok zayıf ışığa ile daha kötüdür. Tam olarak şarj edilmiş bir pil, belirli bir süre için makinenin enerji ihtiyaçlarını özerk bir şekilde karşılayabilir. Bununla birlikte, hızlı güç talepleri karşılanamaz, bu nedenle makinenin çok yavaş bir şekilde başlaması gözlenir. Bu kötü ışığa ile son derece yavaştır.

Son olarak, bir güneş paneli ve bir DC makinesine bir pil-süper kapasitör hibrit depolama sistemi bağlanmıştır. Süper kapasitörler kullanımının avantajı, makine çalıştırılmak için gereken yüksek güç talebi sırasında akü üzerindeki elektrik streslerinin önemli ölçüde azaltmasını açıkça göstermiştir. Bu bölümde elde edilen eğriler ışığında, süper kapasitörün yüksek güç yoğunluğunun çok hızlı taleplerini karşılamak için ideal bir unsur olduğu sonucuna varabiliriz. Pil uzun vadeli enerji temini için uygundur. Bu nedenle, hibridizasyon süper kapasitör ve pil, otonom fotovoltaiik sistemler için mükemmel bir enerji depolama sistemi gibi görünmektedir. Yüksek güç yoğunluğu içerme kapasitesine sahip süper kapasitörlerin çok hızlı deşarj imkânı, bu cihazları hızlı güç talepleri için uygun hale getirmektedir. Ayrıca derin akü deşarjı için bir çözümdür.

Bu çalışmada, çıktı analizi için sadece iki enerji depolama cihazının tam dolu ve tam boş koşulları dikkate alınmıştır. Ancak, dikkate alınması gereken tek parametre bu değildir. Gelecekteki çalışmalarda, tartışma hibrit elektrik depolama sistemlerindeki bir süper kapasitörün bir pilin ömrünü nasıl artırdığına dayanacaktır. Süper kapasitörden daha iyi performans elde etmek için, gelecekteki çalışmalar uygun parametreye, süper kapasitör ve bataryanın uygun büyüklüğüne ve ayrıca bağımsız güneş paneli uygulamalarındaki tüm enerji depolama sistemine odaklanacaktır. Modelleme, bir kıyıcı veya bir inverter ve bir AC motor ile desteklenebilir. Cihazların

boyutlandırılması yapılabilir. Örneğin, bir kuyudan su çıkarmak için kullanılan bir pompanın motoru için olası güç talepleri hesaplanabilir. Bir fotovoltaiik tesisin ömrü ve ayrıca süper kapasitörler satın almanın ek maliyeti üzerindeki etki, daha fazla araştırılması gereken bir konu olmaya devam etmektedir.



6. KAYNAKLAR

- [1] Y. S. Perdana, S. M. Muyeen, A. Al-Durra, H. K. Morales-Paredes, and M. G. Simoes, "Direct connection of supercapacitor-battery hybrid storage system to the grid-tied photovoltaic system," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 3, pp. 1370–1379, 2019.
- [2] S. Pierfederici *et al.*, "Control of High-Energy High-Power Densities Storage Devices by Li-ion Battery and Supercapacitor for Fuel Cell/Photovoltaic Hybrid Power Plant for Autonomous System Applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 5, pp. 4395–4407, 2016.
- [3] U. Akram and M. Khalid, "A Coordinated Frequency Regulation Framework Based on Hybrid Battery-Ultracapacitor Energy Storage Technologies," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 7310–7320, 2017.
- [4] U. Akram, M. Khalid, and S. Shafiq, "An Innovative Hybrid Wind-Solar and Battery-Supercapacitor Microgrid System—Development and Optimization," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 25897–25912, 2017.
- [5] K. Ü. Şule Kuşdocan (Mühendislik fakültesi, "Yenilenebilir Enerji Uygulamalarında Hibrid Enerji Depolama Teknolojileri ve Uygulamaları," p. 11, 2006.
- [6] M. E. Glavin and W. G. Hurley, "Ultracapacitor/ battery hybrid for solar energy storage," *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*, no. 1, pp. 791–795, 2007.
- [7] W. G. H. M.E. Glavin, Paul K.W. Chan, S. Armstrong, "A Stand-alone Photovoltaic Supercapacitor Battery Hybrid Energy Storage System," *13th Int. Power Electron. Motion Control Conf.*, vol. 60, no. 5, pp. 1688–1695, 2008.
- [8] T. A. Singo, A. Martinez, and S. Saadate, "Using ultracapacitors to optimize energy storage in a photovoltaic system," *SPEEDAM 2008 - Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion*, pp. 229–234, 2008.
- [9] P. Simon, "Supercondensateurs : Principes et Evolutions," Toulouse, 2011.
- [10] G. Wang, M. Ciobotaru, and V. G. Agelidis, "PV power plant using hybrid energy storage system with improved efficiency," *Proc. - 2012 3rd IEEE Int. Symp. Power Electron. Distrib. Gener. Syst. PEDG 2012*, pp. 808–813, 2012.
- [11] A. Lahyani, P. Venet, A. Guermazi, and A. Troudi, "Battery/Supercapacitors Combination in Uninterruptible Power Supply (UPS)," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 1509–1522, 2013.
- [12] A. Vlad, N. Singh, J. Rolland, S. Melinte, P. M. Ajayan, and J. F. Gohy, "Hybrid supercapacitor-battery materials for fast electrochemical charge storage," *Sci. Rep.*, 2014.
- [13] J.-C. L. de recherche/ C. A. C. plateforme d'essai/France) Christian Sarrazin(DGA/DRET) *et al.*, "Accumulateurs d'énergie," *Tech. l'ingénieur*, p. 84.
- [14] H. Wang and Z. Jiancheng, "Research on charging/discharging control strategy of battery-super capacitor hybrid energy storage system in photovoltaic system," *2016 IEEE 8th Int. Power Electron. Motion Control Conf. IPEMC-ECCE Asia 2016*, no. 51177047, pp. 2694–2698, 2016.
- [15] M. Gaetani-Liseo, C. Alonso, and B. Jammes, "Impacts of supercapacitors on battery lifetime in hybrid energy storage system in building integrated photovoltaic DC micro-grid," *7th Int. IEEE Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2018*, vol. 5, pp. 1247–1252, 2018.
- [16] P. Yu *et al.*, "Battery – supercapacitor hybrid energy storage system for wind power suppression based on the turbulence model of wind speed," vol. 2018, pp.

- 1922–1929, 2018.
- [17] A. B. H. Gualous, R. Gallay, “Utilisation des supercondensateurs pour les stockage de l’énergie embarquée: applications transport,” *Rev. l’Electricité l’Electronique*, no. 08, pp. 83–90, 2008.
 - [18] P. (L’Institut N. P. de L. Thouhthong, “Conception d’une source hybride utilisant une pile a combustible et des supercondensateurs,” *ResearchGate*, no. December 2005, p. 164, 2016.
 - [19] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Mohamed, and A. Ayob, “Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, no. January, pp. 771–789, 2017.
 - [20] J. Prensier and L. Les, “Annexe : Principe de fonctionnement et constituants d ’ une batterie,” pp. 1–4, 2004.
 - [21] D. Rosewater, S. Ferreira, D. Schoenwald, J. Hawkins, and S. Santoso, “Battery energy storage state-of-charge forecasting: Models, optimization, and accuracy,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2453–2462, 2019.
 - [22] H. Horsin and M. Bernard, “Technologies des systèmes de stockage de l ’ énergie électrique,” pp. 1–21, 2019.
 - [23] J. F. D. Camara M. A., A. Djellad, P. O. Logerais, O. Riou, “Modeling of A Hybrid Energy Storage System Supplied by a Photovoltaic Source to Feed a DC Motor,” *Int. J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 2, no. 6, p. 222, 2013.
 - [24] S. K. Kollimalla, M. K. Mishra, and N. N. Lakshmi, “A new control strategy for interfacing battery supercapacitor storage systems for PV system,” *2014 IEEE Students’ Conf. Electr. Electron. Comput. Sci. SCEECS 2014*, pp. 1–6, 2014.
 - [25] D. Carreira, G. D. Marques, and D. M. Sousa, “Hybrid energy storage system joining batteries and supercapacitors,” *2014 IEEE 5th Int. Symp. Power Electron. Distrib. Gener. Syst. PEDG 2014*, pp. 1–6, 2014.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Yvon Gotran KOYİ-BOUKİLA
Uyruğu : Gabon
Doğum Yeri ve Tarihi : Bakoumba 08.02.1992
Telefon : +90 552 609 42 41
Faks :
e-mail : koyiyvon92@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Henri SYLVOZ Lisesi, Moanda	2012
Üniversite	: Masuku Bilim ve Teknik Üniversitesi, Franceville	2015
Yüksek Lisans	: Necmettin Erbakan Üniversitesi, Meram/Konya	Sürüyor
Doktora	:	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2015	Ogooué Maden Şirketi SA, Moanda	Stajyer
2015	Bouygues Energy&Services, Moanda	Teknisyen stajyer
2019	Müfit Collection, Konya	Dış ticaret elemanı

UZMANLIK ALANI

- Pompalar ve bantlı konveyör bakımı,
- YG hattı
- İthalat-ihracat için plan ve prosedürlerin geliştirilmesi

YABANCI DİLLER

- Fransızca
- İngilizce
- Türkçe

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR