

**METRO VE HAFİF RAYLI ULAŞIM ARAÇLARI İÇİN  
SÜPERKAPASİTÖR DEPOLAMALI FRENLEME  
ENERJİSİ GERİ KAZANIMI SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

**DEVELOPMENT OF A REGENERATIVE BRAKING  
ENERGY STORAGE SYSTEM USING  
SUPERCAPACITORS FOR METRO AND LIGHT RAIL  
VEHICLES**

**MEHMET HAKAN AKŞİT**

**PROF.DR. İŞİK ÇADIRCI**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

**DOKTORA** TEZİ olarak hazırlanmıştır.

## ÖZET

# METRO VE HAFİF RAYLI ULAŞIM ARAÇLARI İÇİN SÜPERKAPASİTÖR DEPOLAMALI FRENLEME ENERJİSİ GERİ KAZANIMI SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

**Mehmet Hakan AKŞİT**

**Doktora, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Işık ÇADIRCI**

**Haziran 2022, 159 sayfa**

Bu tez çalışmasında, süperkapasitör tabanlı enerji depolama sisteminin metro ve hafif raylı araçlarda frenleme enerjisinin geri kazanılması amacıyla geliştirilmesi, laboratuvar ortamında kurulumu ve gerçekleştirilmesi sunulmuştur. Enerjinin boşa harcanması, hem ülkemiz hem de dünyamız için ciddi bir kayıp oluşturmaktadır. Bu bağlamda, genellikle boşa harcanan frenleme enerjisinin depolanıp yeniden kullanılması ciddi bir önem taşımaktadır. Süperkapasitörler güç yoğunluğu yüksek, enerji yoğunluğu ise görece düşük aygıtlar olup, sürekli dur-kalk yapan şehiriçi raylı ulaşım sistemlerinde enerjiyi verimli olarak depolamaya uygun ürünlerdir. Raylı ulaşım sistemlerinde frenleme, çoğunlukla mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve bu enerjinin frenleme dirençlerinde ısı enerjisine dönüştürülmesi şeklinde olmaktadır. Bu tez çalışmasında, yeni nesil silisyum karbür (SiC) tabanlı metal oksit yarı-iletkenli alan etkili güç tranzistörü

(güç MOSFET'i) kullanılan, yüksek verimli, uzun ömürlü ve işitsel gürültüsü düşük çift yönlü güç aktarımı yapabilen düşük hacimli bir çevirgeç tasarlanarak süperkapasitör enerji depolama sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu sistem yine aynı labortuvarda geliştirilen ve kurulan, katener ve raylı çekiş simülatörlerine entegre edilerek test edilmiş ve doğrulanmıştır. Bu üç sistemin geliştirilmesinde SiC güç MOSFET'lerinin yenilikleri, olası problemleri, ve etkileri üzerinde çokça durulmuş ve bunlarla ilgili çalışmalar da yürütülmüştür. Bunun yanında süperkapasitörlerin frenleme enerjisi geri kazanımını daha etkin hale getirmeyi hedefleyen algoritmalar ve çalışma yöntemleri üzerinde araştırma ve geliştirme yapılmıştır. Standart yöntemleri uygulayarak düz yolda yaklaşık % 31 olan enerji tasarrufu geliştirilen algoritma ile % 38 olmuş, hafif negatif eğimli yolda ise yaklaşık %33 olan enerji tasarrufu yine bu algoritma ile % 43'e yükseltilmiştir. Bu algoritma bütün bir parkura uygulandığında ise enerji tasarrufunu % 31'den % 39 seviyesine çıkarmıştır. Çalışılan bu yöntemler laboratuvar ortamında kurulu tüm sistem çalıştırılarak doğrulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Şehiriçi Raylı Ulaşım Araçları, Süperkapasitör, Frenleme Enerjisi, SiC Güç MOSFET'i, Enerji Tasarrufu.

## **ABSTRACT**

# **DEVELOPMENT OF A REGENERATIVE BRAKING ENERGY STORAGE SYSTEM USING SUPERCAPACITORS FOR METRO AND LIGHT RAIL VEHICLES**

**Mehmet Hakan AKŞİT**

**Doctor of Philosophy, Department of  
Electrical and Electronics Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Işık ÇADIRCI**

**June 2022, 159 pages**

In this thesis study, development, laboratory setup and realization of a energy storage system based on supercapacitor which aims to recover braking energy in metro and light rail vehicles is presented. In this context, storage and reuse of the energy that would be wasted while braking, has a significant meaning. Supercapacitors are devices with high power density and relatively low energy density where they are suitable for efficiently storing the energy in urban rail transportation systems that halts and speeds up again and again. Braking in rail transportation systems is mostly in the form of converting mechanical energy into electrical energy and converting this energy into heat energy in braking resistors. In this thesis, a supercapacitor energy storage system has been developed by designing a new generation silicon carbide (SiC) metal oxide semiconductor field effect power transistor (power MOSFET) based a low volume bidirectional power converter which has high efficiency, long life and less audible noise. This system has been integrated and verified with the catenary and railway traction simulators developed and set up in the same laboratory. In the development process of these three systems, the innovations, potential problems and effects of SiC power

MOSFETs have been emphasized and thus studies have been carried out. In addition, research and development has been carried out on algorithms and working methods aimed at using supercapacitors more effectively for the braking energy recovery. By applying the standard methods, the energy saving, which was about 31% on the straight road, was 38% with the developed algorithm, and the energy saving, which was about 33% on the slightly negative slope, was increased to 43% with this algorithm. When this algorithm is applied to a whole rail track, the energy savings increased from 31% to 39%. These methods have been verified by running the whole system installed in the laboratory environment.

**Key Words:** Urban Rail Vehicles, Supercapacitor, Braking Energy, SiC Power MOSFET, Energy Saving

## TEŞEKKÜR

Öncelikle, tez çalışmalarım boyunca bilgi, deneyim ve yönlendirmeleriyle bana yol gösteren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Işık ÇADIRCI'ya,  
Tez dönemim boyunca tez danışmanımla birlikte çalışmalarına değerli katkılarını sunan, beni yönlendiren Prof. Dr. Muammer ERMIŞ'e,  
Tezim boyunca hem maddi, hem manevi desteğini esirgemeyen ve bana her türlü sabreden çok sevgili eşim Zeynep'e ve tez çalışmalarım esnasında kucağıma aldığım ve sabırla benim çalışmalarımı bekleyen canım kızım Azra'ya,  
Teze başlarken bana maddi ve manevi destek veren sevgili anneme ve tez çalışmalarım esnasında kaybettiğim ve özlemi hala kalbimde olan her türlü destekçim sevgili babama, manevi desteklerini hep hissettiğim sevgili ablalarıma,  
Tez çalışmamda tanıştığım ve tezim boyunca birbirimize yol arkadaşlığı yaptığımız sevgili Doğan YILDIRIM'a,  
Tez çalışmalarında yanımda olan Behrang HOSSEİNİ, Tefvik PUL ve Cem YOLAÇAN'a,  
Doktora çalışmalarım boyunca bana doktora burs programı ile maddi destek veren kurumum ASELSAN'a,  
Doktora başlangıcında bana maddi destek veren TÜBİTAK BİDEB programına,  
Yine proje ve laboratuvar kurulumunda maddi destek veren ASELSAN'a ve TÜBİTAK TEYDEB'e,  
Beni destekleyen sevgili müdürüm ve abim Berkan ÇAKIR'a,  
Teknik desteklerinden dolayı ASELSAN'dan çalışma arkadaşlarım Serkan KINA, Samet YÜCE ve Mustafa ÇAYĞAN'a,  
Maddi ve manevi desteklerinden dolayı Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliğin'den:  
Değerli çalışma arkadaşlarım Ömer HALİLOĞLU, Tuna ORHANLI, Serkan ÖZTÜRK, Şölen KUMBAY, Sevda BALK, Said SARAÇOĞLU, Sefa KÜÇÜK, Uygur DEMİR, Cansu SUNU, Barış YÜKSEKKAYA ve Dinçer GÖKÇEN'e,  
Değerli hocalarım Yakup ÖZKAZANÇ, Feza ARIKAN, Adnan KÖKSAL, Birsen SAKA ve Atila YILMAZ'a  
Sevgili bölüm sekreterimiz Fidan KAHRAMAN'a,

TEŞEKKÜR EDERİM

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
ÇİZELGELER .....	ix
ŞEKİLLER .....	x
1 GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı .....	1
1.2 Tezin Katkısı.....	7
1.3 Tezin Yapısı .....	8
2 SÜPERKAPASİTÖR DEPOLAMALI FRENLEME ENERJİSİ GERİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİNİN TASARIMI.....	10
2.1 Raylı Sistemlerde Enerji Depolama Sistemi Kullanımı .....	10
2.1.1 Uçantekerli Enerji Depolama Sistemleri.....	10
2.1.2 Bataryalı Enerji Depolama Sistemleri.....	11
2.1.3 Süperkapasitörlü Enerji Depolama.....	11
2.2 Raylı Sistemler için Geliştirilen Süperkapasitör Enerji Depolama Sistemi Hakkında Genel Bilgiler.....	16
2.3 Süperkapasitörün Enerji Depolama Uygulamaları İçin Çift Yönlü DA/DA Çevirgeçler.....	20
2.3.1 Yüksek Gerilim Çevirgeçlerde Kullanılan Anahtarlama Elemanları	21
2.4 Sistem Tasarımı Aşamaları .....	22
2.4.1 Süperkapasitör Depolamalı Sistem için Kurulan Fiziksel Simülasyon	22
2.4.2 Süperkapasitör Miktar ve Boyutunun Seçimi.....	27
2.4.3 Çift Yönlü DA/DA Çevirgeç Tasarımı ve Çalışma Modları .....	29

2.4.4	Anahtarlama Elemanı ve Soğutucu Fin Seçimi .....	32
2.4.5	DA/DA Çevirgeç Reaktörü Hesaplamaları, Tasarımı ve Seçimi ...	35
2.4.6	Giriş Kapasitörü ve Reaktörü Seçimi .....	38
2.4.7	Algılayıcı Elemanlarının Seçimi .....	41
2.5	Çift Yönlü İndirici ve Yükseltici Tipte DA/DA Çevirgecin Denetim Sistemi Algoritma Çalışmaları .....	43
2.6	Frenleme Enerjisi Geri Kazanımı Maksimizasyonu Çalışmaları .....	47
2.6.1	Frenleme Başlangıcında Süperkapasitör Geriliminin Optimizasyonu	47
2.6.2	Optimum Frenleme Torku ile Enerji Geri Kazanımı Maksimizasyonu	50
3	BENZETİM ÇALIŞMALARI .....	59
3.1	Anahtarlama Elemanlarının Anahtarlama ve Kayıp Benzetimleri .....	59
3.1.1	SiC MOSFET'in LTSpice Benzetimi ile Gerçeğe Yakın Anahtarlama Benzetimleri .....	59
3.1.2	Anahtarların Kayıp ve Isıl Başarım Benzetimleri .....	62
3.2	Süperkapasitör Depolamalı Frenleme Geri Kazanımı Sistemi için Benzetim Çalışmaları .....	66
3.2.1	Benzetim Sisteminde Çift Yönlü DA/DA Çevirgecin Çalışma Kipleri ve Denetim Parametrelerinin Belirlenmesi .....	66
3.2.2	Benzetim Çalışmalarında Anma Akımı ile Şarj ve Deşarj için Enerji Kayıpları ve Isıl Başarımlar .....	73
3.2.3	Süperkapasitör Depolama Sisteminin Gerçeğe Yakın Bir Motor Sürücü ve Katener Hattı ile Bağlanması Benzetimleri .....	87
3.2.4	Süperkapasitör Başlangıç Gerilimi Optimizasyonu Benzetim Sonuçları .....	94
3.2.5	Azami Enerji Geri Kazanımı için Frenleme Profili Algoritması ile Benzetim Sonuçları .....	99
4	SİSTEM DONANIM KURULUMLARI VE ÖLÇÜM SONUÇLARI .....	105
4.1	Sistem Kurulumu .....	105



4.2	Sistem Denetimi ve Haberleşmesi.....	110
4.3	Sistemden Alınan Ölçümler ve Yol Senaryoları .....	112
4.3.2	Süperkapasitör Şarj ve Deşarj Ölçümleri .....	114
4.3.3	Süperkapasitör Enerji Depolamalı Sistemle Yol Senaryoları Ölçümleri .....	121
5	ELDE EDİLEN SONUÇLARI KARŞILAŞTIRMA VE TARTIŞMA.....	128
5.1	Benzetim Çalışmalarıyla Farklı Boyuttaki Süperkapasitörlerin Karşılaştırılması .....	128
5.2	Enerji Geri Kazanımı Maksimizasyonu Algoritmasının Standart Kullanım ile Kıyaslanması ve Benzetim ve Laboratuvar Çalışmalarının Karşılaştırılması	131
5.3	İlk Kurulum Maliyeti ve Enerji Fiyatlarına Göre Maliyet Çıkarım Süresi	135
6	SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR .....	139
7	KAYNAKLAR.....	143
	EKLER.....	152
	EK 1 – Simulink Benzetim Blok Şemaları .....	152
	EK 2 – Tezden Üretilmiş Projeler Ve Bütçeleri .....	158
	EK 3 – Tezden Türetilmiş Yayınlar .....	158
	EK 4 – Tezden Türetilmiş Bildiriler.....	158
	ÖZGEÇMİŞ .....	159

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Araç Üzerinde Enerji Geri Kazanımı Sistemi Monte Edilmiş ve Kullanımı Olan Sistemler [26].....	3
Çizelge 1.2 Güç Çevrim İstasyonuna Enerji Geri Kazanımı Sistemi Monte Edilmiş ve Kullanımı Olan Sistemler [26].....	4
Çizelge 1.3 Çift Yönlü Güç Akışı Sağlayan Çevrim İstasyonu Sistemi Olan Raylı Ulaşım Hatları [26] .....	5
Çizelge 2.1. Farklı Süperkapasitör Üreticilerinin Raylı Sistemlere Uygun Ürünleri .....	19
Çizelge 2.2. Örnek Araç ve Parkur Teknik Özellikleri [67], [68].....	26
Çizelge 2.3. Laboratuvar Ortamında Kurulan Fiziksel Simülatör Sisteminin Mekanik Özellikleri .....	27
Çizelge 2.4 Farklı Markaların Yarım Köprü Modülleri için 400V-250A(DA) Çıkış Veren Durumda Güç Kayıplarının El ile Hesabı .....	33
Çizelge 3.1. Süperkapasitör Gerilimi 375 V iken 250 A Akım Altında Anahtar Kayıplarının Karşılaştırılması .....	63
Çizelge 5.1 Süperkapasitör Kapasitesine Göre Katenerden Çekilen ve Frenleme Direncine Verilen Ortalama Akım Değerleri .....	131
Çizelge 5.2 Süperkapasitör Kapasitesi, Araç Yüğü ve Operasyon Türüne Göre Enerji Tüketimleri, Rejenerasyon Yapılan, Depolanan ve Harcanan Enerji ve Enerji Tasarrufu.....	133
Çizelge 5.3 Sistem Malzeme Maliyeti.....	135

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Si, SiC ve GaN Tabanlı Güç Yarı İletkenlerinin Teknik Özellikleri [32].	6
Şekil 1.2 Si ve SiC Tabanlı MOSFET'lerin Teknik Özellikleri [33] .....	6
Şekil 2.1. Süperkapasitörün İç Yapısı (1) Akım Kaynağı, (2) İletken Katman, (3) Karbon Elektrot, (4) Dielektrik Malzeme, (5) Elektronların Serbest Akış Yaptığı Elektrolitik Sıvı, (6) Seçici Geçirgen Ayraç.....	12
Şekil 2.2. Çeşitli Depolama Ortamlarının Özgül Enerji ve Özgül Gücünü Gösteren RAGONE ŞEMASI [44] .....	13
Şekil 2.3. Süperkapasitör Şarj ve Deşarj Grafiği, 0-t1 → Şarj etme, t1-t2 → Şarjı Kesme, t2-t3 → Deşarj Etme, t3-t4 → Deşarjı Kesme, t4-t5 → Tam Deşarj.....	14
Şekil 2.4. Çift Yönlü İndirici ve Yükseltici Tipte DA/DA Çevirgeç Topolojisi .....	21
Şekil 2.5. TÜBİTAK, ASELSAN, ODTÜ ve Hacettepe Üniversitesinin Ortak Projeleri Kapsamında Tasarlanan ve ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü Bünyesinde Kurulan Fiziksel Simulatör Sisteminin Blok Şeması .....	24
Şekil 2.6. Raylı Çekiş ve Depolama Sistemleri Ar-Ge Labortauvarı Yerleşim Planı, 1: 400 V, 50 Hz Dağıtım Panosu, 2: DGK Doğrultucu, 3: Motor Sürücü, 4: Çift Yönlü DA/DA Çevirgeç, 5: Superkapasitör Bankası, 6: Aktif Doğrultucu ve Endüstriyel Motor Sürücüsü, 7: Motor-Uçanteker-Jeneratör Seti, 8: Frenleme Direnci [67] .....	25
Şekil 2.7. Maxwell BMOD0063P125 B08 Süperkapasitör Ürünü 63 F 125 V [60] .....	29
Şekil 2.8. Çift Yönlü DA/DA Çevirgecin Süperkapasitöre ve Katener Hattına Bağlantısı.....	30
Şekil 2.9. Çift Yönlü Çevirgeç İndirici Modda Çalışırken Aktif Elemanlar, a) Bobin ve Süperkapasitör Şarj Oluyor, b) Bobin Serbest Döngüyle Süperkapasitörü Dolduruyor .....	31
Şekil 2.10. Çift Yönlü Çevirgeç Yükseltici Modda Çalışırken Aktif Anahtarlar, a) Süperkapasitör Bobini Dolduruyor, b) Bobin ve Süperkapasitör Katenere Enerji Veriyor .....	31
Şekil 2.11. Wolfspeed/Cree CAS300M17BM2 SiC MOSFET Yarım Köprü Modülü [74] .....	33

Şekil 2.12. Fischer Elektronik SK461-400 Soğutucu Plaka ve SiC Güç MOSFET'leri yerleşimi .....	35
Şekil 2.13. Reaktör Şarj-Deşarj Grafiği .....	36
Şekil 2.14. İndüktans Değerine Göre Anahtarlama Frekansının Süperkapasitör Üzerinde Oluşturduğu Tepeden Tepeye Dalgalanma Yüzdesi .....	37
Şekil 2.15. İndirici ve Yükseltici Çevirgeç Devresinde Tasarlanan, Satınalınan ve Kullanılan Demir Nüveli Reaktör .....	38
Şekil 2.16. Hesaplamalar ile Seçilen ve Satınalınan Giriş Kapasitörü .....	39
Şekil 2.17. Lamine Bara Üzerine Montajlanmış Yüksek Frekans Akım/EMI Filtre Kapasitörleri .....	40
Şekil 2.18. Hesaplamalar ile Seçilen ve Satınalınan Giriş Reaktörü .....	41
Şekil 2.19. Gerilim ve Akım Algılayıcılar (a) Gerilim Algılayıcı LEM LV25-1000 [78] (b) Akım Algılayıcı LEM LF-510S [79] .....	42
Şekil 2.20. Süperkapasitör Depolamalı Çift Yönlü İndirici ve Yükseltici Tipte DA/DA Çevirgecin Güç ve Denetim Devreleri .....	45
Şekil 2.21. Frenleme Esnasında Süperkapasitör Üzerinde Oluşan Akım ve Gerilim Profili; (A)'dan Gücün Dengelendiği Nokta (B)'ye Kadar Tepe Akım 250 A Sınır ile Süperkapasitör Şarj Ediliyor, (B)'den Sonra Gelen Gücün Tamamı Akım Sınırının Altında Süperkapasitörü Şarj .....	47
Şekil 2.22. Frenleme Süresince Motor Tarafından Üretilen Gücün Grafiği .....	48
Şekil 2.23. Süperkapasitör Başlangıç Değeri, Tork, Hız Ve Negatif İvme Profillerinin Oluşturulduğu Ana Algoritma .....	52
Şekil 2.24. Tork, Hız ve İvme Profillerinin Çıkarıldığı Fonksiyon .....	54
Şekil 2.25. Frenleme Profili Algoritması Sonucu Motorun Uygulaması Gereken Frenleme Torku .....	56
Şekil 2.26. Frenleme Profili Algoritması ile Elde Edilen Motorun Uygulayacağı Frenleme Torku ile Oluşacak Frenleme İvmesi .....	57
Şekil 2.27. Frenleme Profili Algoritması ile Elde Edilen Frenleme Torku ile Motorun Üreteceği Frenleme Gücü .....	57
Şekil 2.28. Frenleme Profili Algoritması ile Elde Edilen Motorun Uygulayacağı Frenleme Torku ile Oluşması Beklenen Araç Sürati .....	58
Şekil 3.1. SiC MOSFET Modülü CAS300M17BM2 için Oluşturulan Benzetim Şeması (Modül İçinde 12 adet SiC MOSFET Yongası ve 12 Adet SiC Diyot Yongası Paralel ve Yarım Köprü Oluşturacak Biçimde Bağlanmıştır) .....	60

Şekil 3.2. LTSpice Benzetimi ile SiC MOSFET'in Açılış Anındaki Akım, Gerilim ve Güç Kaybı Grafikleri .....	61
Şekil 3.3. LTSpice Benzetimi ile SiC MOSFET'in Kapanış Anındaki Akım, Gerilim ve Güç Kaybı Grafikleri.....	62
Şekil 3.4. İndirici Kipte Farklı Modüllerin Farklı Güç Seviyelerinde Verim Eğrisi .....	65
Şekil 3.5. Yükseltici Kipte Farklı Modüllerin Farklı Güç Seviyelerinde Verimlilik Eğrisi .....	65
Şekil 3.6. Süperkapasitör İndirici-Yükseltici Devrenin Denetimini Gürbüz Hale Getirmek için Oluşturulan Devre Şeması.....	67
Şekil 3.7. Şarj Esnasında Reaktör Üzerindeki (a) Akım ve (b) Gerilim .....	68
Şekil 3.8. Deşarj Esnasında Reaktör Üzerindeki (a) Akım ve (b) Gerilim .....	68
Şekil 3.9. SiC MOSFET Tabanlı Çevirgecin Şekil 4.3'te Denetim Katsayılarını Ayarlamak için Motor Modelleri; a) Süperkapasitör Şarj Etmek için Frenleme Esnasında Olası Oluşacak Negatif Rampa ile Motorda Üretilen Geri Kazanım Güç Modeli, b) Süperkapasitörü Deşarj Etmek için Hızlanma Esnasında Pozitif Rampa ile Motorun Harcadığı Güç Modeli.....	69
Şekil 3.10. Motor Gücü; a) Frenleme Esnasında Üretilen Güç, b) Hızlanma Esnasında Tüketilen Güç.....	70
Şekil 3.11. Frenleme Esnasında Motor Modeli Tarafından (a) Üretilen Akım ve (b) DA Bağ Üzerinde Oluşan Gerilim .....	71
Şekil 3.12. Frenleme Esnasında Süperkapasitör Üzerinde Oluşan (a) Şarj Akımı ve (b) Şarj Gerilimi.....	71
Şekil 3.13. Hızlanma Esnasında Oluşan a) Motor Sürücü Tarafından Çekilen Akım ve b) DA Bağ Gerilimi .....	72
Şekil 3.14. Hızlanma Esnasında Süperkapasitör Üzerinde Oluşan a) Deşarj Akımı ve b) Deşarj Gerilimi .....	72
Şekil 3.15. SiC MOSFET Tabanlı Çevirgecin PLECS Ortamında Benzetim Şeması .....	74
Şekil 3.16. IGBT Tabanlı Çevirgecin PLECS Ortamında Benzetim Şeması .....	74
Şekil 3.17. PLECS (a) Denetim, (b) Sıcaklık ve Kayıp Ölçüm Şemaları .....	75
Şekil 3.18. PLECS Ortamında İndirici Kipte 250 A ile Şarj Esnasında (a) Gerilim ve (b) Akım Grafikleri.....	76

Şekil 3.19. PLECS Ortamında İndirici Kipte 250 A ile Şarj Esnasında (a) İletim ve (b) Anahtarlama Kayıpları .....	76
Şekil 3.20. PLECS Ortamında İndirici Kipte Anahtarların Toplam Enerji Kaybı	77
Şekil 3.21. PLECS Ortamında İndirici Kipte (a) MOSFET Paketinin ve (b) Soğutucu Plakanın Sıcaklık Değişim Grafiği .....	77
Şekil 3.22. PLECS Ortamında İndirici Kipte (a) Anahtarların ve (b) Diyotların Şarj Esnasında Oluşan Eklem Sıcaklıkları .....	78
Şekil 3.23. IGBT Tabanlı Çevirgecin PLECS Ortamında İndirici Kipte 250 A ile Şarj Esnasında (a) Gerilim ve (b) Akım Grafikleri.....	78
Şekil 3.24. PLECS Ortamında İndirici Kipte 250 A ile Şarj Esnasında (a) İletim ve (b) Anahtarlama Kayıpları .....	79
Şekil 3.25. PLECS Ortamında İndirici Kipte Anahtarların Toplam Enerji Kaybı	79
Şekil 3.26. PLECS Ortamında İndirici Kipte (a) IGBT Paketinin ve (b) Soğutucu Plakanın Sıcaklık Değişim Grafiği .....	80
Şekil 3.27. PLECS Ortamında İndirici Kipte (a) Anahtarların ve (b) Diyotların Şarj Esnasında Oluşan Eklem Sıcaklıkları .....	80
Şekil 3.28. SiC MOSFET Tabanlı Çevirgecin PLECS Ortamında İndirici Kipte 250 A ile Şarj Esnasında (a) Gerilim ve (b) Akım Grafikleri.....	81
Şekil 3.29. PLECS Ortamında Yükseltici Kipte 250 A ile Şarj Esnasında (a) İletim ve (b) Anahtarlama Kayıpları.....	82
Şekil 3.30. PLECS Ortamında Yükseltici Kipte Anahtarların Toplam Enerji Kaybı .....	82
Şekil 3.31. PLECS Ortamında Yükseltici Kipte (a) MOSFET Paketinin ve (b) Soğutucu Plakanın Sıcaklık Değişim Grafiği .....	83
Şekil 3.32. PLECS Ortamında Yükseltici Kipte (a) Anahtarların ve (b) Diyotların Şarj Esnasında Oluşan Eklem Sıcaklıkları .....	83
Şekil 3.33. IGBT Tabanlı Çevirgecin PLECS Ortamında İndirici Kipte 250 A ile Şarj Esnasında (a) Gerilim ve (b) Akım Grafikleri.....	84
Şekil 3.34. PLECS Ortamında Yükseltici Kipte 250 A ile Şarj Esnasında (a) İletim ve (b) Anahtarlama Kayıpları.....	84
Şekil 3.35. PLECS Ortamında Yükseltici Kipte Anahtarların Toplam Enerji Kaybı .....	85
Şekil 3.36. PLECS Ortamında Yükseltici Kipte (a) IGBT Paketinin ve (b) Soğutucu Plakanın Sıcaklık Değişim Grafiği .....	85

Şekil 3.37. PLECS Ortamında Yükseltici Kipte (a) Anahtarların ve (b) Diyotların Şarj Esnasında Oluşan Eklem Sıcaklıkları.....	86
Şekil 3.38. Gerçek Bir Parkurun Durakları Arası Mesafeleri ve Eğim Değerleri	87
Şekil 3.39. Örnek Parkur için I ve J Durakları Arası Benzetimi Yapılan Motorun Hızı, Ürettiği Tork ve Çıkış Gücü .....	88
Şekil 3.40. Yol Boyunca Değişen DA-Bağ Gerilimi ve Frenleme Direnci Kısıcısı Tarafından Oluşturulan Anahtarlama Gerilimi.....	88
Şekil 3.41. Sistemin Süperkapasitör Gücü, Katener Gücü ve Motorun Giriş Gücü .....	89
Şekil 3.42. I ve J Durakları arası Süperkapasitör Gerilim ve Akım Değişimi .....	89
Şekil 3.43. 550 m'lik Eğimsiz Yolda Motor Modeli Benzetiminde Motorun Hız ve Ürettiği Tork Modelleri ve Motor Çıkış Gücü .....	91
Şekil 3.44. Sistemin Katener ve Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü ....	91
Şekil 3.45. 550 m'lik Eğimsiz Yol için Süperkapasitör Gerilim ve Akım Değişimi .....	92
Şekil 3.46. I ve J Durakları arası Motor Modeli Benzetiminde Motorun Hız ve Ürettiği Tork Modelleri, Motor Çıkış Gücü ve Eğim Verisi.....	93
Şekil 3.47. Sistemin Katener ve Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü ....	93
Şekil 3.48. I ve J Durakları arasında Süperkapasitör Gerilimi ve Akımı Değişimi .....	93
Şekil 3.49. Başlangıç Gerilimi Optimizasyonu sonrası 550 m'lik Eğimsiz Yolda Benzetimi Yapılan Motorun Hızı ve Ürettiği Tork Modelleri, Motor Çıkış Gücü ve Eğim Verisi .....	95
Şekil 3.50. Sistemin Katener ve Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü ....	96
Şekil 3.51. Başlangıç Gerilimi Optimizasyonu sonrası Eğimsiz Yolda Süperkapasitör Gerilimi ve Akım Değişimi.....	96
Şekil 3.52. Örnek Parkurda I ve J Durakları Arası, Başlangıç Gerilim Optimizasyonu sonrası Benzetimi Yapılan Motorun Hızı ve Ürettiği Tork Modelleri, Motor Çıkış Gücü ve Eğim Verisi .....	97
Şekil 3.53. Sistemin Katener ve Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü ....	98
Şekil 3.54. Başlangıç Gerilimi Optimizasyonu sonrası I ve J arası Süperkapasitör Gerilim ve Akım Değişimi.....	98

Şekil 3.55. Azami Enerji Geri Kazanımı Algoritması ile 550 m'lik Eğimsiz Yolda Benzetimi Yapılan Motorun Hızı ve Ürettiği Tork Modelleri, Motor Çıkış Gücü ve Eğim Verisi.....	100
Şekil 3.56. Sistemin Katener ve Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü ..	100
Şekil 3.57. Azami Enerji Geri Kazanımı Algoritması ile Eğimsiz Yolda Süperkapasitör Gerilimi ve Akımı .....	101
Şekil 3.58. Azami Enerji Geri Kazanımı Algoritması ile Örnek Parkurda I ve J Durakları arası Benzetimi Yapılan Motorun Hızı ve Ürettiği Tork Modelleri, Motor Çıkış Gücü ve Eğim Verisi.....	102
Şekil 3.59. Sistemin Katener ve Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü ..	102
Şekil 3.60. Azami Enerji Geri Kazanımı Algoritması ile Örnek Parkurda I ve J Durakları arası Süperkapasitör Gerilim ve Akım Değişimi.....	103
Şekil 4.1 EMOTRON VFXR/FDUL46-430 Aktif Doğrultucu ve Endüstriyel Motor Sürücüsü Devre Şeması .....	105
Şekil 4.2 Raylı Araç Modelini Oluşturmak için Laboratuvar Ortamına Kurulan Motor-Uçanteker-Jeneratör Seti.....	106
Şekil 4.3. Laboratuvar Ortamında Kurulan Süperkapasitör Depolamalı Frenleme Enerjisi Geri Kazanımı Sistemi için İndirici ve Yükseltici Tipte Çift Yönlü DA/DA Çevirgecin Güç Bloğu Kurulum Aşamaları (a) MOSFET Modüllerinin Soğutucu Fine Montajı, (b) Modüllerin Üzerine Mekanik ve Elektriksel Montajı Yapılan EMI Kapasitörlerin Bulunduğu Lamine Bara, (c) MOSFET Modüllerinin Orta Bacaklarına Mekanik Olarak Montajı Yapılan Tek Ortak Çıkışlı Bara, (d) Güç Bloğu Üzerine Gelen İletken ve Topraklanmış Plaka Üzerine Montajı Yapılan Denetim Kartları, ve MOSFET'lerin Kapılarına Takılan Fiberoptik Arayüzlü Kapı Sürücü Kartları .....	108
Şekil 4.4 Süperkapasitör Depolamalı Frenleme Enerjisi Geri Kazanımı Sistemi için İndirici ve Yükseltici Tipte Çift Yönlü DA/DA Çevirgeç .....	109
Şekil 4.5. Laboratuvar Ortamında Kurulmuş Olan 4 Adet Süperkapasitör Bankası Raf Yerleşimi.....	110
Şekil 4.6 Bilgisayar Üzerinde Koşan MATLAB/Simulink Programı Aracılığıyla, CANBUS İletişim Arayüzüyle, Tasarlanan Sistemlerin ve PLC'nin Haberleşme Şeması / PROFIBUS İletişim Arayüzüyle PLC ve Endüstriyel Motor Sürücünün Haberleşme Şeması.....	111



Şekil 4.7. Denetim Ekranları ve PLC Modülün Bağlantısı ve Genel Çalışma Düzeni .....	111
Şekil 4.8. SiC MOSFET'in Açılış Anındaki Akım ve Gerilim Grafikleri .....	113
Şekil 4.9. SiC MOSFET'in Kapanış Anındaki Akım ve Gerilim Grafikleri .....	114
Şekil 4.10 Süperkapasitör Şarj Olurken, (1) Süperkapasitör Gerilimi, (2) Reaktör Üzerinde Anahtarlama Esnasında Oluşan Akım, (3) Reaktör Üzerinde Anahtarlama Esnasında Oluşan Gerilim.....	115
Şekil 4.11 Süperkapasitör Deşarj Olurken, (1) Süperkapasitör Gerilimi, (2) Reaktör Üzerinde Anahtarlama Esnasında Oluşan Akım, (3) Reaktör Üzerinde Anahtarlama Esnasında Oluşan Gerilim.....	116
Şekil 4.12 Anahtarlama Esnasında S1 MOSFET'inin İletime Geçtiğinde Oluşan (1) Süperkapasitör Gerilimi, (2) Reaktör Gerilimi ve (3) Reaktör Akımının Yakınlaştırılmış Dalgalanma Grafikleri.....	117
Şekil 4.13 İndirici-Yükseltici Reaktörün Bode Analizör ile Ölçüm Altyapısı .....	118
Şekil 4.14. İndirici-Yükseltici Reaktörün Bode Analizör Ölçüm Sonucu, (1) Empedans, (2) Endüktans .....	119
Şekil 4.15. Süperkapasitörün Limit Akımla Deşarj Edilişi, (1) Süperkapasitör Gerilim ve (2) Süperkapasitör Akım Grafikleri.....	120
Şekil 4.16. Süperkapasitörün Limit Akımla Şarj Edilişi, (1) Süperkapasitör Gerilim ve (2) Süperkapasitör Akım Grafikleri.....	120
Şekil 4.17 Süperkapasitörün En Düşük Olabileceği Değere Kadar Deşarj Edildiği Düz Yolda Çalıştırılan Enerji Geri Kazanımı Senaryosunda (a) Osiloskop ile Ölçülen (1) Süperkapasitör Gerilimi, (2) Çift Yönlü Çevirgeç Giriş Akımı, (3) DA Bağ Gerilimi, (4) DA Bağ Akımı, ve MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen Motor Sürücü Giriş Akımı (b) MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen Motor Torku, Hızı ve Gücü, (c) MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen ve Hesaplanan Katener Gücü, Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü .....	123
Şekil 4.18. Süperkapasitörün En Düşük Olabileceği Değere Kadar Deşarj Edildiği Eğimli Yolda Çalıştırılan Enerji Geri Kazanımı Senaryosunda (a) Osiloskop ile Ölçülen (1) Süperkapasitör Gerilimi, (2) Çift Yönlü Çevirgeç Giriş Akımı, (3) DA Bağ Gerilimi, (4) DA Bağ Akımı, ve MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen Motor Sürücü Giriş Akımı (b) MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen Motor Torku, Hızı ve Gücü, (c) MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen ve Hesaplanan Katener Gücü, Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü .....	124

Şekil 4.19. Süperkapasitörün Azami Enerji Depolayabileceği Değere Kadar Deşarj Edildiği Düz Yolda, Frenleme Tork Profili ile Çalıştırılan Enerji Geri Kazanımı Senaryosunda (a) Osiloskop ile Ölçülen (1) Süperkapasitör Gerilimi, (2) Çift Yönlü Çevirgeç Giriş Akımı, (3) DA Bağ Gerilimi, (4) DA Bağ Akımı, ve MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen Motor Sürücü Giriş Akımı (b) MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen Motor Torku, Hızı ve Gücü, (c) MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen ve Hesaplanan Katener Gücü, Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü.....	126
Şekil 4.20. Süperkapasitörün Azami Enerji Depolayabileceği Değere Kadar Deşarj Edildiği Eğimli Yolda, Frenleme Tork Profili ile Çalıştırılan Enerji Geri Kazanımı Senaryosunda (a) Osiloskop ile Ölçülen (1) Süperkapasitör Gerilimi, (2) Çift Yönlü Çevirgeç Giriş Akımı, (3) DA Bağ Gerilimi, (4) DA Bağ Akımı, ve MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen Motor Sürücü Giriş Akımı (b) MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen Motor Torku, Hızı ve Gücü, (c) MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen ve Hesaplanan Katener Gücü, Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü.....	127
Şekil 5.1 Gerçek Yol Koşullarında Katenerden Akım Değerleri (Mavi Çizgiler Katenerden Çekilen Akım, Kırmızı Çizgiler Frenleme Direncinden Harcanan Akım).....	129
Şekil 5.2 Gerçek Yol Koşullarında Katenerden Akım Değerleri (Mavi Çizgiler Katenerden Çekilen Akım, Kırmızı Çizgiler Frenleme Direncinden Harcanan Akım).....	130
Şekil 5.3 Gerçek Parkurda 250 A, 500 V, 15.75 F'lık Süperkapasitör Bankası ile Standart EDS Çalışması ile Maksimum Enerji Depolama Algoritması Kullanılan EDS Çalışmasının Karşılaştırılması; Maksimum Enerji Depolama Algoritması Kullanılan Benzetim ile Laboratuvar Çalışmasının Karşılaştırılması, a) Katener Hattından Çekilen Güç (Mavi) ve Frenleme Direncine Verilen Güç (Kırmızı) ve Süperkapasitörün Sisteme Aktardığı ve Sistemden Aldığı Güç (Yeşil), b) Süperkapasitör Gerilim Değişimi. ....	132
Şekil 5.4 İlk Kurulum Maliyetine Göre Tasarruf Grafiği.....	136
Şekil 7.1. Cer Sürücüsü ve Cer Motoru Sisteminin Simulink Ortamındaki Güç ve Denetim Şeması.....	152
Şekil 7.2. 12 Darbe 3 Faz Diyot Köprü Doğrultucu Simulink Şeması .....	153

Şekil 7.3. Çift Yönlü İndirici ve Yükseltici Tipteki Çevirgecin, Cer Sürücüsü ve Diyot Köprü Doğrultucu Blokları ile Paralel Bağlantılı Simulink Şeması .....	154
Şekil 7.4. Süperkapasitör Depolama Sisteminin Simulink Kontrol Şeması .....	155
Şekil 7.5. Sadeleştirilmiş Katener Modeli ve Genel Devre Şeması.....	156
Şekil 7.6. Sadeleştirilmiş Cer Motoru ve Cer Motor Sürücü Modeli Şeması ...	157

# 1 GİRİŞ

## 1.1 Tezin Amacı

Şehir içi ulaşım için kullanılan hafif raylı ve metro sistemleri dünyada ve Türkiye’de DA gerilim taşıyan 3. Ray veya katener hattından beslenmektedir. Tramvay, hafif raylı ve metro araçlarında rejeneratif frenleme esnasında üretilen elektrik enerjisi genellikle DA katener hattına izin verilen ölçülerde geri basılmaktadır. Bu enerji fazlalığı güç çevrim istasyonlarında AA-DA şebekelerinin aralarında iki yönlü güç aktarımına izin veren aktif çevirgeç sistemleri olması durumunda şebekeye aktarılmakta, veya yoğun trafiği olan hatlarda sistemin gerekli düzenlemesi ile bir aracın frenlemesi süresince yakında bulunan diğer araç veya araçlar hızlanma modunda tutularak bu enerji kullanıldırılmaktadır. Bu iki sistemin kullanıldığı altyapı dünyada çok az örneğe sahiptir. AA şebekeye düzenli güç aktarımı sıkı regülasyonlara tabii olup, şebekeye düzensiz güç aktarımı çoğunlukla enerji dağıtım şirketleri tarafından kabul görmemektedir. Araçların birbirine göre optimizasyonla dur–kalk yaptığı sistemler çoğunlukla işletme zorluğu yaşatmakta, özellikle yoğun saatlerde uygulanamamaktadır. Bu iki sistemin genellikle olmadığı yerlerde ise DA katener hattındaki rejeneratif enerji frenleme dirençlerinde harcanmakta, enerjinin harcanmadığı durumda hat geriliminde istenmeyen yükselmeler oluşmaktadır. Bunu önlemek için rejeneratif frenleme enerjisinin büyük bir bölümü araca monte edilen frenleme dirençleri üzerinde ısı enerjisine dönüştürülerek dikkate değer miktarda enerjinin boşa harcanması sonucunu doğurmaktadır [1], [2]. Tren ağı yönetim stratejilerinin optimizasyonu, tüm şehir içi raylı sistemlerinde enerji verimliliğini artırmak için geçmişten günümüze çalışılan bir konu olmuştur [3], [4]. Ancak operasyonel belirsizlikler nedeniyle bu çalışmanın teorisi ile pratik uygulamalar arasında hala bir boşluk olduğu gösterilmektedir [5]. Bunun yanı sıra, Enerji Depolama Sistemleri (EDS) ve/veya çift yönlü cer güç dönüştürücüleri operasyonel belirsizliklerden uzak ve güç alt yapısına uygulanması kolaydır.

Yukarıda sıralanan nedenlerle, tramvay, hafif raylı ve metro ulaşım araçlarında frenleme enerjisinin geri kazanımı amacıyla araç üstünde bir enerji depolama sistemi kurulumu planlanmıştır. Bu tezin temel amacı bu sistemlerin Türkiye’de

geliştirilebilecek seviyeye getirilip, Türkiye’de ve dünyadaki ulaşım araçlarında yaygın şekilde kullanılabilmesi için gerekli bilimsel ve teknolojik katkıyı sağlamaktır.

Frenleme enerjisi geri kazanımı ve güç kalitesinin iyileştirilmesi için alınabilecek önlemler verilen üç grupta toplanabilir:

1. Herbir ulaşım aracının enerji depolama sistemi ile donatılması [2], [6]–[11].
2. Herbir güç çevrim istasyonunun enerji depolama sistemi ile donatılması [12]–[18].
3. DA katener hatlarında, eski tesislerde her bir çevirgeç istasyonunun iki yönlü güç akışına izin verecek şekilde yeniden düzenlenmesi veya yeni tesislerde bu amaca uygun olarak tasarım ve uygulama yapılması [19]–[21].

DA katener veya 3. ray üzerinden beslenen raylı ulaşım sistemlerinde bahsi geçen tüm sistemler yüksek boyutlarda enerji tasarrufu sağlayacaktır. 1 ve 2 nolu yöntemler DA besleme hattından daha düzgün bir elektriksel güç çekilmesini sağlayacağı gibi, bu sistemlerin filtreleme ve kompanzasyon işlevleri ile donatılması durumunda hattaki tüm güç kalitesi problemlerine bir çözüm olacaktır. Bu özelliklere ek olarak, işletme güvenilirliği artacak; özellikle 1 nolu yöntemin uygulandığı araçlarda, enerji arızası ve/veya varsa ölü bölgelerden geçiş esnasında aracın bir sonraki istasyona kadar hareketinin devam etmesi sağlanabilecektir; bu yöntemle, 3. ray üzerinden çekilen akımın miktarı düşecek ve hat gerilimi daha az oynayacaktır. 1 ve 2. maddede bahsedilen EDSler ile 3. maddede bahsedilen çift yönlü güç çevrim istasyonu yapıları [22] nolu makalede incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Son yıllarda, ticari sistemlerde veya AR-GE amaçlı yapılan çalışmalarda kullanılan depolama sistemleri : a. Süperkapasitörler (SC), b. Bataryalar (B), c. Uçantekerlerdir (Flywheel) (F). Bu depolama sistemleri 1 ve 2 nolu uygulamalarda kullanılabilmekte ve bu sistemler [7], [23], [24] nolu yayınlarda karşılaştırılmıştır. 2013 yılında yayınlanan makalede yukarıda sıralanan enerji

tasarruf yöntemleri ve sistemler incelenmiştir [25]. Yine aynı yazarların 2014 yılında yayımlanan makalesinde ise , 2014 yılına kadar ticari olarak mevcut veya prototip sistem olarak üretilen ve raylı ulaşım aracı üzerine monte edilen ve istasyonlara tesis edilen Enerji Depolama Sistemleri (Energy Storage Systems - ESS) ile her iki yöne güç akışı sağlayabilecek dünyada mevcut güç çevrim istasyonları özetlenmiştir [26]. Sırasıyla, Çizelge 1.1'de, araç üzerine monte edilen Enerji Depolama Sistemleri, Çizelge 1.2'de güç çevrim istasyonuna tesis edilen Enerji Depolama Sistemleri ve Çizelge 1.3'te iki yönlü akış sağlayan güç çevrim istasyonları listelenmiştir.

Çizelge 1.1 Araç Üzerinde Enerji Geri Kazanımı Sistemi Monte Edilmiş ve Kullanımı Olan Sistemler [26]

ÜRÜN	ŞİRKET	TEKNOLOJİ	ANA ÖZELLİKLER	UYGULAMA
<b>MITRACTM</b>	Bombardier	SC	PC: 300 kW EC: 1 kWh W: 450 kg D: 1700 x 680 x 450	Ticari olarak kullanımda. Mannheim HRA, 2003–2007; Rhein-Neckar-Verkehr GmbH tramvayı, 2013.
<b>Sitras® MES</b>	Siemens	SC	PC: 288 kW EC: 0.85 kWh W: 820 kg D: 2000 x 1520 x 630	Ticari olarak kullanımda. Innsbruck tramvayı.
<b>ACR</b>	CAF	SC	PC: N/A EC: 0.8 kWh W: 800 kg D: --	Ticari olarak kullanımda. Seville, Saragossa ve Granada tramvayları.
<b>STEEM</b>	Alstom	SC	PC: N/A EC: 0.8 kWh W: 800 kg D: --	Paris tramvayında prototip testleri 2009-2010 yılları arasında.
<b>Citadis Flywheel</b>	Alstom & CCM	F	PC: 325 kW EC: 4 kWh W: 1600 kg D: --	Rotterdam prototip testleri 2004-2005 yılları arasında.
<b>LRV Swimo</b>	Kawasaki	B(NiMH)	PC: 250 kW EC: 120 kWh W: 3200 kg D:--	Sapporo Municipal ulaşım ağı prototip testleri, 2007-2008 yılları arasında.
<b>LFX-300 Streetcar</b>	Kinki Shayro	B(Li-ion)	PC: N/A EC: 40 kWh W: 3200 kg D:--	Charlotte prototip testleri, 2010.
<b>Sitras® HES</b>	Siemens	SC + B(NiMH)	PC: 288 + 105 kW EC: 0.85 + 18 kWh W: 820 + 826 kg D: 2000 x 1520 x 630 1670 x 1025 x 517	Güney Lizbon'da MTS HRA sistemleri 2008'den beri serviste.
<p>(*) PC = Güç Kapasitesi, EC = Enerji Kapasitesi, W = Kütle, SC: Süperkapasitör, B: Batarya, F: Uçanteker D = Boyutlar (En x Boy x Yükseklik) (mm)</p>				

Çizelge 1.2 Güç Çevrim İstasyonuna Enerji Geri Kazanımı Sistemi Monte Edilmiş ve Kullanımı Olan Sistemler [26]

ÜRÜN	ŞİRKET	TEKNOLOJİ	ANA ÖZELLİKLER	UYGULAMA
<b>Sitras® SES</b>	Siemens	SC	CV: 600/750 V PC: 700 kW EC: 2.5 kWh	Madrid ve Köln 2003; Pekin Metro su 2007; Toronto Raylı Ulaşım 2011.
<b>EnerGstor™</b>	Bombardier	SC	CV: 600, 750, 1500 V PC: 650 kW EC: 1 kWh	N/A
<b>NeoGreen® Power</b>	Adeneo (Adetel)	SC	CV: 750 V PC: 300–1000 kW EC: 1–4 kWh	Lyon Tramvay, Pilot Proje, 2011.
<b>Envistore™</b>	Envitech Energy (ABB)	SC	CV: 500–1850 V PC: 750–4500 kW EC: 0.8–16.5 kWh	Varşova Metro su; Philadelphia Ulaşım Sistemi, Pilot Proje 2012 (Batarya-Tabanlı).
<b>Capapost</b>	Meidensha	SC	CV: N/A PC: 2000 kW max EC: N/A	Hongkong Metro su, 2012
<b>Powerbridge</b>	Piller Power Systems	F	CV: 400, 1000 V PC: 1000 kW EC: 5 kWh	Hannover Metro su 2004, Rennes Metro su, 2010
<b>GTR system</b>	Kinetic Traction Systems	F	CV: 570–900 V PC: 200 kW EC: 1.5 kWh	Londra Metro su, 2000; New York Şehri Ulaşım Sistemi 2002; Lyon Metro su, 2003-2004.
<b>Regen® system</b>	Vycon	F	CV: N/A PC: 500 kW EC: N/A	Los Angeles Metro su, 2013
<b>Gigacell® BPS</b>	Kawasaki	B(NiMH)	CV: 600, 1500 V PC: N/A EC: 150–400 kWh	New York Şehri Ulaşım Ağı 2010; Osaka Şehri Metro, 2007.
<b>B-CHOP</b>	Hitachi	B(Li-ion)	CV: 600/750, 1500 V PC: 500–2000 kW EC: N/A	Kobe Ulaşım Sistemi, 2007; Macau Metro Sistemi;
<b>Intensium Max</b>	Saft	B(Li-ion)	CV: 700 V PC: 900–1500 kW EC: 600–400 kWh	Philadelphia Ulaşım Sistemi, 2012.
<b>(*) PC = Güç Kapasitesi, EC = Enerji Kapasitesi, CV: Katener veya 3. Ray Gerilimi</b>				

Literatürdeki mevcut bilgiler, süperkapasitör depolamalı frenleme enerjisi geri kazanımı sistemleriyle cer enerjisinin geri kazanımında yaklaşık %30 tasarruf, toplam enerji talebinde de %20 civarında azalma sağlanabileceğini göstermektedir [2], [27].

Çizelge 1.3 Çift Yönlü Güç Akışı Sağlayan Çevrim İstasyonu Sistemi Olan Raylı Ulaşım Hatları [26]

ÜRÜN	ŞİRKET	ANA ÖZELLİKLER	UYGULAMA
HESOP	Alstom	NV: 750 V PC: 0.3 MW	T1 Tramvay Hattı, Paris; London ve Milan Metroları
Sitras® TCI	Siemens	NV: 750, 1500 V PC: 1.5, 2.2 MW	Oslo Metrosu Holmenkollen Hattında Test Edilmiş; Singapur Şehir Hattında Kullanılacak
Ingeber	Ingeteam	NV: 1500 V PC: 1.5 MW	Bilbao Metro Sisteminde Testte 2009; Bielefeld HRA Sistemine Yeni Entegre Edilmiş
ENVILINE ERS	ABB	NV: 600/750 V PC: 0.5–1.0 MW	Lodz Tramvay Sisteminde Kullanılacak.

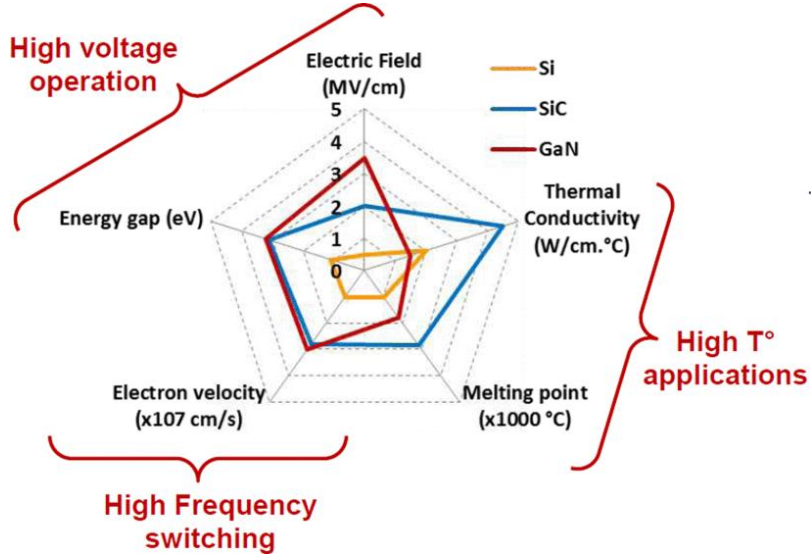
Tramvay, hafif raylı ve metro araçlarında enerji tasarrufu yapmak için Bölüm 1.1’de bahsedilen enerji depolama ünitelerinden batarya ve süperkapasitörler en yaygın kullanılanları olarak bir çok çalışmada göze çarpmaktadır [2], [6]–[9], [12]–[15]. Enerji depolama biriminin süperkapasitör olmasının çok uzun mesafeleri enerji hattından bağımsız gitmek için yeterli olmadığı görülmüştür. Uzun mesafede katenersiz seyahat yoksa enerji tasarrufunu arttırmak için araç üzerinde süperkapasitörlerin güç kapasiteleri yüksek olduğundan tercih edildiği görülmektedir. Uygun kapasitede süperkapasitör kullanarak kısa mesafelerin katener hattından bağımsız katedilebildiği literatürdeki çalışmalarda gösterilmiştir [2], [6], [28].

Literatürdeki bilgiler ışığında son 10 yılda kullanıma alınmış, raylı ulaşım sistemlerinde kullanılan ticari veya prototip enerji depolama sistemlerinin iki yönlü enerji aktarımına izin veren çevirgeçlerinde İzole Kapılı Bipolar Tranzistör (IGBT) gibi alışıla gelmiş Si tabanlı güç yarı iletkenlerinin kullanıldığını göstermektedir [2, 18–22].

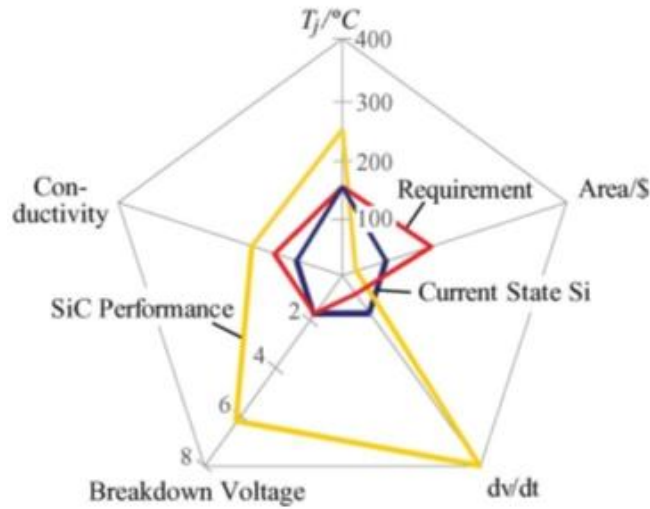
Bu tür çevirgeçler birkaç yüz Hz veya birkaç kHz frekansta anahtarlandığından, dikkate değer bir hacim – ağırlığa ve akustik gürültü problemlerine sahiptir. Diğer taraftan, dünyada son yıllarda, güç yarı iletkenleri teknolojisinde dikkate değer gelişmeler olmuştur [23, 24]; Geniş Kuşak Aralıklı (Wide Band Gap) güç yarı iletkeni üreticileri ilk örneklerine kıyasla daha yüksek gerilim ve akım seviyelerindeki ürünlerini ticari olarak pazara sunmuştur [25–28]. Silisyum Karbür (SiC) tabanlı güç (metal oksit yarı-iletken alan etkili tranzistör) MOSFET’leri [25,



26] ve Galyum Nitrit (GaN) tabanlı güç (yüksek elektron akışlı tranzistör) HEMT'leri [27, 28] Geniş Kuşak Aralıklı kontrollü güç yarı iletkenlerinin başlıcalarıdır. SiC ve GaN tabanlı kontrollü güç yarı iletkenlerinin Si tabanlı güç yarı iletkenlerine göre Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'den de anlaşılacağı üzere, başlıca avantajları daha yüksek dayanma gerilimini daha yüksek anahtarlama frekansında ve daha yüksek sıcaklıkta sağlayabilmeleridir [23, 24] .



Şekil 1.1 Si, SiC ve GaN Tabanlı Güç Yarı İletkenlerinin Teknik Özellikleri [32]



Şekil 1.2 Si ve SiC Tabanlı MOSFET'lerin Teknik Özellikleri [33]

Bu tez çalışmasının ana amacı hafif raylı, tramvay ve metro ulaşım sistemlerinin yeni nesil SiC güç MOSFET'leri kullanılan süperkapasitör tipi depolama birimi ile

donatmaktadır. Bu sistem, frenleme esnasında ve/veya yokuş aşağı sabit hız sürüş esnasında kinetik ve/veya potansiyel enerjiyi geri kazanıp, bu enerjiyi, aracın hızlanmasında, enerji kesintisinde ve ölü bölgelerde kullanıp yüksek enerji tasarrufu, katener hat gerilimi regülasyonu ve işletme güvenilirliği sağlamayı amaçlamaktadır.

## 1.2 Tezin Katkısı

Bu tez çalışmasının ana katkısı SiC MOSFET tabanlı Süperkapasitör EDS'yi baştan tasarlayıp bir raylı araç üzerine takılacak ürünü çıkarmaktır. Bununla birlikte süperkapasitör EDS ile yapılacak enerji tasarrufunu azami seviyeye çıkarmak için geliştirilen algoritmayı araç üzerinde uygulanabilecek seviyeye getirecek akademik ve endüstriyel alt yapıyı hazırlamaktır.

Bu tez çalışmasının katkıları şöyle sıralanabilir:

- i. Süperkapasitör EDS için boyutlandırma çalışmaları yapılmış, buna göre gerçek bir sistemde hangi boyutta bir süperkapasitör bankasının ihtiyacı karşılayacağı ve mali olarak anlamlı olduğu ortaya konmuştur.
- ii. 125 kW'lık, 750 V DA girişli, 250-500 V DA çıkışlı, çift yönlü bir DA/DA çevirgeç SiC güç MOSFET'leri kullanılarak tasarlanmıştır. Bu tasarımda kullanılan SiC güç MOSFET'i detaylı olarak incelenmiş ve geleneksel güç anahtarlama aygıtlarıyla (Si- ve Hibrit- IGBT) kayıplar, ısıl başarımlar, anahtarlama frekansı ve buna bağlı hacim azalışı bakımından kıyaslanmıştır.
- iii. Çevirgeçte kullanılacak indüktör ve kapasitörler üzerine çalışılmıştır. En uygun indirici-yükseltici reaktörünü seçebilmek için anahtarlama frekansına ve akım dalgalanma miktarına göre analiz yapılmış ve uygun değerlerde indüktans değeri belirlenmiştir. Burada yapılan çalışma diğer çalışmalara yol gösterici nitelikte olmuştur.
- iv. Süperkapasitör kullanımında enerji tasarrufunu azami düzeye çıkaran bir algoritma üzerine çalışılmıştır. Bu algoritma ile frenleme esnasında açığa çıkan enerjinin frenleme direncinde kaybolacak kısmı asgari düzeye indirilmiş, süperkapasitörün değişken gerilimindeki güç kapasitesi azami

düzeyde, enerji depolama kapasitesi de optimum seviyede kullanılabilmiştir. Böylece enerji tasarrufu da azami düzeye getirilebilmiştir. Bu çalışmalar hem benzetimler ile hem de laboratuvar ortamında doğrulanmış ve sonuçları paylaşılmıştır. Standart olarak kullanılan enerji geri kazanımı ile geliştirilen algoritmanın kıyaslaması yapılmış ve % 6 ile % 8 arasında bir enerji tasarruf artışı gösterilmiştir. Bu algoritma çalışmasında sadece akademik katkı düşünülmemiş, endüstriyel olarak uygulanabilir teknik olmasına önem verilmiştir.

- v. Süperkapasitörlü enerji depolama sisteminin ilk kurulum maliyet analizi çalışılmış ve yatırımın kendini ne kadar sürede çıkaracağı hesaplanmıştır.
- vi. Raylı araçlar için birebir ölçekli süperkapasitörlü frenleme enerjisi geri kazanımı sistemi (çift yönlü indirici-yükseltici çevirgeç, süperkapasitör yönetimi, çekiş sistemi tasarımı, vd.) tasarımı, kurulumu ve elektriksel doğrulama çalışmaları üniversite bünyesinde yapılmıştır. Bu alt yapı akademik ve endüstriyel araştırmalar için kullanılabilir olacaktır.

Çizelge 1.2'de verilen enerji çevrim istasyonuna kuruluna enerji depolama sistemlerin fiziksel olarak benzetimini yapmak için 3. Ray, katener ve tekerlerin temas ettiği rayın empedans değerlerinin detaylı çıkarılması gerektirmektedir. Bu sebeple, tez çalışması araç üzerine montajı yapılan sistemlerin ölçümlerini hedeflemekte, istasyona kurulu sistemlerin fiziksel benzetimini kapsamamaktadır. Ancak kurulmuş olan bu laboratuvar düzeneği ile bu çalışmalar da yapılabilecektir.

### **1.3 Tezin Yapısı**

Bu tez çalışması toplamda altı ana bölüm ve ek bölümünden oluşmaktadır.

Birinci bölümde tezin amacı ve bu bağlamda literatürde nasıl çalışmalar ve ürünler olduğu değerlendirilmiştir. Bununla birlikte tez kapsamında yapılan çalışmalarla literatüre ve endüstriye nasıl katkı sağlanabileceği tartışılmıştır.

İkinci bölümde süperkapasitörler ve kullanım alanları üzerinde genel bilgiler verilmiştir. Süperkapasitörün iç yapısından, enerji amacıyla farklı topolojilerle kullanım alanlarına, süperkapasitör dışında kullanılacak enerji depolama ünitelerinden, süperkapasitörün kullanımı için uygun devre topolojilerine değinilmiştir. Süperkapasitör depolamalı frenleme enerjisi geri kazanımı sisteminin tasarım aşamaları, matematiksel hesaplamaları, mekanik ve elektriksel hesaplamalar ve tasarımlar hakkında bilgiler yine bu bölümde verilmiştir. Bu bölümde ayrıca tezin en önemli katkısından biri olan süperkapasitör frenleme başlangıç gerilimi analitik çıkarımı ve frenleme ivmesi ve süperkapasitör şarj profiliyle enerji geri kazanımını azami düzeye çıkaran algoritma detaylı olarak anlatılmıştır. Süperkapasitör depolamalı frenleme enerjisi geri kazanımı sistemine entegre olarak çalışılan cer sürücüsü sistemi de bu bölümde anlatılmıştır.

Üçüncü bölüm benzetim çalışmalarını içermektedir. Bu bölümde denetim sisteminin benzetim çalışmalarıyla tasarımı, anahtarlama elemanlarının kıyaslama benzetimleri, süperkapasitörün enerji tasarrufuna katkısı ve üçüncü bölümde anlatılan frenleme başlangıç gerilimi ve frenleme ivmesi ve şarj profili çalışmalarının enerji tasarrufundaki etkisi ve katkısı benzetim çalışmalarıyla sunulmuştur.

Dördüncü bölümde sistemin tasarımı sonrası kurulumu, çalıştırılması hakkında bilgiler verilmiştir. Bu sistemin kurulumu ile birlikte üzerinde çalışılan sistem üzerinden alınan görüntüler ve ölçümler gösterilmiş, benzetim çalışmalarının sonuçlarıyla kıyaslama yapılmıştır.

Beşinci bölümde benzetimler ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen çıktıların birbirleriyle karşılaştırması ve değerlendirmesi yapılmış, bu sonuçlar üzerine tartışılmıştır. Ayrıca sistemin ilk kurulum maliyeti ve geri ödeme süresi üzerine çalışmalar da burada anlatılmıştır.

Altıncı bölümde sonuçlar değerlendirilmiş ve akademik ve endüstriyel katkı ve geleceğe yönelik yapılabilecek çalışmalara değinilmiştir.

## 2. SÜPERKAPASİTÖR DEPOLAMALI FRENLEME ENERJİSİ GERİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİNİN TASARIMI

### 2.1 Raylı Sistemlerde Enerji Depolama Sistemi Kullanımı

Elektrikli veya hibrit birçok şehir içi ulaşım sisteminde enerji depolama birimi kullanılmaktadır. Özellikle bir hatta bağlı kalmadan çalışması gereken otobüs, otomobil ve kamyon gibi taşıtlarda enerji depolama birimi kullanımı bir zorunluluktur.

Belirli bir AA veya DA katener hattından beslenen raylı sistemlerde enerji depolama birimi kullanmak bir zorunluluk olmamakla birlikte, günümüz koşullarında enerji tasarrufu için bir gereklilik olmuştur. Hali hazırda birçok raylı ulaşım sistemlerinde bataryalar, uçantekerler kullanılmış ve çok da uzak olmayan bir geçmişte süperkapasitörler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [Bkz. Çizelge 1.1, Çizelge 1.2].

#### 2.1.1 Uçantekerli Enerji Depolama Sistemleri

Uçantekerler, bir jeneratöre bağlı olarak dönen mekanik yüklerdir. Uçantekerli sistemler birbirine bağlı motor sürücü, motor ve uçanteker olmak üzere üç farklı birimden oluşmaktadır.

Bu sistemlerde, yüksek ataletsel momenti olan bir uçanteker, bu tekerin dönmesini sağlayan bir motor ve bu motorun sürücüsü temel bileşenlerdir. Burada, frenleme esnasında açığa çıkan elektrik enerjisi, uçantekerin diğer bileşenleri aracılığıyla yüksek hızlarda ve hava sürtünmesiz ortamda, bir mil veya uygulanan bir manyetik alanla güvenli bir kutu içerisinde döndürülmesiyle kinetik enerji olarak depolanmaktadır.

Bu sistemlerin ömür, güç yoğunluğu ve hızlı enerji depolayabilme ve depoladığı enerji miktarı yüksek sistemler olabilme özellikleri açısından ciddi avantajları vardır. Diğer taraftan güvenlik açısından ciddi sorunları beraberinde taşımakta, kapladığı alan açısından ve girokopik etkisinden dolayı hareket eden araçların üzerinde kullanımı kısıtlı kalmıştır [7]. Ancak güç çevrim istasyonlarında güvenlik

ve hacim sıkıntısı olmadığından, frenleme enerjisi depolama birimi olarak kullanımlarında başka çalışmalar olmuştur [38], [39].

## **2.1.2 Bataryalı Enerji Depolama Sistemleri**

Bataryalı frenleme enerjisi depolama sistemlerinde batarya sisteme iki türlü bağlanabilmektedir. Bataryaların dolu ve boş durumlarında gerilim seviyeleri çok oynamadığı için bataryalar sistemin çalışma gerilimi seviyelerine kadar seri bağlanabilir ve sisteme bağlantısı direkt yapılabilir. Diğer durumda ise bataryalar sistemin çalışma gerilimine yakın veya üçte bir seviyelerine kadar izolesiz bir çevirgeçle bağlanabilir veya daha düşük gerilim seviyeleri kullanılarak bağlanıp izoleli bir çevirgeç vasıtasıyla sisteme entegre edilebilir.

Bataryalı sistemler çok uzun süredir ve hali hazırda kullanılmaktadır [7], [8], [10], [14], [15]. Bu sistemlerde enerji yoğunluğu çok yüksek olup, özellikle katenersiz kullanımların çok ve uzun olduğu ve sistem başarımından ödün verilmemek istendiği araçlarda fazlaca kullanılmaktadır. Bataryalı sistemlerin ısı kaybının yüksek olması, güç yoğunluğunun düşük olması, bataryaların şarj çevrim sayılarının düşük olması nedeniyle enerji tasarrufunun ikincil, menzil ve katenersiz çalışmanın birincil öneme sahip olduğu sistemlerde kullanılmaktadır.

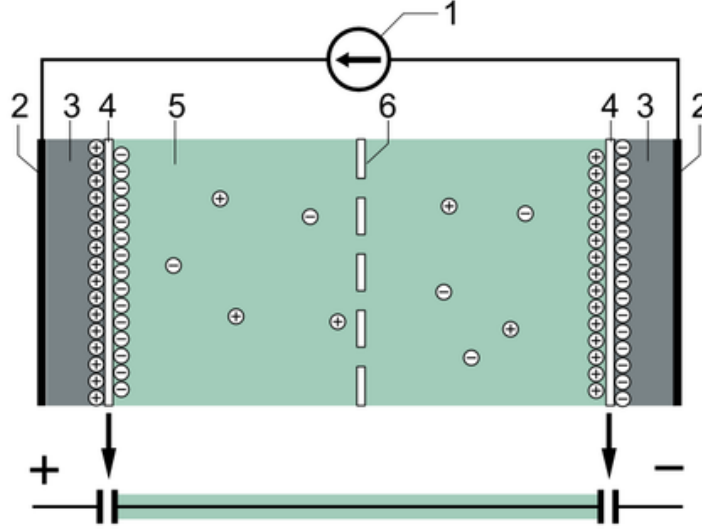
Eski bataryalara nazaran daha yüksek verim ve daha yüksek şarj çevrim sayılarına (~2-3x) ulaşabilen, daha hafif, yeni nesil li-ion bataryalarla birlikte bataryalı sistemler, çalışmalarda ve ticari ürünlerde ciddi anlamda yerini korumaktadır [7], [8], [14], [40].

## **2.1.3 Süperkapasitörlü Enerji Depolama**

### **2.1.3.1 Süperkapasitör Teknolojisi**

Süperkapasitör, elektriksel çift katmanlı kapasitörler (EDLC) ve sözde kapasitörlerin (Pseudo Capacitors) genel adı olup, geleneksel elektrolitik kapasitörlerden çok daha fazla kapasitans değerine, bunun yanında düşük gerilim kapasitesine sahip elektrik alan temelli enerji depolama birimleridir.

Çift katmanlı kapasitörler, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi genellikle karbon elektrotların (3) ve benzerlerinin iletken olarak kullanıldığı, elektrot (3) ve elektrolit yüzeyleri (5) arasında elektron yüklerinin ayrılmasının Helmholtz çift katmanıyla (4) sağlandığı kapasitörlerdir; yükün ayrıldığı katmanın (4) aralığı sıradan elektrolitik kapasitörlere göre çok küçük olup 3 Å – 8 Å seviyelerindedir. Daha detaylı bilgi ve süperkapasitörlerin kısa tarihçesi için [41]–[43] nolu referanslar incelenebilir.



Şekil 2.1. Süperkapasitörün İç Yapısı (1) Akım Kaynağı, (2) İletken Katman, (3) Karbon Elektrot, (4) Dielektrik Malzeme, (5) Elektronların Serbest Akış Yaptığı Elektrolitik Sıvı, (6) Seçici Geçirgen Ayraç

### 2.1.3.2 Süperkapasitörlerin Enerji Kapasitesi, Özgül Enerji ve Özgül Gücü

Süperkapasitörler, enerji yoğunluğu bakımından geleneksel kapasitörler ile bataryalar arasındaki boşluğu doldurmaktadır. Süperkapasitörler üzerinde en fazla depolanabilecek enerji formülü tüm kapasitörlerde depolanabilecek en fazla enerji formülüyle aynı olup (2-2)’de verilmiştir.

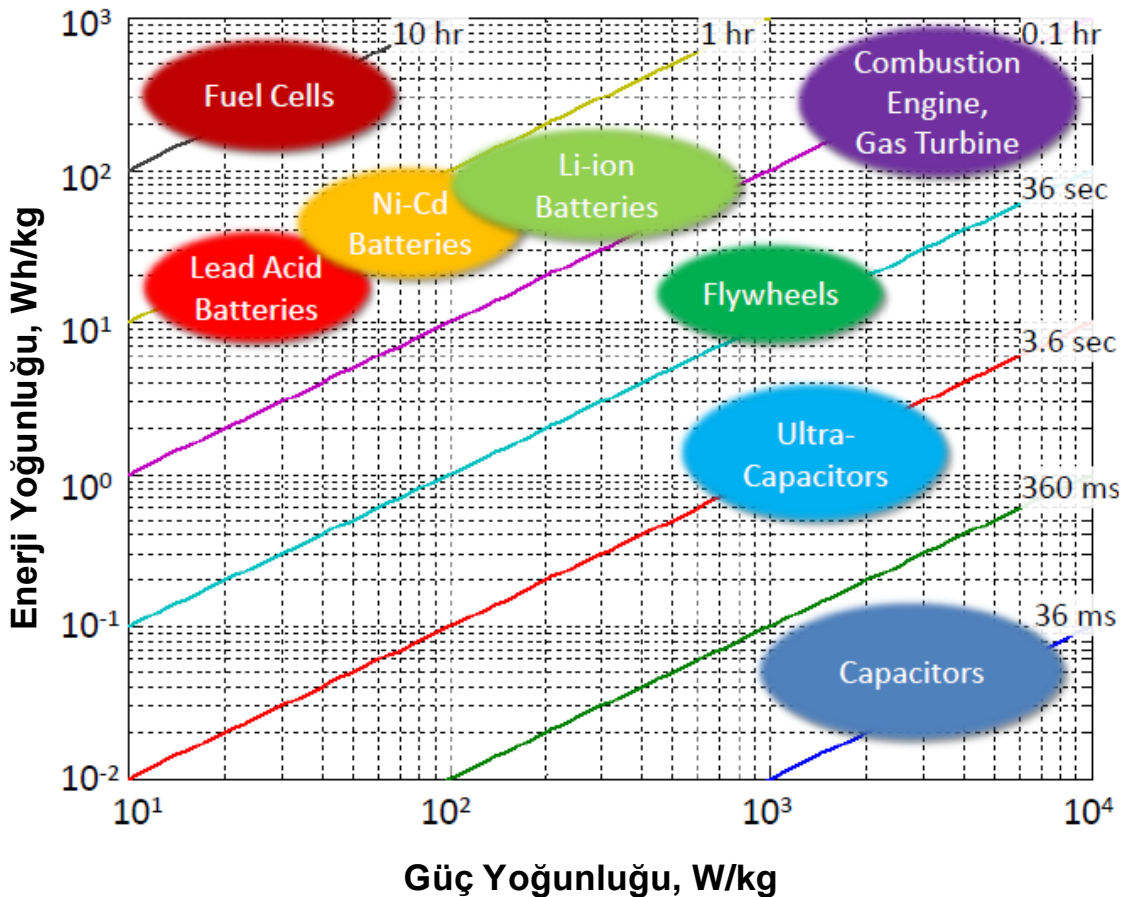
$$W_{max} = \frac{1}{2} CV_{max}^2 \quad (2-1)$$

Süperkapasitörlerin genellikle uygulamalarda üzerinde tutulması istenen en düşük gerilim miktarı 0’dan fazla olduğundan kullanılacak etkin enerji miktarı,

depolanabilecek tepe gerilim ile uygulamada kullanılacak en düşük gerilim miktarıyla, (2-3)'te verildiği şekilde hesaplanabilir.

$$W_{eff} = \frac{1}{2} C (V_{max}^2 - V_{min}^2) \quad (2-2)$$

Enerji depolayabilen tüm sistemlerde kütleye veya hacime göre depolayabildiği enerji miktarı önemli bir kıstastır. Süperkapasitörlerin depolayabileceği kütle enerji yoğunluğu 0.5 Wh/kg ile 15 Wh/kg arasında değişmektedir. Geleneksel kapasitörlerde bu değerler 0.01 Wh/kg ile 0.3 Wh/kg değerleri arasında olup, hali hazırda en çok kullanılan elektrik enerjisi depolama ortamı olan Li-ion bataryaların kütle enerji yoğunluğu değerleri ise 100 Wh/kg ile 265 Wh/kg arasında değişmektedir [44]. Süperkapasitörler Şekil 2.2'de görülen Ragone Şemasında enerji depolama yoğunluğu sınıflandırmasında bu iki tür malzemenin arasında yer almaktadır.



Şekil 2.2. Çeşitli Depolama Ortamlarının Özgül Enerji ve Özgül Gücünü Gösteren RAGONE ŞEMASI [44], [45]

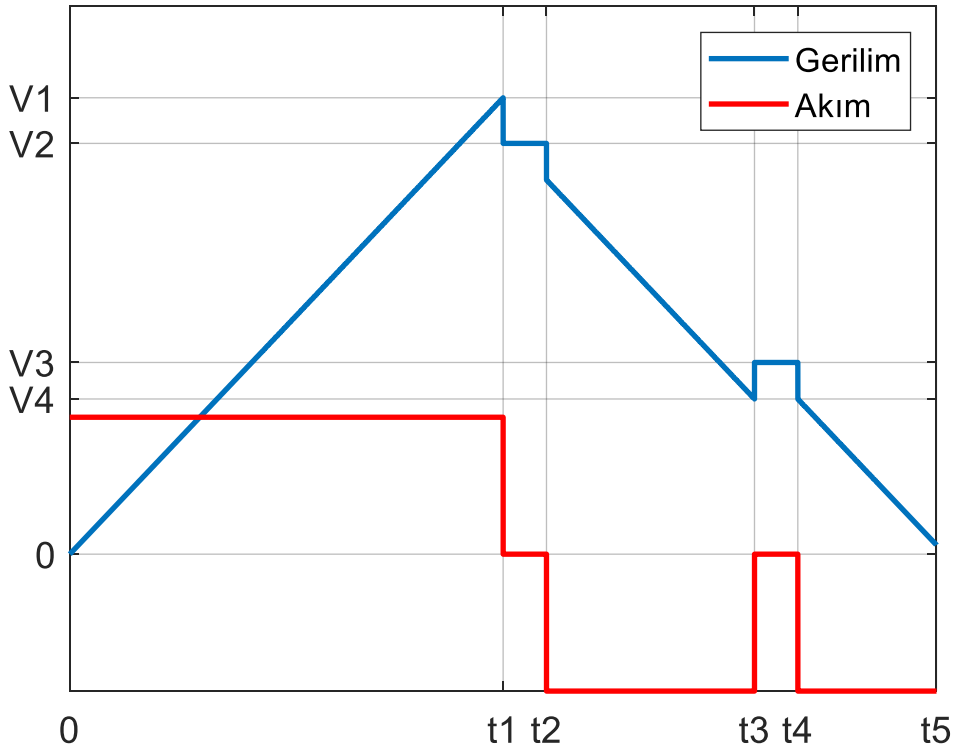


Diğer bir kriter olan özgül güç (W/kg) ise süperkapasitörlerde daha ön plana çıkan bir özelliktir. Bataryaların iç direncinin yüksek olması özgül güçlerini düşük hale getirmektedir. Elektrik enerjisi depolayabilen bir cihazın en fazla verebileceği güç miktarı (2-4)'te verilmiştir [44], [45].

$$P_{max} = \frac{1}{4} \cdot \frac{V^2}{R_i} \quad (2-3)$$

Süperkapasitörler Şekil 2.3'te görüldüğü gibi şarj ve deşarj olurken üzerinde tuttuğu gerilim miktarı değişeceği ve çekilen akım grafiği tam teoride gösterildiği gibi aynı seviyede olamayacağı için IEC 62391-2 standardında belirtildiği üzere etkin özgül güç değeri (2-5)'teki şekliyle verilmiştir.

$$P_{eff} = \frac{1}{8} \cdot \frac{V^2}{R_i} \quad (2-4)$$



Şekil 2.3. Süperkapasitör Şarj ve Deşarj Grafiği, 0-t1 → Şarj etme, t1-t2 → Şarjı Kesme, t2-t3 → Deşarj Etme, t3-t4 → Deşarjı Kesme, t4-t5 → Tam Deşarj

Şekil 2.2'de görüldüğü üzere Ragone Şemasıyla uygulamaya göre hangi enerji depolama cihazının özgül enerji ve özgül güç bakımından kullanılabileceği

saptanabilmektedir. Süperkapasitörler, depolayabildiği enerji miktarında geride kaldığı li-ion bataryalardan 10 ila 100 kat civarında daha fazla güç verebilerek, etkin güç miktarında öne geçmektedir.

### **2.1.3.3 Süperkapasitör Enerji Depolama Sisteminin Farklı Alanlar için Uygulamaları**

Süperkapasitörler, bataryaların yerine veya bataryalarla birlikte tüketici elektroniğinden, otomobillere, mikrodenetleyici, mikroişlemci ve hafızalardan, çok yüksek güç gerektiren ulaşım ve taşımacılığa kadar birçok uygulamada kullanılmaktadır.

Düşük güç gerektiren uygulamalar, genellikle bilgisayarlarda hafızaya (RAM) yedek güç oluşturmak amacıyla, el aletlerinin hızlı şarj olması ve anlık güç verebilmesi için bataryalarla birlikte veya tek başına kullanımındadır. Bu uygulamalarda genellikle bir veya birkaç süperkapasitör seri ve paralel bağlanarak yeterli miktarda enerji depolama sağlanmaktadır [46].

Yüksek güç gerektiren uygulamalarda genellikle 5 veya daha fazla süperkapasitörün seri olarak bağlandığı ve bunların paralel kombinasyonlarının kullanıldığı modüller ile sistemler kurulmaktadır. Bu modüller boyutlarına göre:

- Kesintisiz güç kaynaklarında [47];
- Temiz enerji uygulamalarında, rüzgar türbinlerinde ve güneş panellerinde [48], [49];
- İnşaat ve madencilik sektörlerinde vinçlerde ve maden arabalarında [50];
- Herhangi bir elektrik motoru olmayan yük taşımacılığı yapan kamyon, tır gibi araçlarda veya toplu taşıma araçlarında normal araç aküsüne alternatif olarak [51], [52];
- Hibrit, elektrikli, yakıt hücreli otomobillerde, şehir içi toplu ulaşım ve ağır kara taşıtlarında [53]–[56];
- Bu tezin konusu, şehir içi raylı ulaşımında gerek araç üstünde, gerekse güç çevrim istasyonunda konumlandırılarak [2], [27], [29]–[31], [57]–[60] kullanılmaktadır.

## 2.2 Raylı Sistemler için Geliştirilen Süperkapasitör Enerji Depolama Sistemi Hakkında Genel Bilgiler

Süperkapasitörler, ana güç kaynağına paralel olarak doğrudan bağlanabileceği gibi, DA/DA çevirgeçler aracılığıyla da bağlanabilmektedir. Her ne kadar güç kapasiteleri yüksek olsa da enerji kapasiteleri bataryalar ve diğer güç kaynakları gibi yüksek olmadığından, çok kısıtlı alanda ana güç kaynağı olarak kullanılabilirler.

Süperkapasitörlerin genel kullanım amaçları ana güç kaynağına katkı sağlamak veya kısa süreli yedek güç kaynağı olmaktır, ancak çok sınırlı durumda batarya gibi sistemin tek güç kaynağı olabilmektedirler. Bataryaların aksine, süperkapasitörlerin tam dolu ve tam boş durumundaki gerilim aralığı geniş olduğundan, çoğunlukla sistemin çalışma gerilimini sağlayabilmek ve güç akışını denetleyebilmek için DA/DA çevirgeçler aracılığıyla bağlanmaktadır [2], [27], [29]–[31], [47], [48], [50], [52], [54]–[60]. Kısıtlı sayıda uygulamada sisteme tek güç kaynağı olarak direkt bağlanmaktadır, bu uygulamalar da genellikle çok kısa sürelerle yüksek akım gereksinimi duyan uygulamalardır [51].

Süperkapasitörlerin yüksek miktarda enerji depolama amacıyla kullanıldığı uygulamalarda genellikle iki türlü enerji kullanım profili vardır ve devreye DA/DA çevirgeç aracılığıyla bağlanmak zorundadır. Bu profillerden birisinde DA/DA çevirgeç kontrolü sabit akımla şarj–deşarj profiline göre yapılırken, diğerinde ise DA/DA çevirgeç kontrolü sabit güçle şarj –deşarj profiline göre yapılır. Bu iki farklı profilin şarj–deşarj süreleri sırasıyla (2-5) ve (2-6)'da verilmiştir.

$$t = \frac{(V_{max} - V_{min})C}{I} \quad (2-5)$$

$$t = \frac{(V_{max}^2 - V_{min}^2)C}{2P} \quad (2-6)$$

Belirtilen sebeplerle genel olarak bataryalar veya yakıt hücreleri gibi uzun süreli enerji kaynağı olmak yerine, süperkapasitörler, kısa süreli enerji gereksinimi olan ve anlık yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Ayrıca bataryaların raf ömürleri göz önüne alındığında daha uzun ömürlüdür. Yine şarj–deşarj çevrimleri göz önüne alındığında bataryalar türüne göre değişmekle birlikte 500 ila en fazla 8500 arası çevrim sıklığında ömürleri vardır [40]. Buna

rakip olarak süperkapasitörler 1 milyon ile 1.5 milyon çevrim sıklığına dayanabilmektedir. Süperkapasitörler şarj–deşarj ömrünü tamamladığında bile sadece kapasitans değerleri düşmekte ve eş değer seri direnç değerleri artmakta, ve kullanılmaya devam edebilmektedir [61], [62].

Bölüm 2.1.3.3'te bahsedildiği üzere süperkapasitörlerin birçok uygulamada kullanımı uzun süredir var olup, yakın gelecekte artarak daha da yaygınlaşması öngörülmektedir.

Çoğu, yüksek güç gerektiren bu uygulamalarda, süperkapasitörler sistemlere direk bağlanabildiği [63] gibi, sistemin ana DA hattında gerilim dengesizliği oluşmaması ve aktarılacak gücün kontrollü olarak sağlanabilmesi için çift yönlü DA/DA çevirgeç ile de DA bağı veya güç kaynağına bağlantısı yapılmaktadır.

Raylı ulaşım araçlarında da depolama ünitelerinin kullanım artışı depolama ünitelerinin gelişimiyle paralel bir seyir izlemektedir. Özellikle şehiriçi hafif raylı, metro ve tramvay ulaşımında kullanımı tüm dünyada yaygın halde depolama ünitelerinin kullanımı için çalışmalar yapılmaktadır [2], [27], [29], [57]–[60].

Depolama ünitelerinde, özellikle elektrik enerjisi depolama ünitelerindeki gelişmeler, tüm elektrikli araçların, özellikle de raylı araçların enerji tasarrufu üzerinde ciddi etkiler oluşturmaktadır. Süperkapasitörlerin kullanımı ile özellikle şehiriçi kullanımdaki tramvay, hafif raylı ve metro araçlarında enerji tasarrufu artmıştır. Bu gelişmelere paralel olarak bu ürünleri araçlarında kullanmak isteyen firma ve işletmecisi sayısı da artmaktadır.

Tez çalışmasına başlarken, şehiriçi raylı ulaşım sistemleri için frenleme enerjisi depolama sistemi seçerken öncelikli düşünce enerji tasarrufunu ön plana çıkarmaktı. Enerji tasarrufunu ön plana çıkarmak için yapılan akademik çalışmalar ve aktif olarak kullanılan sistemler incelendiğinde uçanteker ve bataryalı enerji depolama sistemlerinin hafif raylı araçlarda ihtiyaç olan güç kapasitesine cevap vermesinin süperkapasitörlü sistemlere göre daha zor olduğu görülmüştür. Bu sebeplerle süperkapasitörlü enerji depolama sistemi kullanımına ve tasarımına karar verilmiştir.

Süperkapasitörler daha önce de bahsedildiği üzere güç yoğunluğu yüksek, enerji yoğunluğu görece düşük enerji depolama birimleridir. Bu durum, hafif raylı ulaşım sistemlerinde hızlanma ve yavaşlama sürelerinin düşük olması, süperkapasitörlü sistemlerin güç yoğunluğunun yüksek olması sebepleriyle kullanımını öne çıkarmaktadır. Süperkapasitörlerin bu tür sistemlerde kullanımı için yüksek güç kapasiteli, çift yönlü bir DA/DA güç çevirgecine ihtiyaç olması, bu çevirgecin de mümkün olan en yüksek güç yoğunluğunda ve yüksek verimle çalıştırılması için yeni teknolojilerin kullanımı tez çalışmasında ön planda tutulmaya çalışılmıştır.

Süperkapasitörlerin raylı ulaşım araçlarında ticari olarak ilk kullanımı 2003 yılında olmuştur [27]. Yüksek güç yoğunluğu talebi raylı sistem uygulamalarında kullanımı ciddi enerji tasarrufu ve sistem verimi getirmektedir. Süperkapasitörlerin en büyük dezavantajı ise hacimsel ve kütleli enerji yoğunluklarının düşük olmasıdır.

Raylı ulaşım sistemleri de, tüm ulaşım sistemleri gibi kısa süreler için yüksek güç gereksinimi olan sistemlerdir. Frenleme esnasında açığa çıkan güç herhangi bir enerji depolama sistemi olmayan araçlarda frenleme direnci üzerinde harcanmaktadır. Frenleme esnasında açığa çıkan bu yüksek gücün verimli bir şekilde depolanabilmesi ve yol alma esnasında yüksek olan güç talebinin büyük bir kısmının karşılanabilmesi için süperkapasitörler üzerinde depolanan enerji kullanılabilir. Bu sayede hem ciddi miktarda enerji tasarrufu yapılabilmekte, hem de frenleme ve yol alma süreleri içerisinde kataner hattına verilen ve kataner hattından talep edilen akım miktarları azaltılarak aracı besleyen hattaki gerilim oynamaları azaltılabilmektedir [2], [6], [10], [12], [13], [27], [31], [56]–[60]. Bu tez çalışmasının amacı, süperkapasitör depolama birimlerini kullanarak enerji tasarrufunu en yüksek şekilde sağlayabilmek ve DA hattından çekilen akımın azaltılması ile kataner hattının regülasyonunu iyileştirebilmektir.

Çizelge 1.1 ve Çizelge 1.2’de bahsedildiği gibi süperkapasitör depolamalı frenleme enerjisi geri kazanımı sistemlerinin raylı sistemlerde uzun süredir denemeleri yapılmakta ve halihazırda birçok ticari sistemde gerek araçların

üzerinde, gerekse güç çevrim istasyonlarına kurulu şekilde kullanılmaktadır. Güç çevrim istasyonunda kullanımı hacim ve ağırlık açısından ciddi avantajlar getirirse de raylarda oluşan rezistif ve endüktif etki sistemin verimi ve enerji tasarrufu açısından dezavantajlar getirmektedir. Kurulan laboratuvar altyapısı rayların oluşturduğu empedans etkisini gerçeklemek için uygun olamamıştır. Bu sebeple bu çalışmada gerçekleştirilecek ve incelenecek sistem daha çok araç üzerinde kullanımı hedef almaktadır.

Bunlarla birlikte süperkapasitörlerin raylı araçlarda kullanım geçmişi çok uzak olmasa da yakın gelecekte kullanımının hızla yaygınlaşması öngörülmektedir. Bu kullanımlar için Çizelge 2.1'de listelenen ürünlere bakıldığında süperkapasitör teknolojisinin geliştiği, daha yüksek enerji ve güç kapasitelerinde süperkapasitör ve modül üreten firmalar ortaya çıkmaya başladığı görülmektedir.

Çizelge 2.1. Farklı Süperkapasitör Üreticilerinin Raylı Sistemlere Uygun Ürünleri

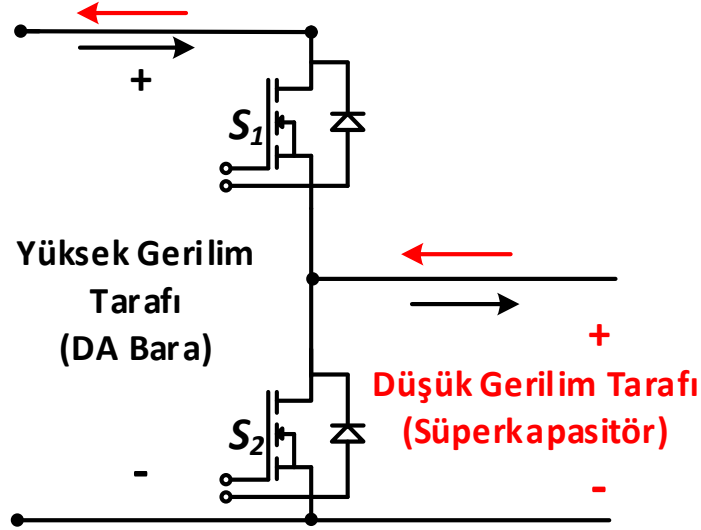
Süperkapasitör Modeli	Kapasite	Gerilim Değeri	Akım Değeri*	ESR	Kütle (kg)	Hacim (lt)	Enerji (Wh)	Wh/lt	Wh/Kg
Maxwell BMOD0063	63F	125V	240A	18mΩ	63,0	91,5	140,0	1,53	2,22
Maxwell BMOD0165	165F	48V	130A	6mΩ	14,2	14,5	53,0	3,66	3,73
Maxwell BMOD0189	189F	51V	244A	5,6mΩ	16,8	18,3	69,0	3,77	4,11
Nesscap EMHSR0062	62F	125V	250A	15mΩ	67,0	96,5	134,0	1,39	2,00
Nesscap EMHSR0166	166F	48V	150A	5,6mΩ	16,0	13,8	53,1	3,86	3,32
Skeleton SMOD170V53†	53F	170V	221A	10,2mΩ	58,5	55,2	214,0	3,88	3,66
Skeleton SMOD51V178	178F	51V	212A	2,9mΩ	15,9	12,7	64,0	5,04	4,03
Ioxus iMOD096083	83F	96V	N/A**	8,3mΩ	35,0	29,8	109,4	3,67	3,13
Ioxus iMOD048166	166F	48V	N/A**	4,1mΩ	18,0	15,6	54,7	3,51	3,04
*Akım değerleri 40°C sıcaklık artışında verilmiştir									
** Akım değeri yapılacak uygulamaya göre değişiyor, uygulamaya özel soğutma sistemi konuluyor.									
†Sıvı Soğutma seçeneği mevcut, kütle 63Kg , akım ise 572A değeri [62]									

### 2.3 Süperkapasitörün Enerji Depolama Uygulamaları İçin Çift Yönlü DA/DA Çevirgeçler

Süperkapasitörler, esas amacı enerji depolama olan tüm sistemlerde olduğu gibi tüm ulaşım araçlarında sisteme bir çevirgeç aracılığıyla bağlanmaktadır. Bu çevirgeç genellikle izolesiz olup [2], [6], [27], [29], [31], [57]–[60], çevirgeç çift yönlü güç aktarım yeteneğine sahip olmak zorundadır. Süperkapasitörler bu çevirgeçlerle sisteme bağlanırken süperkapasitörün tepe yarı değeri ( $V_{SCmax}/2$ ) sistemin DA bağ geriliminin üçte birinden az olmayacak miktarda seçilmektedir [60], [64]. Bunun sebebi yükseltici kipte çalışma esnasında görev çevriminin (duty cycle, D) pozitif gerilim kazancı vermesi için belirlenen bir değerin üzerinde kalması gereklidir ( $D < D_{max}$ ) [65]; bu yayında verilen hesaplama göre pozitif gerilim kazancı için azami görev çevrimi ( $D_{max}$ ) yaklaşık 0.72 olarak hesaplanmaktadır. Bu değer, gerçek uygulamada daha güvenli bölgede kalabilmek adına 0.7 olarak sınırlandırılmıştır. Süperkapasitörlerin izoleli çevirgeç ile bağlandığı uygulamalar genellikle güç yoğunluğunun düşük olduğu uygulamalar olup literatürde raylı ulaşım araçlarında kullanımı yaygın olmadığından rastlanmamıştır.

Bölüm 2.1 ve 2.2’de bahsedilen raylı sistemlerdeki bataryalar ve süperkapasitörler devreye çoğunlukla Şekil 2.4’te görülen çift yönlü (bi-directional) güç akışına izin veren sade yapıdaki indirici ve yükseltici DA/DA çevirgeçler ile bağlandığı gibi, daha karmaşık yapıdaki anahtarlamalı çevirgeçler ile de bağlanabilmektedir. Bu durum sistemdeki galvanik yalıtım (izolasyon) ihtiyacı, gerilim farklılıklarından kaynaklı güç kaybını azaltma amacı, hacim ve ağırlık gereksinimleriyle ve güç ve enerji ihtiyaçlarına göre değişmektedir [66], [67].

Çift yönlü DA/DA çevirgeçler gücün iki yönlü aktarılabilirdiği tüm DA/DA çevirgeçlere verilen genel bir tanımdır. Bu çevirgeçler genellikle bir tarafı yüksek gerilim, bir tarafı düşük gerilim uygulanması istenen çevirgeçler olup güç aktarımı anahtarlanan elemanlara göre değişmektedir. (Çift aktif köprü, çift taraflı rezonans çevirgeç, vb.)



Şekil 2.4. Çift Yönlü İndirici ve Yükseltici Tipte DA/DA Çevirgeç Topolojisi

Bu çevirgeçlerde iki yönlü giriş ve çıkış gerilimleri birbirilerine göre yüksek ve düşük olabildiği gibi, çok sık olmasa da iki tarafı da birbirine yakın gerilim çıkışları sağlayan, bazen galvanik yalıtım (izolasyon) sağlamak amacıyla, bazen de izolesiz olarak sadece güç aktarımı istenilen tarafa yapabilmek amacıyla kullanımlarına rastlanmaktadır.

### 2.3.1 Yüksek Gerilim Çevirgeçlerde Kullanılan Anahtarlama Elemanları

Bugüne kadar bilimsel ve ticari uygulamalarda güç çevirgeçlerinde yarı iletken teknolojisi olarak düşük gerilim uygulamalarında (< 600 V) silisyum (Si) tabanlı Güç MOSFET'leri ve IGBTler kullanılmış, yüksek gerilim (> 650~1000 V) uygulamalarında ise silisyum (Si) tabanlı IGBTler ve Tristörler tercih edilmiştir. Hali hazırda, bir çok 1000 V ve üzeri gerilim değerindeki uygulamada genellikle Si tabanlı IGBTler kullanılmakta, yine 1000 V altında gerilim değerleri için Si tabanlı IGBT'ler ve Güç MOSFET'leri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Son 10-15 yıl içerisinde, güç yarı-iletkenleri teknolojisinde ciddi gelişmeler olmuş ve Geniş Kuşak Aralıklı güç yarı-iletkenleri ilk tasarımlarına kıyasla daha yüksek gerilim ve akım seviyelerine çıkarak ticari ürünlerde dünya çapında kullanılmaya başlanmıştır [23–28]. Silisyum Karbür ve Galyum Nitrit Güç MOSFET'leri Geniş Kuşak Aralıklı kontrollü güç yarı iletkenlerinde kullanılan malzemelerin başlıcalarıdır. Bu malzemelerle üretilen Güç yarı iletkenlerinin en önemli



avantajları, Si tabanlı güç yarı iletkenlerine göre, Bölüm 1.2, Şekil 1.1'de görüleceği üzere daha yüksek dayanma gerilimleri, daha yüksek anahtarlama frekansları ve daha yüksek çalışma sıcaklıklarıdır.

Silisyum karbür (SiC) tabanlı 1200 V ve 1700 V yarım köprü güç MOSFET modüllerinin (Cree-Wolfspeed CAS300M12BM2, CAS300M17BM2), 1200 V ve 1700 V SiC tabanlı Güç MOSFET modüllerine kıyasla düşük anahtarlama kayıpları ve düşük iç direnç değerleri sayesinde aynı akım kapasitesindeki Si-IGBTlere göre daha verimli bir güç çevirgeci başarımı sağlanabilmektedir. Açılma kapanma sürelerinin düşük olmasıyla birlikte gelen düşük anahtarlama kayıpları ve bununla birlikte daha yüksek anahtarlama frekanslarında çalışabilmesi sayesinde, pasif elemanların küçültülebilmesi, anahtarlama sesinin duyulmadığı frekanslarda çalışma koşullarının oluşabilmesiyle de, SiC Güç MOSFET'leri ön plana çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasının önemli bir katkısı SiC Güç MOSFET'lerinin kullanımı ile daha yüksek frekanslarda anahtarlama yapabilen ve daha düşük kayıp oluşturarak çalışma koşullarına göre cebri soğutma ihtiyacı duymayan, hacmi ve kütlesi daha düşük bir çevirgeç geliştirmiş olmasıdır.

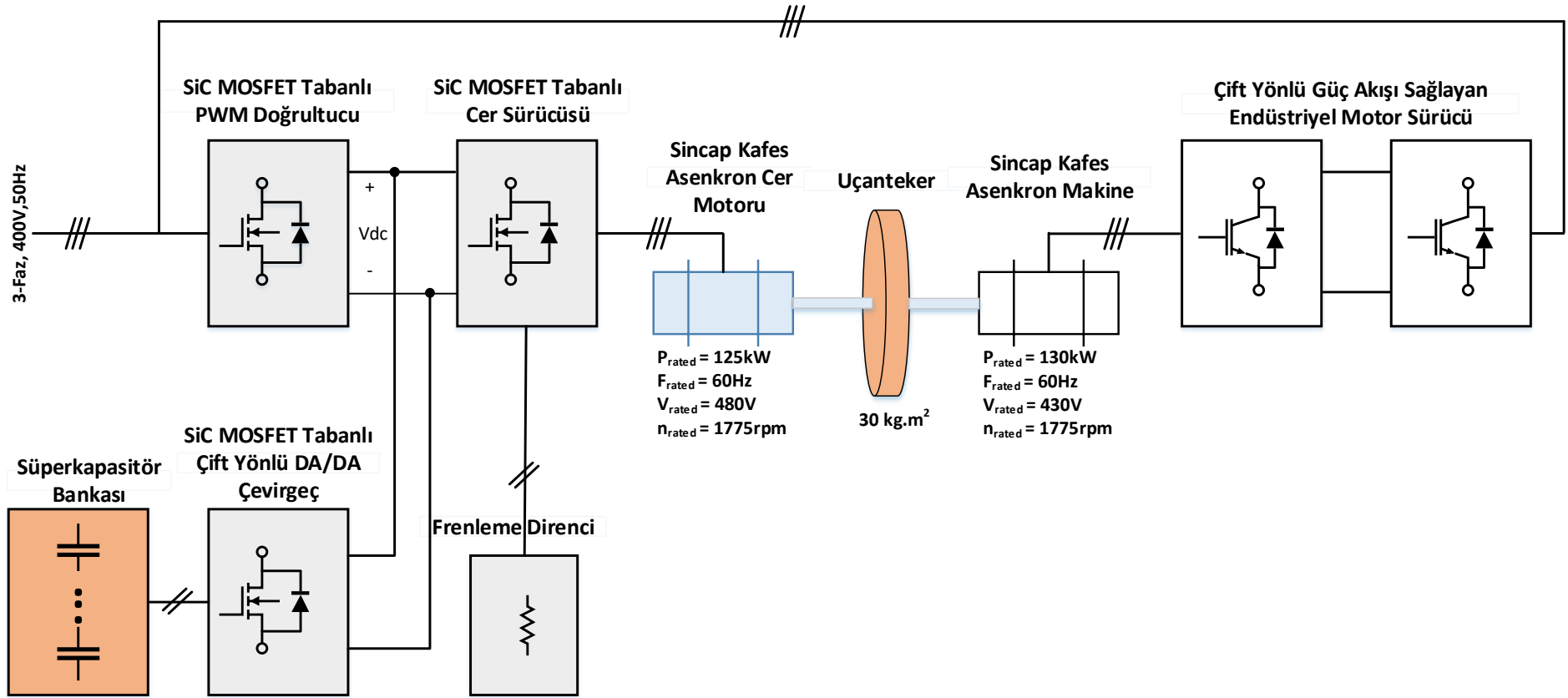
## **2.4 Sistem Tasarımı Aşamaları**

### **2.4.1 Süperkapasitör Depolamalı Sistem için Kurulan Fiziksel Simülatör**

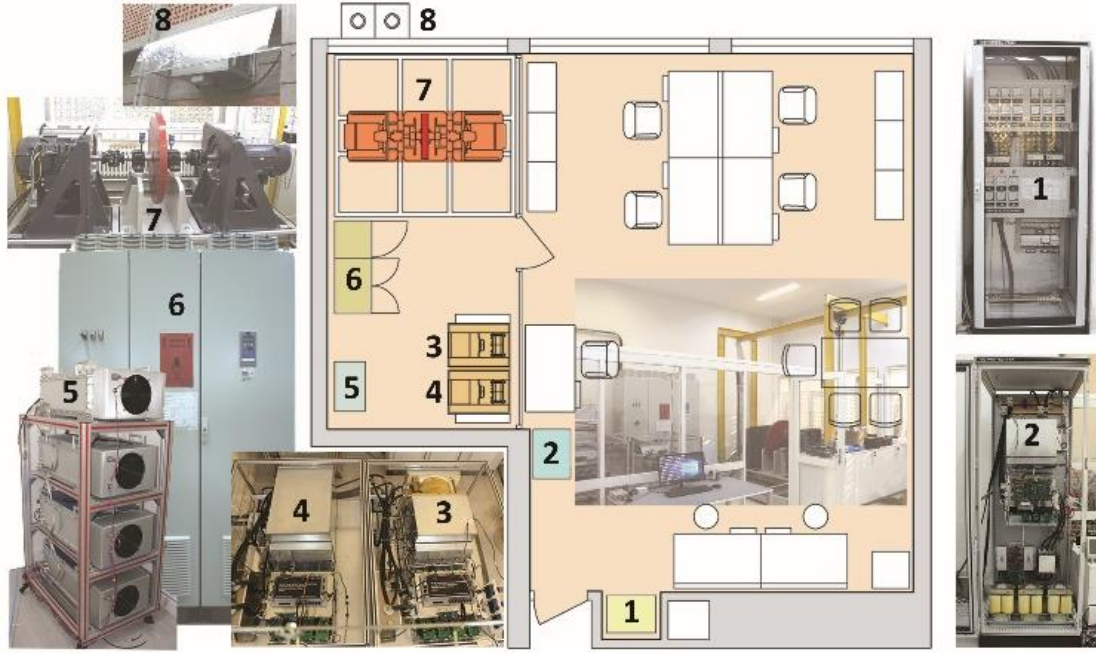
Çalışma kapsamında, raylı sistem olarak Türkiye'de ve dünyada şehiriçi raylı sistemlerde en çok kullanılan katener veya 3. ray gerilimi olan EN 50613:2004 standardındaki 750 V DC seçilmiştir. Raylı ulaşım sistemini gerçek ölçekte modellemek amacıyla ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümünde TÜBİTAK 1505 programı kapsamında, TÜBİTAK, ASELSAN, Hacettepe Üniversitesi ve ODTÜ'nün maddi destekleriyle fiziksel bir simülatör kurulmuştur. Paralel yürütülen iki projede genel olarak şehiriçi raylı ulaşım araçlarının fiziksel özellikleri üzerine çalışılmış ve bunları modellemek amaçlanmıştır.

Frenleme enerjisi geri kazanımı ve yeni nesil cer sürücülerini gerçek olarak modellemek için Şekil 2.5'te blok şeması gösterilen fiziksel simülatör kurgulanmış ve Şekil 2.6'da gösterildiği gibi laboratuvarda gerçek boyutlarıyla kurulmuştur. Bu kapsamda raylı aracı modellemek için bir motor–uçanteker–jeneratör seti mekanik hesaplamalar yapılarak ve sistemdeki enerji kapasite ihtiyaçları düşünülerek satın alınmıştır. Bu simülatör setini beslemek ve denetleyebilmek için SiC MOSFET tabanlı PWM (Pulse Width Modulated, Darbe Genişlik Kiplemeli) 750 VDC gerilim çıkışlı doğrultucu tasarlanmıştır. Yine cer motorunu sürmek ve denetlemek SiC MOSFET tabanlı cer motor sürücü evirgeç tasarlanmıştır. Jeneratör için ise motor firmasının önerdiği hazır motor sürücü ve denetleyici sistem satın alınmış ve laboratuvar bünyesinde kurulumu yapılmıştır. Bu simülatör ve tüm laboratuvar kurulumu daha önce yayımlanmış makalede detaylı olarak incelenebilir [68].

Bu sistemler satın alınmadan önce modellenebilecek raylı sistemler düşünülerek, bir raylı araç üzerinde tork uygulanan bir tekere düşen yük ve güç miktarları hesaplanmış, satın alınacak motor ve jeneratör tork, hız ve güç miktarları (2-7,8,9,10) ve Çizelge 2.2'deki örnek sistemin değerleri ile belirlenmiştir.



Şekil 2.5. TÜBİTAK, ASELSAN, ODTÜ ve Hacettepe Üniversitesinin Ortak Projeleri Kapsamında Tasarlanan ve ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü Bünyesinde Kurulan Fiziksel Simulatör Sisteminin Blok Şeması



Şekil 2.6. Raylı Çekiş ve Depolama Sistemleri Ar-Ge Labortauvarı Yerleşim Planı, 1: 400 V, 50 Hz Dağıtım Panosu, 2: DGK Doğrultucu, 3: Motor Sürücü, 4: Çift Yönlü DA/DA Çevirgeç, 5: Superkapasitör Bankası, 6: Aktif Doğrultucu ve Endüstriyel Motor Sürücüsü, 7: Motor-Uçanteker-Jeneratör Seti, 8: Frenleme Direnci [68]

$m$ , motor sayısı;  $F_{shaft}$  tek bir motor şaftının araca uyguladığı düzlemsel kuvvet;  $M_{eqv}$ , aracın düzlemsel ve dönen parçalarının kütlesi;  $v$ , aracın sürati;  $F_r$  ve  $F_{curve}$ , sırasıyla araca karşı uygulanan statik-dinamik kuvvetler, ve ray kıvrımlarından kaynaklı kuvvet olmak üzere, araç üzerine etkiyen kuvvet denklemi şöyledir:

$$mF_{shaft} = M_{eqv} \frac{dv}{dt} + [F_r + F_{curve}] \quad (2-7)$$

$T_{shaft}$  motor başına araca uygulanan tork;  $r$ , teker çapı;  $\omega$ , açısal dönüş hızı,  $T_r$  ve  $T_{curve}$ , sırasıyla yük torkları,  $n$  ise dişli çevrim oranı olmak üzere, araç üzerine uygulanan (2-7)'deki kuvvet denklemi, bir teker şaftı başına uygulanan tork denkleminde (2-8)'e şöyle evrilebilir:

$$T_{shaft} = \left( \frac{M_{eqv} r^2}{mn^2} \right) \frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{m} [T_r + T_{curve}] \quad (2-8)$$

$J_m$ , motorun ataletsel momenti;  $T_m$ , bir motorun uyguladığı tork olmak üzere, motorun uyguladığı kuvvetin şaft üzerine uygulanan tork denklemi (2-9)'da ve bu denklemin teker başına motor torku denklemi ise (2-10)'da şöyle verilmiştir:

$$J_m \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_{shaft} \quad (2-9)$$

$$\left[ J_m + \left( \frac{M_{eqv} r^2}{m n^2} \right) \right] \frac{d\omega}{dt} = T_m - \frac{1}{m} [T_r + T_{curve}] \quad (2-10)$$

M, araç kütlesi;  $J_{gb}$ , dişli kutusunun ataletsel momenti;  $J_w$ , tekerleğin ataletsel momenti olmak üzere, motora yüklenen araç kütlesi, dişli kutusu ve tekerin araca kütleli etkisine ait denklemi (2-11)'de şöyle yazılabilir:

$$M_{eqv} = M + J_{gb} \frac{1}{r^2} + J_w \frac{1}{r^2} \quad (2-11)$$

Araç kütleini temsil etmek üzere laboratuvar ortamında montajı yapılan uçantekerin ataletsel momenti  $J_{fw}$ , yine laboratuvarda kullanılan motor ve jeneratörün ataletsel momentleri sırasıyla  $J_m$  ve  $J_g$ , ve araca karşı olan kuvvetleri temsil etmek üzere kurulan jeneratörün ürettiği tork  $T_g$  olmak üzere, (2-11)'deki denklem kullanılarak (2-12) ve (2-13) elde edilmiştir:

$$J_m \frac{d\omega}{dt} = T_m - \left[ (J_{fw} + J_g) \frac{d\omega}{dt} + T_g \right] \quad (2-12)$$

$$(J_m + J_{fw} + J_g) \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_g \quad (2-13)$$

Bu sistemlerle birlikte araç üzerinde tam yükte çalışırken depolanan kinetik enerji miktarı da (2-14)'de verilmiştir:

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} (56000 \text{ kg}) (13.88 \text{ m/s})^2 \cong 5.40 \text{ MJ} \quad (2-14)$$

Çizelge 2.2. Örnek Araç ve Parkur Teknik Özellikleri [68], [69]

Parametre	Değer
Araç Yapısı	5 Araba, M+T+T+T+M
Cer Motoru Sayısı	4
Yeni Teker Çapı	600 mm
Vites Kutusu Oranı	5:1
En Yüksek Eğim	8.5 %
En Yüksek Sürat	50 km/h
35 km/h Hıza Kadar İvme Değeri	1.2 m/s <sup>2</sup> max.
50 km/h Hızdan Yavaşlama Değeri	1.3 m/s <sup>2</sup> max.
Sarsıntı Sınırı (Jerk Limit)	1.0 m/s <sup>3</sup>
Araç Kütlesi	39 ton Yüksüz (AW0) 56 ton Yüklü (AW3) 58 ton Tam Yüklü (AW4)
$J_{gb}+J_w$	182 kg-m <sup>2</sup>

## 2.4.2 Süperkapasitör Miktar ve Boyutunun Seçimi

Süperkapasitör enerji depolamalı bir sistem kurgulanırken, kullanılacak süperkapasitörleri seçmek için üzerinde depolanacak enerji, sistemin erişebileceği en yüksek hızdayken mekanik sistemde depolanacak kinetik enerjiye yaklaşık eşit olacak şekilde, uygun boyut ve miktarda seçilmesine karar verilmiştir.

Bu amaçla bir raylı aracın en yüksek hız ve en yüksek kütlede üzerinde depolayabileceği mekanik (kinetik ve potansiyel) enerji ve bu enerjinin laboratuvarında kurulan fiziksel simülatörde teker başına düşen hesapları Çizelge 2.2'deki veriler ışığında, (2-7,8,9,10,11,12,13) boyunca tanımlanmış denklemler üzerinden hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre satın alınan ve kurulan fiziksel simülatörün mekanik özellikleri Çizelge 2.3'te verilmiştir. Bu veriler ile uçanteker üzerinde depolanan enerjiye denk olacak miktarda süperkapasitörler üzerinde depolanacak enerji hesabı da (2-15)'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Laboratuvar Ortamında Kurulan Fiziksel Simülatör Sisteminin Mekanik Özellikleri

<b>Cer Motoru</b> (VEM – DKCBZ 0212-4)	<b>4 – Kutup, 60 Hz, 475 V, 125 kW, 0.81 pf (S1), <math>\eta = 93.5\%</math></b>	
	Anma Torku	671 Nm
	Anma Hızı	1779 rpm
	Tepe Torku	940 Nm
	Tepe Hızı	5100 rpm
<b>Aktif Yükleme Jeneratörü (VEM - DKOBY 0610-4)</b>	<b>4 – Kutup, 60 Hz, 430 V, 130 kW, 0.82 pf (S1), <math>\eta = 93.7\%</math></b>	
	Anma Torku	700 Nm
	Anma Hızı	1775 rpm
	Tepe Torku	1200 Nm
	Tepe Hızı	5500 rpm
<b>Atalet Momentleri</b>	Jm	0.67 kg-m <sup>2</sup>
	Jg	0.84 kg-m <sup>2</sup>
	Jfw	30 kg-m <sup>2</sup>
	İkili Esnek Kaplinler + Rulmanlar + Bükülmez Şaftlar	0.15 kg-m <sup>2</sup>
<b>Seçilen Yol için Motor Başına Aracın İstekleri</b>	Ortalama Tork	500 Nm
	Ortalama Hız	1500 rpm
	Ortalama Güç	80 kW
	Tepe Torku	943 Nm
	Tepe Hızı	2250 rpm
	Tepe Gücü	128 kW

$$\frac{1}{2}(J_m + J_{fw} + J_g)\omega^2 = \frac{1}{2}(31.51 \text{ kg} - \text{m}^2)(314.151 \text{ rad/s})^2 \cong 1.48 \text{ MJ} \quad (2-15)$$

Süperkapasitörlerde depolanan ve süperkapasitörlerden çekilen güç miktarını belirli bir seviyenin üzerinde tutabilmek, bunu yaparken de gereğinden fazla akım çekmemek, ek olarak süperkapasitör üreticilerinin de uygulama notlarında üzere süperkapasitörün ömrünü en yüksek seviyede kullanabilmek için süperkapasitör üzerindeki gerilim tepe geriliminin yarısından daha düşük olmalıdır [70]. Bunun yanısıra seçtiğimiz katener hattı gerilimi olan 750 V<sub>DC</sub> değerinin 1/3'ü olan 250 V<sub>DC</sub> değeri yükseltici çevirgeç modunda sistemin kararlılığının korunması ve gerilim kazancının 1'den büyük olması için en alt değerdir. Bu sebeple Bölüm 2.1.3'te bahsedildiği üzere süperkapasitörlerin tepe geriliminin yarısı en az 250 V<sub>DC</sub> olması gerekliliği doğmaktadır.

Yukarıda anlatılan sebeplerden, süperkapasitörün tepe gerilimi 500 V<sub>DC</sub> olarak belirlenmiştir. Süperkapasitörün depolayacağı etkin enerji miktarıyla ilgili bilgi Bölüm 2.1.3.2'de verilmiştir. Ulaşım sistemlerinin standartlarına ve araç üstü kullanıma uygun süperkapasitör modelleri değerlendirildiğinde proje başladığında ticari olarak satılan, Şekil 2.7'de görülen Maxwell markasının 125 V, 63 F'lık süperkapasitör bankalarından 4 adet seri bağlanarak kullanılması gerektiğine karar verilmiştir. Bu kullanımla kapasitans değeri 15.75 F olmuş, süperkapasitörün depolayabileceği etkin enerji (2-16)'da hesaplanmış; (2-15) ile enerji değerleri yakın çıkmıştır.

$$\frac{1}{2}(C_{SC}) \left[ V^2 - \left( \frac{V}{2} \right)^2 \right] = \frac{1}{2}(15.75 \text{ F})(500^2 - 250^2) \cong 1.48 \text{ MJ} \quad (2-16)$$

Bölüm 2.1.3.2'de verilen ve (2-16)'da hesaplanan enerji değeri araç tam hıza ulaştığında depolanabilecek enerji miktarı olup, araç tam hıza ulaşmadığında depolanacak enerji miktarı düşeceği için süperkapasitör gerilimi 250 V ~ 500 V aralığı yerine daha dar bir aralıkta çalışması daha uygun olacağına karar verilmiştir. Burada iki seçenek vardır: i. 500 V tam şarj gerilimi ile 250 V'tan daha yüksek bir gerilim aralığı kullanılabilir; ii. en düşük gerilim değeri olarak 250 V kullanılıp süperkapasitör tam gerilim olarak daha düşük bir gerilime şarj edilebilir. Seçeneklerden ilkinin, 500 V tepe gerilimi her şarj döngüsünde son gerilim olacak şekilde, tüm gerilim seviyelerinde diğer senaryoya göre daha az akım çekmesi

ve daha çok güç kapasitesine sahip olma durumu tercih sebebi olmuştur ve bu seçeneğin kullanımına karar verilmiştir.



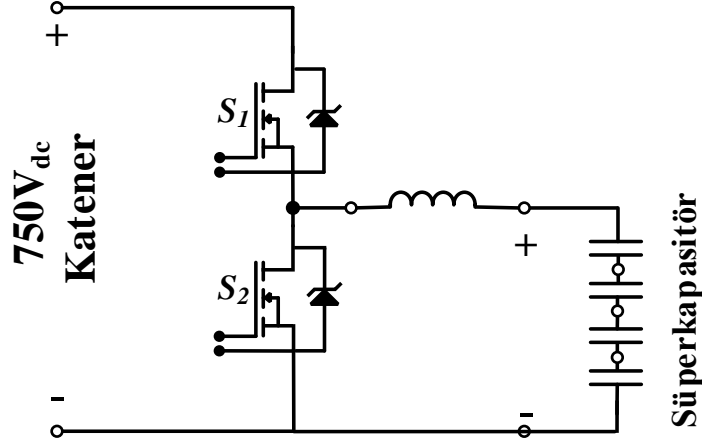
Şekil 2.7. Maxwell BMOD0063P125 B08 Süperkapasitör Ürünü 63 F 125 V [61]

### 2.4.3 Çift Yönlü DA/DA Çevirgeç Tasarımı ve Çalışma Modları

Süperkapasitörleri güç akış denetimiyle bir sisteme bağlamak için çift yönlü DA/DA çeviricilerden kullanılması zorunludur. Bölüm 0'te bahsedildiği üzere, çift yönlü DA/DA çevirgeçler izoleli veya izolesiz şekilde sistemlere bağlantı imkânı sunabilir. Bu güç seviyelerinde ve yetkili personel dışı erişimin kısıtlı olması sebebiyle süperkapasitör depolama sistemi için izolasyon gereksinimi duyulmamaktadır. Ayrıca izole bir sistemde bulunacak transformatörün ağırlığı ve hacmi, ve transformatörde oluşacak enerji kayıplarından dolayı izoleli çevirgeçler çok tercih edilmemektedir.

Bu tez çalışmasında güç kaybını asgari düzeyde tutmak için ve mümkün olduğunca güvenli olduğundan, hali hazırda birçok üründe ve sistemde kullanılmakta olan izolesiz çift yönlü indirici-yükseltici çevirgeç kullanımı üzerinde karar verilmiş, bu çevirgeç Şekil 2.8'de gösterildiği gibi bağlanmıştır.





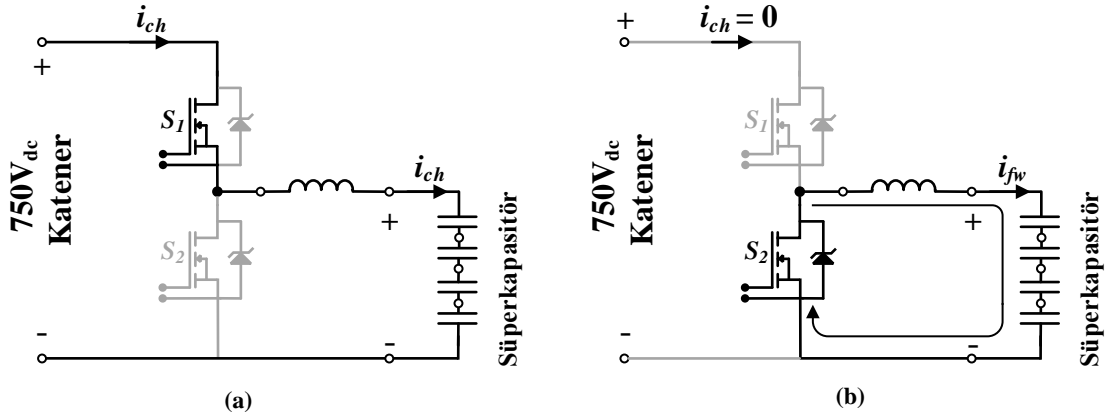
Şekil 2.8. Çift Yönlü DA/DA Çevirgecin Süperkapasitöre ve Katener Hattına Bağlantısı

Bu kullanımda, çift yönlü güç akışı için süperkapasitöre doğru güç akışı olduğunda çevirgeç indirici kipte, katenera doğru güç akışı olduğunda çevirgeç yükseltici kipte çalışmaktadır. Süperkapasitör enerji depolamalı sistemlerde bu güç seviyelerinde bu temel çevirgeç yapısını kullanmak işletme ve bakım kolaylığı sağlamakta ve sistemin güvenilirliği artmaktadır. Bu çevirgeç tarzının eksisi ise kontrollü bir güç akışı için katener tarafının geriliminin süperkapasitör tarafına göre sürekli yüksek olma zorunluluğudur; ancak katener hattı veya 3. raydan beslenen, besleme gerilimi EN 50163:2004 standardına göre sürekli belirli değer aralığında (500 V – 1000 V) kalan raylı sistem araçlarında bunu sağlamak zor değildir.

Bu çalışmada çevirgeç tasarımında bir adet yarım köprü anahtarlama çifti kullanımı yeterlidir, lakin sürekli akım sınırını genişletmek ve ısı kayıpları azaltmak amacıyla iki adet yarım köprü anahtarlama elemanının paralel anahtarlansak kullanımı da değerlendirilmiş, ancak bu güç seviyeleri için bu modülün tek başına kullanımı yeterli gelmiştir.

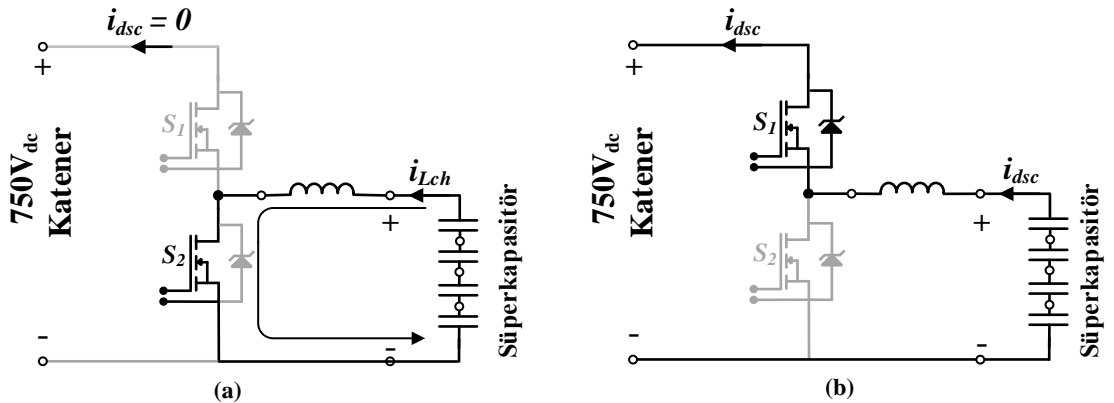
Çift yönlü DA/DA çevirgeçler gücün akış yönüne göre farklı elemanları çevirgecin kipine göre anahtarlayarak veya farklı elemanları farklı sıralarla anahtarlayarak çalışmaktadır.

Şekil 2.9'da gösterildiği gibi çevirgeç indirici modda çalıştığında S1 MOSFET'i iletme geçerek giriş ve çıkış farkı ile indüktör üzerindeki akım artırılıp, S1 MOSFET'i kapalı konuma getirilerek indüktör üzerindeki akımın S2 MOSFET'i ile birlikte D2 ters toparlanma diyotu üzerinden akması sağlanmaktadır. Böylece akımın toparlanma evresindeki kayıplar azaltılmaktadır.



Şekil 2.9. Çift Yönlü Çevirgeç İndirici Modda Çalışırken Aktif Elemanlar, a) Bobin ve Süperkapasitör Şarj Oluyor, b) Bobin Serbest Döngüyle Süperkapasitörü Dolduruyor

Yine Şekil 2.10'da gösterildiği üzere süperkapasitörden katenera güç aktarımı yapılacağı zaman S2 MOSFET'i iletme geçirilip indüktör nötr noktasına bağlanarak süperkapasitörden gelen akım indüktör üzerinde depolanmakta, S2 MOSFET'i kapalı konuma getirildiğinde S1 MOSFET'i ile birlikte D1 ters toparlanma diyotu üzerinden akım akması sağlanıp katener tarafına güç aktarımı sağlanmaktadır. Burada da diyot iletimdeyken MOSFET devreye alınarak kaybın azaltılması sağlanmaktadır.



Şekil 2.10. Çift Yönlü Çevirgeç Yükseltici Modda Çalışırken Aktif Anahtarlar, a) Süperkapasitör Bobini Dolduruyor, b) Bobin ve Süperkapasitör Katenera Enerji Veriyor

#### 2.4.4 Anahtarlama Elemanı ve Soğutucu Fin Seçimi

Tezin yenilikçi yönlerinden birisi, genel olarak yarım köprü yapılarında sık tercih edilen Si tabanlı IGBT'lerin yerine SiC tabanlı Güç MOSFET'lerinin tercih edilmiş olmasıdır. SiC tabanlı MOSFET'lerin seçimi yapılırken uygulanacak standartlar ve kriterler, ve hali hazırda bir çok sistemde kullanılan Si tabanlı IGBT'lerle kayıp ve verim karşılaştırmaları bu bölümde detaylı şekilde anlatılmıştır.

Raylı ulaşımda kullanılan Demiryolu uygulamaları - Cer sistemlerinin besleme gerilimleri standardı olan EN 50163:2004'e göre 750 V<sub>DC</sub> katener gerilimine sahip sistemlerde hat geriliminin sürekli rejimde 500 V<sub>DC</sub> – 900 V<sub>DC</sub> aralığında bulunması, sürekli olmayan rejimde ise tepe gerilim olarak 5 dakika süreyle 900 V<sub>DC</sub> – 1000 V<sub>DC</sub>, 20 ms süreyle 1270 V değerlerini aşmaması gerekmektedir [71]. Ancak aktif olarak kullanılan sistemlerde sürekli rejimde 1000 V<sub>DC</sub> değerlerinin sık sık aşıldığı ve 1270 V değeri göz önünde bulundurularak, sistem tasarımı yaparken seçilecek anahtarlama elemanının gerilim dayanımı standart bir değer olan 1700 V olarak seçilmesi bir zorunluluk olmuştur.

Proje başlangıcında SiC Güç MOSFET modülü üreten firmalar sadece Wolfspeed (Cree), Powerex (Mitsubishi) ve Rohm firmaları idi; SiC Güç MOSFET yarım köprü modül anahtarlama elemanı içerisinde gerilim dayanımı 1700 V olan tek ticari kaynak ise Wolfspeed firması idi. Bu sebeple, 1700 V yarım köprü olarak Şekil 2.11'de fotoğrafı görülen Wolfspeed CAS300M17BM2 modülü 1700 V dayanım gerilimi, T<sub>c</sub>=25°C sıcaklıkta 325 A ve T<sub>c</sub>=90°C sıcaklıkta 225 A tepe akımı değerlerini sağlayarak isteğimizi karşılamış ve kullanımına karar verilmiştir. Bu modül, proje kapsamında tasarımı yapılan tüm çevirgeçlerle birlikte Süperkapasitör Depolamalı Enerji Depolama sisteminin çift yönlü çevirgeç tasarımında da anahtarlama elemanı olarak seçilmiştir.

Anahtarlama elemanı seçiminde SiC tabanlı MOSFET seçmemizdeki en önemli etken olan anahtarlama kayıplarında verilen rakamların ve buna bağlı eklem sıcaklık değişiminin IGBT'lere göre çok düşük olmasıydı. Bu rakamlarla birlikte yapılan hesaplamalar sonucunda ortaya çıkacak kayıpları görebilmek adına, 1700 V gerilime dayanabilen ve üzerinden geçirebileceği akım miktarları

düşünülerek seçilmiştir. Burada, Infineon (FF300R17KE4P\_B11) [72] ve Mitsubishi (CM300DY-34T) [73] firmalarının 300 A'lik ( $T_C=90^\circ\text{C}$ ) Si tabanlı IGBT modülü ve Fuji (2MSI400VE-170-53) [74] firmasının 400 A'lik ( $T_C=90^\circ\text{C}$ ) Hibrit-IGBT modülü ile tasarımımda kullandığımız Wolfspeed (CAS300M17BM2) [75] firmasının 225A'lik ( $T_C=90^\circ\text{C}$ ) SiC Güç MOSFET modülü için kayıp hesapları yapılmış ve karşılaştırma sonuçları Çizelge 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.11. Wolfspeed/Cree CAS300M17BM2 SiC MOSFET Yarım Köprü Modülü [75]

Çizelge 2.4 Farklı Markaların Yarım Köprü Modülleri için 400V-250A(DA) Çıkış Veren Durumda Güç Kayıplarının El ile Hesabı

<b>Marka</b> <b>(300 A &gt; @ <math>T_C=25^\circ\text{C}</math>)</b> <b>Modül</b>	<b>Infineon</b> <b>FF300R17</b> <b>KE4P_B11</b> <b>(Si IGBT)</b> <b>(<math>f_{sw}=5</math> kHz)</b>	<b>Mitsubishi</b> <b>CM300</b> <b>DY-34T (Si</b> <b>IGBT)</b> <b>(<math>f_{sw}=5</math> kHz)</b>	<b>Fuji</b> <b>2MSI400VE-</b> <b>170-53 (Hibrit-</b> <b>IGBT)</b> <b>(<math>f_{sw}=5</math> kHz)</b>	<b>Wolfspeed</b> <b>CAS300M17</b> <b>BM2 (SiC</b> <b>MOSFET)</b> <b>(<math>f_{sw}=10</math> kHz)</b>
<b><math>P_{sw}</math>, Anahtar (W)</b>	810	525	550	180
<b><math>P_{sw}</math>, Diyot (W)</b>	266	175	50	10
<b><math>P_C</math>, Anahtar(W)</b>	231	231	256	453
<b><math>P_C</math>, Diyot(W)</b>	200	257	240	213
<b>Toplam Kayıp, Anahtar (W)</b>	1041	756	806	633
<b>Toplam Kayıp, Diyot (W)</b>	466	432	291	223
<b>Toplam Kayıp, Modül (W)</b>	1507	1188	1097	856

Çizelge 2.4'te görüldüğü gibi  $T_C=90^\circ\text{C}$  sıcaklığında 225 A kapasiteli SiC Güç MOSFET'i ile  $T_C=90^\circ\text{C}$  sıcaklığında 300A veya daha fazla akım kapasitesine

sahip Si-IGBT ve Hibrit-IGBT'ler arasında iletim kayıplarına bakıldığında çok ciddi kayıp farkları olmadığı görülmektedir. Ancak 10 kHz anahtarlama frekansında SiC tabanlı MOSFET ile diğer 3 firmanın Si tabanlı IGBT'lerinin 5 kHz frekansında anahtarlama karşılaştırıldığında anahtarlama kayıpları açısından ciddi fark oluşacağı görülmektedir. Bu sebeple yüksek anahtarlama frekansında toplam kayıplarda ciddi farklar oluşması, bunun yanında eklem ve paket sıcaklıklarının sınır değerleri aşmasının kaçınılmaz olacağı bir gerçektir.

Fin seçimi de kayıplar ile doğrudan ilintili olup, kayıplara göre fin seçimi yapmak gerekmektedir. Fin seçiminde finin malzemesi, soğutucu kanatçıkların sayısı ve soğutucu plakaların yüzey alanları önem arz etmektedir.

Çizelge 2.4'te verilen sonuçlara göre ve kurulan PWM doğrultucu ve cer sürücüsü sisteminden farklı olmadan, ortak bir fin yapısı seçilmiştir. Burada seçim yaparken ısı iletkenliği iyi olan bir soğutucu, bu soğutucu plakanın üzerinde 4 adet (PWM doğrultucu için 3-faz; Cer sürücüsü için 3-faz + 1 frenleme direnci kısıcısı; Süperkapasitör enerji depolamada kullanılan çift yönlü DA/DA çevirgeç için ise 4 set 4 seri, 4 paralel yapıda süperkapasitör bankasını sürebilecek) yarım köprü modül yerleştirilecek şekilde ve bu modülleri belirli bir kılıf sıcaklığının altında tutacak fin seçmek temel hedef olmuştur. Burada süperkapasitör kullanım çevriminin çok sık olmadığı hesaba katılmamış, laboratuvar ortamında süperkapasitör sürekli doldur boşalt yapılacak şekilde kullanılacakmış gibi seçilmiştir. Bunun yanında daha düşük çevrim sıklıklarında (12s-36s-12s) doğal soğutmaya uygun, farklı kombinasyonlarda da testler ve doğrulamalar yapılabileceği düşünülerek sistem tasarımı yapılmıştır. Ayrıca yine PWM doğrultucu ve cer sürücüsü de kendi kapasitesinden daha üst kapasitelerde kullanılma ihtimali düşünülerek tasarlanmış, soğutucu seçimi de buna göre yapılmıştır.

Laboratuvar ortamında herhangi bir sorunla karşılaşmamak adına, bu alanda uzman firmalardan Fischer Elektronik markasının SK461-400 [76] ürünü satın alınmıştır. Bu ürün üzerinde SiC Güç MOSFETlerinin yerleşimi Şekil 2.12'de görüldüğü gibi yapılmış, sonraki bölümlerde anlatılacağı üzere bu yapı lamine bara tasarımının da mekanik olarak ön çalışması olmuştur. Bu ürünün

seçilmesinin temel nedeni daha üst seviyelerde doğrulama ve test altyapısının hazır olarak bulunmasının ileriki çalışmalarda fayda sağlayacak olmasıdır.



Şekil 2.12. Fischer Elektronik SK461-400 Soğutucu Plaka ve SiC Güç MOSFET'leri yerleşimi

#### 2.4.5 DA/DA Çevirgeç Reaktörü Hesaplamaları, Tasarımı ve Seçimi

DA/DA çevirgeci tasarlarken en önemli elemanlardan biri de reaktördür. Reaktör, anahtarlama güç çevirgeçlerinde anahtarlama esnasında anahtarlama elemanı üzerinden geçecek akımın artışını sınırlandırmaktadır. Çıkışında kapasitör olan devrelerde akımın kesintiye uğramadan verilebilmesi için reaktör kullanımı zorunludur.

Reaktörün temel görevi üzerinden akan akımla manyetik alan oluşturarak üzerinde enerji depolayıp, anahtarlama elemanı kapalı konuma geçirildiğinde serbest döngü diyoduyla akımın devamlılığını sağlayarak üzerinde depoladığı enerjiyi yüke aktarmaktır.

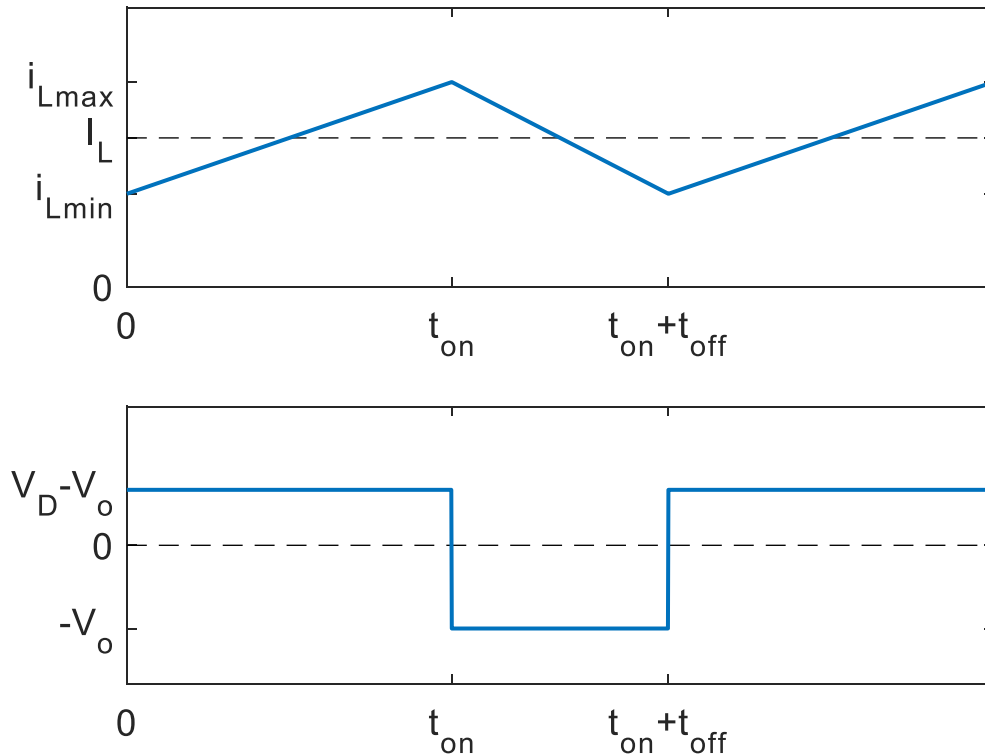
Reaktörün indüktans değeri hesaplanırken anahtarlama güç kaynağı tasarımı yaparken kullanılan temel denklemler kullanılmıştır. Akımın dalgalanmasındaki

iki tepe arası akım değeri (2-17)'de görüldüğü gibi en önemli kriteri göstermektedir, temel diğer değer ise yine görüldüğü gibi anahtarlama frekansıdır. Çift yönlü bu çevirgecin tasarımında reaktör üzerinden akan akım yüksek DA değerlerinde kesintisiz olmalıdır, bu değerlerde kesintisiz akım için gerekli ölçüt ise akımın 0 A değerine inmemesidir [77].

Şekil 2.13'teki grafikte görüldüğü üzere  $I_L$  ortalama indüktör akımı,  $i_{Lmax}$  indüktörün gördüğü tepe akım,  $t_{on}$  anahtarın iletimde kaldığı süre,  $V_{in}$  giriş gerilimi ve  $V_o$  çıkış gerilimi olmak üzere,

$$I_L > \frac{1}{2} i_{Lmax}, \quad \Delta I_L = \frac{t_{on}}{2L} (V_{in} - V_o) = \frac{DT_s}{2L} (V_{in} - V_o) \quad (2-17)$$

(3-11)'de görülen eşitsizlik ölçütü sağlandığı sürece, akım sürekliliği sağlanmakta ve yine (3-11)'de görüldüğü üzere eşitliğe göre akım dalgalanmasının iki tepe arasındaki değer arttıkça indüktans değeri azalırken, yine anahtarlama frekansı arttıkça da indüktans değeri azalmaktadır.

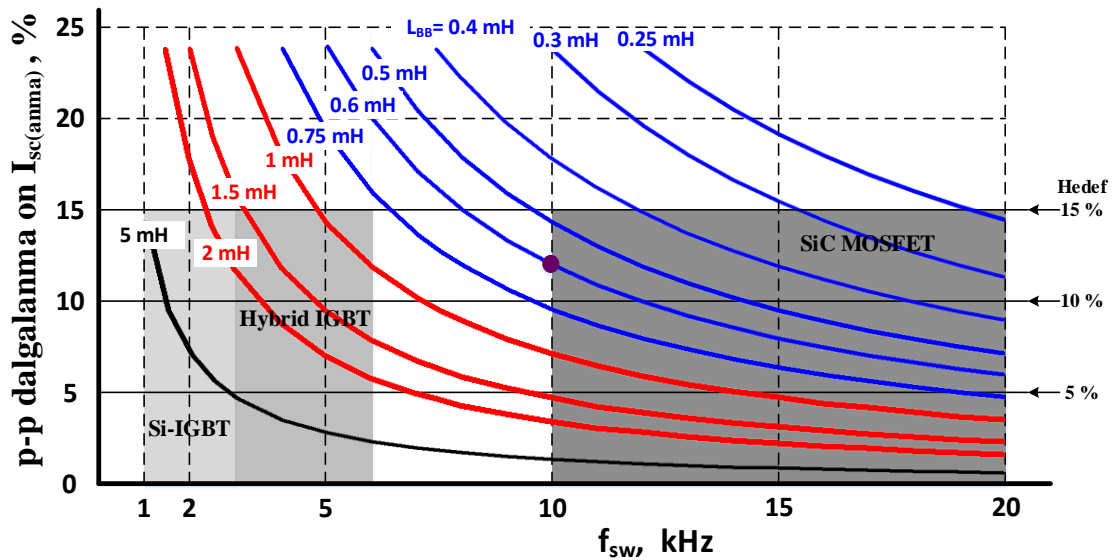


Şekil 2.13. Reaktör Şarj-Deşarj Grafiği

SiC Güç MOSFET'leri tercih ederken en önemli ölçütlerden biri de indüktans değerini, buna bağlı olarak da devredeki pasif elemanları küçültmektir. Bu amaçla

(2-17)'de verilen denklem için tam yükteki değerler için yapılan 1kHz'den 20 kHz'e kadar tüm anahtarlama frekanslarında oluşan tepeden tepeye akım dalgalanmaları hesaplatılmış ve Şekil 2.14'te çizilmiştir. Burada tam yük altında ( $I_{sc} = 250 \text{ A}$ ) %15 tepe-tepe dalgalanma değerinin altında kalınması hedeflenmiştir. 0.5 mH'den büyük tüm indüktörler 10 kHz anahtarlama frekansını sağlamakla birlikte daha sonra daha düşük frekanslarda deneme yapılması, sürekli olarak tam yük çalışmama durumu da düşünülerek 0.6 mH'lik indüktör değeri uygun bir değer olarak seçilmiştir. Ayrıca hesaplanan bu değer, benzetim sonuçlarıyla doğrulanmıştır.

Bir indüktör tasarlamak için manyetik malzeme seçimi hacim ve ağırlık açısından önemli bir rol oynamakla birlikte manyetik malzemenin maliyeti de önemli bir kriter olmaktadır. Araştırılan malzemelerden ferrit nüve düşük manyetik akı yoğunluğu doyumu değerine sahip olduğundan çok büyük alana ihtiyaç duymaktaydı. Yine amorf metal ve nanokristal malzeme bu boyutlarda bir indüktör tasarımı için çok pahalı kalmaktaydı [78]. Bu sebeplerle silisli sac nüve tercih edilmiş ve genellikle silisli sac üretimi yapan ve nispeten maliyet-başarımı yüksek olan Hans von Mangoldt firmasından teklif alınarak gerekli reaktörün tüm tasarım bilgileri elektromekanik tasarımı yaptırılmış ve Şekil 2.15'te fotoğrafı gösterilen Silisli Çelik Sac (Si-Steel) nüveli reaktör özel olarak ürettirilmiştir.



Şekil 2.14. İndüktans Değerine Göre Anahtarlama Frekansının Süperkapasitör Üzerinde Oluşturduğu Tepeden Tepeye Dalgalanma Yüzdesi





Şekil 2.15. İndirici ve Yükseltici Çevirgeç Devresinde Tasarlanan, Satınalınan ve Kullanılan Demir Nüveli Reaktör

#### 2.4.6 Giriş Kapasitörü ve Reaktörü Seçimi

Tüm çeviricilerde olduğu üzere süperkapasitör çevirgecinin de katener hattına bağlı tarafında anlık yüksek akımları sağlayabilecek ve gerilim seviyesini belirli bir seviyede tutabilecek bir kapasitör kullanılması gerekmektedir. Bu kapasitör, çevirgeç indirici görev yaparken çevirgecin girişindeki anlık yüksek akımları sağlayıp gerilimi belirli bir seviyede tutarken, süperkapasitörden katenera güç aktarmak için çevirgeç yükseltici modda çalışırken, çevirgecin çıkış kapasitörü görevini üstlenmektedir. Bu amaçla yükseltici modda bu kapasitör değerinin önemi daha fazladır ve (2-18)'deki eşitsizliği sağlamak zorundadır.

$$C_o > \frac{D_{max} I_{o,max}}{V_{o,ripple} f_{sw}} \quad (2-18)$$

Verilen bu eşitsizlikte gerekli değerler yerine konduğu zaman ( $D_{max} = 0.667$ ,  $I_{o,max} = 166.67 A$ ,  $V_{o,ripple} = 5 V$ ,  $f_{sw} = 10 kHz$ )  $> 3.7mF$  değeri hesaplanmaktadır. Bu değer üzerinde değeri olan Şekil 2.16'da görülen Electronicon

E56.A26-475200 1100 VDC 4700  $\mu$ F değerinde kapasitör seğilmiş ve sistemde kullanılmak üzere satın alınmıştır.



şekil 2.16. Hesaplamalar ile Seçilen ve Satınalınan Giriş Kapasitörü

Tasarlanan sistemin EMI gürültülerini asgari düzeyde tutabilmek ve yüksek akım isteklerini karşılayabilmek adına kullanılan bara yapısının üzerine küçük boyutlu ancak akım değerleri çok yüksek koşulları sağlayabilen, düşük eşdeğer dirence sahip EMI kapasitörleri kullanılmıştır. 200  $\mu$ F (EPCOS B32778J0207K000) değerindeki bu kapasitörler bara yapısının üzerine direkt olarak şekil 2.17'de gösterildiği gibi 6 adet paralel bağlanmış; sistem gerekli anlık akım isteklerini karşılayabilir hale getirilerek, yüksek frekanstaki yüksek akımların kablolar yerine düşük endüktanslı lamine bara aracılığıyla bu kapasitörlerden çekilmesi sağlanmıştır. Bu kapasitörlerle birlikte katener tarafındaki toplam DA bara kapasitansı 5.9 mF olmuştur.

Giriş kapasitörünün, giriş reaktörüyle birlikte başka bir görevi normal bir katener hattının gerilimini sağlayan doğrultucu istasyonlardan çıkan 6 faz, 12-darbeli doğrultucuda oluşan gerilim dalgalanmalarını birbirlerine seri bağlanarak süzmektir. 50 Hz, 6 faz, 12-darbeli doğrultucudaki gerilim dalgalanma frekansı 600 Hz olduğu için bu frekanstaki dalgalanmayı çok iyi bastıracak bir LC filtre tasarlanması gerekmektedir; bu tür darbeli doğrultucularda genel kural olarak kesim frekansı dalgalanma frekansının 1/10'u olarak seçilmektedir. Bu sebeple LC süzgecin endüktans değeri süzgecin kesim frekansı değerini sağlaması için (2-19)'daki eşitsizliğe uygun olarak seçilmelidir.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} < \frac{600}{10} \text{ Hz} \quad (2-19)$$



Şekil 2.17. Lamine Bara Üzerine Montajlanmış Yüksek Frekans Akım/EMI Filtre Kapasitörleri

Bu eşitsizlikte seçilen kapasitans değeri yerine konulursa,  $L > 1.19mH$  eşitsizliği ortaya çıkar. Bu reaktör değerini sağlayan ve daha sonra gerçek metro veya hafif raylı hattında çalışma koşullarında (frenleme, hızlanma) anlık gerilim yükselmeleri ve düşüşlerinden kaynaklı kapasitör tarafından çekilecek tepe akımın sınırlanabilmesi için daha yüksek değere sahip Şekil 2.18’de gösterilen  $4mH$ ’lik hava nüveli reaktör seçilip REO firmasından satın alınmıştır.



Şekil 2.18. Hesaplamalar ile Seçilen ve Satınalınan Giriş Reaktörü

#### 2.4.7 Algılayıcı Elemanlarının Seçimi

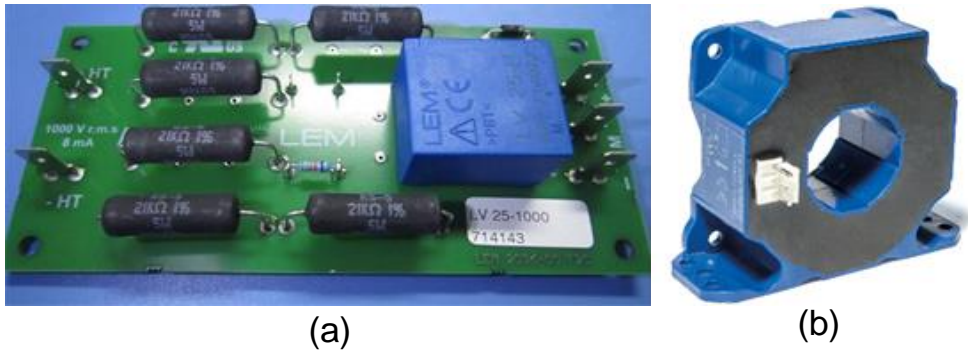
Algılayıcılar tüm anahtarlama güç çevirgeçlerinde çok önemli rol oynamaktadır. Tasarlanan sistemin gerilim ve akım geri beslemeleri ile denetim döngülerinin ve çalışma sınırlarını belirlemek için algılayıcılar aracılığıyla sürekli olarak ölçüm alınması gerekmektedir.

Algılayıcılar seçilirken kullanılacak değerler tepe değerlerin üzerinde olmalı ancak çok uzak değerlerde olmamalıdır. Akım algılayıcı eğer sistemde ölçülecek akımın tepe değerinden düşük değerlerde seçilirse algılayıcı doyuma ulaşır ve algılayıcının tepe değeri ne ise onu ölçer ve yanlış bilgilendirme yapar; yine akım algılayıcının tepe ölçüm değeri sistemde algılanacak değerden çok yüksek seçilirse bu durumda da akım algılama çözünürlüğü düşer bu da iyi bir tasarım olmaz. Gerilim algılayıcı seçilirken kesinlikle sistemde ölçülecek tepe gerilim değerinden daha yüksek bir algılayıcı seçilmelidir, aksi takdirde algılayıcı tepe geriliminden daha yüksek bir gerilim sisteme uygulanırsa gerilim algılayıcı hasar görür ve işlevsiz hale gelir. Çift yönlü DA/DA çevirgeç tasarlanma aşamasında akım ve gerilim değerlerinin sınırları belli olduğundan bu değerlere uygun algılayıcılar seçilmiştir.

Sistem tasarlanırken gerilim değerleri standarda göre belirlenmiş ve bu standarda göre sistemde en yüksek ölçülebilecek gerilim değeri 1270 V<sub>DC</sub> değerinin üzerinde ölçüm alabilen bir gerilim algılayıcı seçilmiştir. Gerilim algılayıcı üreten

firma sayısı az olduğundan ve güvenilir olarak görüldüğü için Şekil 2.19 (a)'da gösterilen LEM LV 25-1000 [79] ürünü seçilmiştir. Bu ürün  $\pm 1500$  V değerini ölçebilmekte, ölçümü gerilimi belirli bir katsayı ile akıma çevirerek akım trafosu ile yapmaktadır, akım trafosu Closed Loop Hall effect prensibine göre çalışıp ikincil taraftan beslenerek akım üretmektedir.

Yine tasarım yapılırken akım sınırlarını süperkapasitörler belirlemekte, buna göre seçilen süperkapasitörün veri föyünde sürekli akım değeri  $\Delta T = 40^\circ C$  sıcaklık artışında 240 A olarak belirtilmiştir. Maxwell firmasının uygulama mühendisiyle yapılan yazışma sonrası sistemde çevrim aralığı geniş olduğundan, süperkapasitörün 250 A ile şarj veya deşarj edilmesinin ısınma açısından ve ömür açısından problem oluşturmayacağı benzetim ile belirtilmiştir(ekte koyulabilir). Sistemin sürekli modda 250 A ölçüm alacağı, ve denetim döngüsü esnasında reaktör akım dalgalanmasının %20'den fazla olabileceği hesaba katılarak Şekil 2.19 (b)'de gösterilen LEM firmasının LF 510-S [80] modeli seçilmiştir. Bu model 500 A sürekli, 800 A anlık akım ölçebilmektedir.



Şekil 2.19. Gerilim ve Akım Algılayıcılar (a) Gerilim Algılayıcı LEM LV25-1000 [79] (b) Akım Algılayıcı LEM LF-510S [80]

Bunların yanında sistem sıcaklığının sürekli olarak denetlenmesi önem teşkil etmektedir; eğer aşırı ısınmalar gözlenirse sistemin otomatik olarak kapatılması gerekmektedir. Bundan dolayı, sistemi tasarlarken SiC MOSFET'in soğutucu fine bastığı noktalar ve bu gibi özellikle sıcak noktaların yakınlıklarına termistörler yerleştirilmiş, bu termistörler aracılığıyla sistemin sürekli olarak sıcaklık değerleri de canlı olarak gözlemlenmektedir.

## 2.5 Çift Yönlü İndirici ve Yükseltici Tipte DA/DA Çevirgecin Denetim Sistemi Algoritma Çalışmaları

Süperkapasitörlü enerji depolama sistemlerinde kullanılan basit yapıdaki çift yönlü indirici/yükseltici çevirgecin açık döngü denetim ile belirli akım ve gerilim aralığında tutmak mümkün olmamaktadır. Genel olarak DA/DA çevirgeçlerin çıkışlarındaki düşük değerli bir kapasitöre paralel bir direnç veya reaktör ile seri direnç olduğundan giriş gerilimi ve direnç değerinin değişmediği durumlarda anahtarlama görev çevrimini açık döngü ile denetleyerek sonuç alınabilmektedir. Fakat bu sistemde, indirici kipte çıkışın süperkapasitör gibi gerilimi sürekli değişken bir yük olduğu durumda açık döngü denetim yaparak çıkış gerilimini kompanze etmek mümkün olmamaktadır; yine aynı şekilde yükseltici kipte süperkapasitör sisteme kaynak olarak bağlı olduğunda giriş gerilimi sürekli değiştiğinden açık döngü denetim yaparak çıkış gerilimi kompanzasyonu yapılamamaktadır. Bu sebeplerle kapalı döngü denetim algoritmaları kullanmak sistem tasarım çalışmalarında mecburiyet doğurmuştur.

Güç çevirgeçlerinin denetim döngülerinde benzetim çalışmaları çok büyük rol oynamaktadır. Genel olarak tüm anahtarlama güç kaynağı tasarımlarında akımın denetlenmesi sistemin kararlı olması açısından önemlidir, ancak birden çok kaynağın birbirine bağlı olduğu sistemlerde sadece akımın denetlenmesi yeterli olmamaktadır. Akımla birlikte gerilimin de denetlenmesi bir zorunluluktur.

Süperkapasitörün hem yük, hem de kaynak olabildiği çift yönlü DA/DA çevirgeçlerde, sistemin giriş ve çıkış gerilimlerinin dengesinin korunabilmesi için gerilim geri beslemesine bağlı, denetimli şekilde reaktör akım isteğinin oluşturulması hem gerilimin denetlendiği, hem de akımın denetlendiği çift katmanlı PI denetleyiciler ile mümkün olmaktadır.

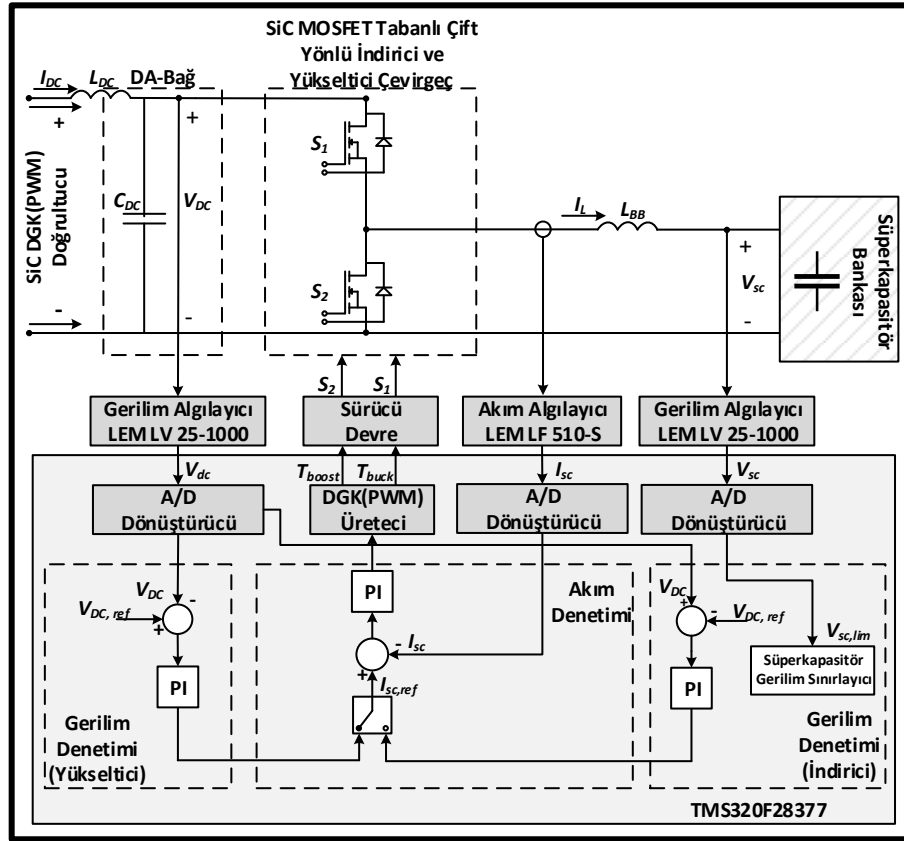
Çift yönlü DA/DA çevirgeç indirici kipte çalışırken süperkapasitör çevirgecin yükü olarak davranmakta, bununla birlikte süperkapasitörün gerilimi yükselmektedir, bundan dolayı süperkapasitör şarj olurken çıkışın gerilimini direkt kontrol etmek pek mümkün olmamakta, bunun yerine gerilimin ikincil kontrol olduğu, akımın ise

esas kontrol edilen parametre olduğu, benzer sistemlerde sıklıkla kullanılan Şekil 2.20'de gösterildiği gibi çift katmanlı PI kontrolcü kullanılmaktadır.

Yine aynı çevirgeç yükseltici modda çalışırken süperkapasitör bu sefer kaynak gibi davranmakta, süperkapasitör deşarj olurken gerilimi sürekli olarak düşmektedir. Süperkapasitörün geriliminin düşmesi kaynak tarafında sürekli bir değişim olduğu olgusunu doğurmaktadır. Bununla birlikte yük konumunda bu sefer motor sürücü olmakta, motor sürücünün giriş gerilimini belirli bir seviyede tutularak enerji aktarımı sağlanmaktadır. Bu kapalı denetim döngüsünde de Şekil 2.20'de görüldüğü gibi yine çift katmanlı PI kontrolcü kullanılarak süperkapasitörden çıkan akım miktarı ayarlanarak motor sürücüsünün giriş gerilimi belirlenen seviyede tutulmaya çalışılmaktadır.

Frenleme esnasında açığa çıkan enerjiyi süperkapasitöre aktarmak için kullanılan algoritma şöyledir:

- Frenleme esnasında cer sürücüsü enerjiyi DA hattına geri basar ve bu enerji DA-bağ kapasitöründeki gerilimi yükseltir,
- Bu gerilim değerinin enerji depolama sistemi olmayan geleneksel sistemlerde belirli bir sınıra kadar yükselmesine izin verilir (EN 50163-2004 standardına göre bu değer 900 V<sub>DC</sub>'dir.) sonrasında daha fazla yükselmemesi için frenleme kısıcısı devreye girer (Bkz. Şekil 2.5)
- Frenleme enerjisini geri kazanabilen sistemlerde, frenleme kısıcısı devreye girmeden, DA hat gerilimi 850 V<sub>DC</sub> değerlerine yakın değerlerde indirici çevirgeç çalışmaya başlar ve enerji depolama sistemi yeterli boyuttaysa, idealde enerjinin tamamını üzerinde depolayabilir.



Şekil 2.20. Süperkapasitör Depolamalı Çift Yönlü İndirici ve Yükseltici Tipte DA/DA Çevirgecin Güç ve Denetim Devreleri

- Frenleme enerjisi depolama sistemi yeterli boyutta ve gerilimde değilse gerilim yükselerek enerjinin bir kısmı frenleme kıyıcısı üzerinde harcanır.
- DA hat geriliminin değeri indirici çevirgeç ve frenleme kıyıcısı için ileri besleme (feedforward) olarak alınır ve sistemler (Enerji Depolama ve Frenleme Kıyıcısı) DA hat geriliminin belirtilen değerlerin üzerine çıkmasına izin vermez.
- DA hat geriliminden üretilen hata sinyali PI denetleyici ile reaktör akımının denetimi için geri besleme referansı olarak kullanılır, burada akım referansı olarak kullanılan değer 250 A değerini geçmeyecek şekilde ayarlanmıştır.
- Akım referansı ve reaktör akımı geri beslemesinden çıkan hata sinyali de yine bir PI denetleyici ile reaktör akımını ayarlayacak şekilde anahtarlama sinyali üretimi için DGK (PWM) üreticine beslenir. DGK üreticinin referans sınırları 0 ile 1 arasında ayarlanmıştır.



Hızlanma esnasında depolanmış enerjiyi kullanmak için de Bölüm 2.2, (2-6)'da belirtilen sabit akımla deşarj yöntemi kullanılarak sürekli olarak süperkapasitörden tepe akımıyla en yüksek gücü çekmek amaçlanmıştır. Burada da yükseltici çevirgecin denetleyici algoritması şöyle çalışmaktadır:

- Cer sürücüsü motora enerji vermek istediğinde DA hattın gerilimini belirli bir gerilimin altına düşürür. Buradaki düşüş güç çevrim istasyonunun araca olan mesafesiyle alakalı olup katener veya 3. ray'daki empedansla doğru orantılıdır.
- Sonrasında DA hattın gerilimi yükseltici çevirgecin gerilim denetleyicisine geri besleme olarak verilir ve DA hat nominal gerilim değeri olan 750 V<sub>DC</sub>'nin altına düştüğünde hata sinyali üretilmeye başlar. Bu hata sinyali gerilim denetiminin PI denetleyicisinde akım referansı oluşturmak için kullanılır. Süperkapasitörden çıkacak akımın referans üst sınırı 250 A'ı geçmeyecek şekilde ayarlanmıştır.
- Akım denetiminde yine reaktör akımı geri beslemesi kullanılmaktadır. Gerilim denetiminden oluşturulan akım referansı ile hata sinyali oluşturularak, akım için PI denetleyicisi anahtarlama sinyali referansı üretir.
- Üretilen anahtarlama sinyali referansı alt üst sınırları 0 ile 0.7 arasında ayarlanmıştır [65]. 0.7'den daha üstteki bir anahtarlama referansı yükseltici çevirgeçlerin dengesini (stabilizasyon) bozduğundan 0.7'den daha büyük anahtarlama çevrimine izin verilmemiştir.

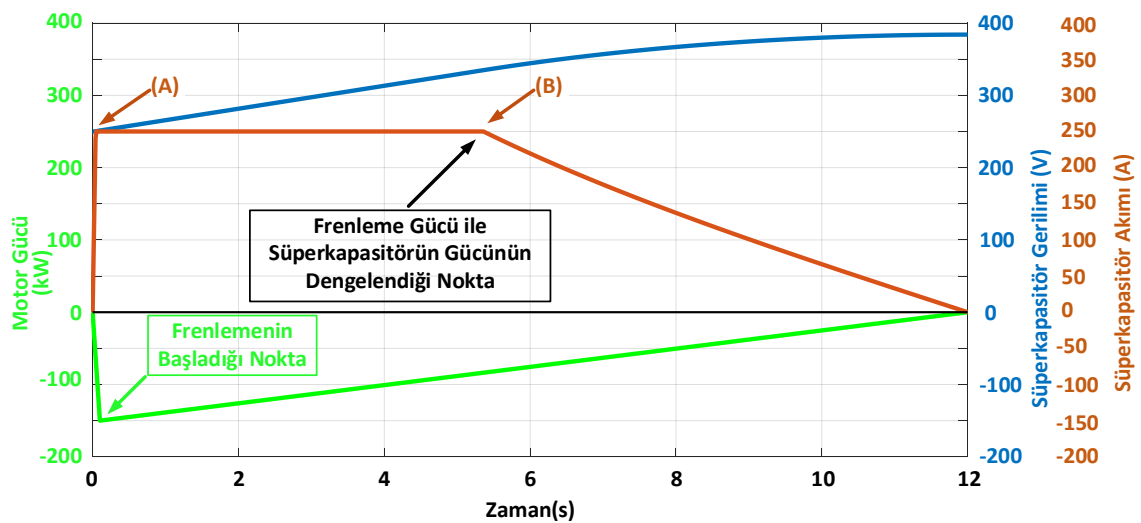
Yukarıda bahsedilen durumlar dışında süperkapasitörün şarj veya deşarj olma durumu sadece frenleme veya hızlanma durumunda olmayabilir. Bu denetim döngüsünü kullanmaktaki birincil ama enerji tasarrufudur. Rejenerasyon sadece frenleme esnasında değil, sabit hız yokuş aşağı sürüş esnasında da olabilir; yine güç tüketimi sadece hızlanma değil, sabit hız eğimsiz yol veya yokuş yukarı sürüşte de olabilir. Bu sebeplerden ötürü sistemin çalışmasını sağlayan geri beslemeler sadece elektriksel olarak alınmıştır.

## 2.6 Frenleme Enerjisi Geri Kazanımı Maksimizasyonu Çalışmaları

Enerji geri kazanımının mevcut olduğu tüm raylı araçlarda esas unsurlardan bir tanesi frenleme esnasında cer motoru tarafından üretilen enerjinin tamamına yakını geri kazanmaktır. Bu bölümde enerji tasarrufunu arttırmanın amaçlandığı hesaplamalar anlatılacaktır. Matematiksel denklemler kullanarak bu hesaplamalarla birlikte frenleme esnasında bir algoritma sayesinde bir tork-hız profili uygulandığında frenleme enerjisinin geri kazanımının maksimuma nasıl çıkarılabileceği anlatılacaktır.

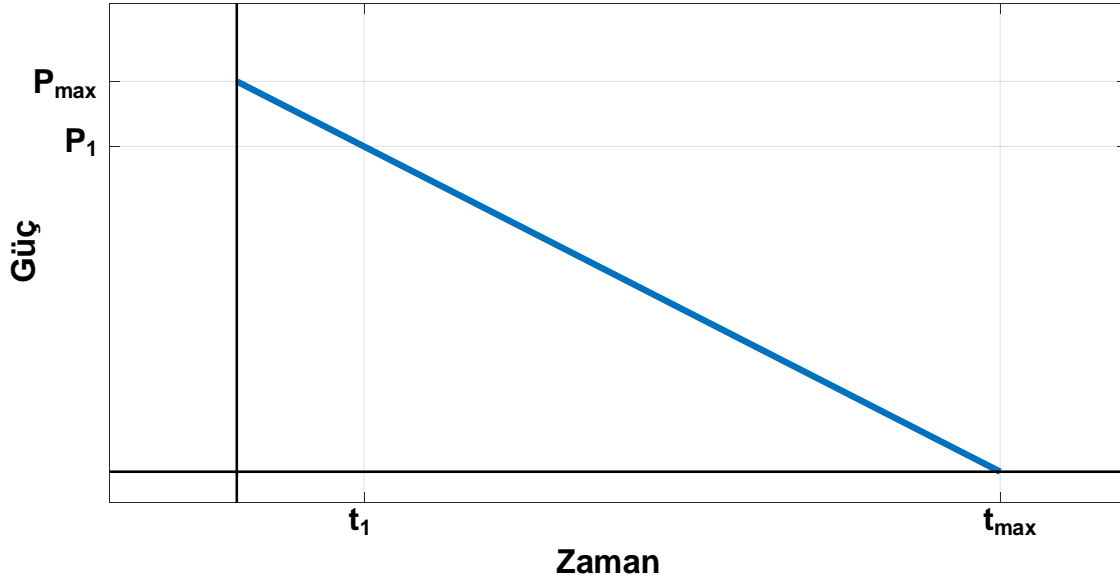
### 2.6.1 Frenleme Başlangıcında Süperkapasitör Geriliminin Optimizasyonu

Süperkapasitörün ömrü açısından sürekli rejimde akım değeri Bölüm 2.4.7'de bahsedildiği üzere 250 A ile sınırlıdır. Bu da şarj esnasında süperkapasitörün alabileceği güç miktarını o andaki gerilim ile birlikte sınırlamaktadır. Cer motor sürücüsünün rejeneratif frenlemeye başladığında ürettiği enerjinin bu sınırdan dolayı, sınırlı bir kısmının süperkapasitör tarafından depolanabildiğini görülmektedir. Şekil 2.21'den anlaşılacağı gibi frenleme başladıktan belirli bir süre sonra ise rejeneratif frenleme gücüyle, süperkapasitörün depolayabileceği güç dengelenmekte ve bu andan itibaren üretilen enerjinin tamamı süperkapasitöre aktarılabilmektedir.



Şekil 2.21. Frenleme Esnasında Süperkapasitör Üzerinde Oluşan Akım ve Gerilim Profili; (A)'dan Gücün Dengelendiği Nokta (B)'ye Kadar Tepe Akım 250 A Sınır ile Süperkapasitör Şarj Ediliyor, (B)'den Sonra Gelen Gücün Tamamı Akım Sınırının Altında Süperkapasitörü Şarj

Bu bağlamda süperkapasitörün tamamının doldurulacağı, rejeneratif enerjinin depolanabilmesinin maksimize edileceği bir başlangıç gerilimi değerinin bulunması gerekmektedir. Şekil 2.22'de gösterilen frenleme esnasında motor tarafından üretilen güç grafiği üzerinde tanımlanan değişkenler üzerinden denklemler anlatılmıştır.



Şekil 2.22. Frenleme Süresince Motor Tarafından Üretilen Gücün Grafiği

$$P_{SC} = V_{SC}I_{SC} = P_M - P_R \quad (2-20)$$

$P_{SC}$  süperkapasitörün alabileceği güç miktarı,  $V_{SC}$  süperkapasitörün gerilimi,  $I_{SC}$  süperkapasitörün akımı,  $P_M$  motorun ürettiği güç,  $P_R$  frenleme direncinde harcanan güç olmak üzere,

$$E_{SC}(\max) = \frac{1}{2} C(V_{SC}^2(\max) - V_i^2) \quad (2-21)$$

$$V_{SCt=t_1} = V_1 = V_i + \frac{I_{SC\max}}{C} t_1 \quad (2-22)$$

$$V_1 \cdot I_{SC\max} = \frac{P_{\max}}{t_{\max}} (t_{\max} - t_1) \quad (2-23)$$

$E_{SC}(\max)$  süperkapasitörün frenleme başlangıcındaki ilk geriliminden, frenleme bitimindeki son gerilimine kadar depolayabileceği enerji miktarı,  $V_{SC_{t=t_1}}$  ve  $V_1$ ,  $t = t_1$  anında süperkapasitörün gerilimini,  $V_i$  süperkapasitörün frenleme başlamadan önceki gerilimini,  $I_{SC_{\max}}$  süperkapasitöre verilebilecek tepe akım değerini,  $C$  süperkapasitörün sığa değerini,  $P_{\max}$  frenleme gücünün tepe noktası,  $t_{\max}$  frenleme süresini,  $t_1$  ise motor gücü ile süperkapasitör gücünün eşitlendiği zaman noktası tanımlamak üzere,

$$t = t_1 \xrightarrow{\text{iken}} P_R = 0 \xrightarrow{\text{iken}} P_{SC} = P_M \quad (2-24)$$

$$E_{SC_{t_1 \rightarrow t_{\max}}} = \frac{1}{2} C (V_{SC}^2(\max) - V_1^2) \quad (2-25)$$

Süperkapasitör tarafından  $t_1$ 'den sonra kalan sürede depolanacak enerji

$$E_{SC_{t_1 \rightarrow t_{\max}}} = \frac{1}{2} P_{\max} \frac{(t_{\max} - t_1)^2}{t_{\max}} \quad (2-26)$$

Motor tarafından  $t_1$ 'den sonra kalan sürede üretilecek enerji olmak üzere, (2-25) ve (2-26)'nın birbirine eşit sonuçlar vereceği durumun hesaplanması (2-27)'yi oluşturmuştur.

$$\begin{aligned} P_{\max} \frac{(t_{\max} - t_1)^2}{t_{\max}} &= C (V_{SC}^2(\max) - V_1^2) \\ &= C \left( V_{SC}^2(\max) - \left( \frac{P_{\max}}{I_{SC_{\max}} t_{\max}} (t_{\max} - t_1) \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (2-27)$$

(2-27)'deki eşitlikte tasarlanan sistem için aşağıdaki sabit değerler yerine konursa, (2-28) elde edilecektir;

- $P_{\max} = 125000 \text{ W}$
- $C = 15.75 \text{ F}$
- $V_{SC}(\max) = 500 \text{ V}$
- $I_{SC}(\max) = 250 \text{ A}$

$$125000 \frac{(t_{\max} - t_1)^2}{t_{\max}} = 15.75 \left( 500^2 - \left( \frac{500}{t_{\max}} (t_{\max} - t_1) \right)^2 \right) \quad (2-28)$$

$$15.75 \frac{500^2}{t_{\max}^2} (t_{\max} - t_1)^2 + 125000 \frac{(t_{\max} - t_1)^2}{t_{\max}} - (15.75)500^2 = 0 \quad (2-29)$$

Eşitlik (2-29) sembolik olarak çözüldüğünde  $t_1$ 'in  $t_{\max}$ 'a göre denklemi (2-30)'da verilmiştir.

$$t_1 = \frac{t_{\max}(2t_{\max} + 63 \pm 3\sqrt{7}\sqrt{2t_{\max} + 63})}{2t_{\max} + 63} \quad (2-30)$$

Sonuç olarak ortaya farklı motor gücü seviyelerinde, farklı sürelerde duruş gerçekleştiği durumlar için en iyi alt sınır gerilim değerini bulabileceğimiz bir eşitlik ortaya çıkmıştır.

Bu denklemlerle bulunan sonuçlarla frenleme esnasında açığa çıkan enerjinin süperkapasitör üzerinde depolanabilecek miktarı en tepeye çıkarılmıştır. Standart içinde tanımlanan DA-bağ gerilimi üst sınırı olan 900 V değeri daha az görüldüğü için frenleme direnci üzerinde harcanan veya hatta geri basılan enerji en aza indirilmiştir, ve bu enerji süperkapasitöre aktarılmıştır.

Bu sonuçlara göre 125 kW'lık bir motor 10 s içerisinde frenleme yaptığı durumda açığa çıkan enerjii en verimli şekilde depolamak için süperkapasitörün gerilimi frenleme başlangıcında 416 V değerinde olması gerekmektedir. Yine başka bir örnek durum olarak 150 kW'lık bir motorla 12 s sürede frenleme başladığında 384 V başlangıç değerine sahip olmalıdır. Bu değerlerle birlikte benzetimler koşturulmuş, bunların sonuçları ve karşılaştırmalı değerlendirmeleri Bölüm 3.2.4'te verilmiştir.

## 2.6.2 Optimum Frenleme Torku ile Enerji Geri Kazanımı Maksimizasyonu

Bu bölümde, süperkapasitörün başlangıç gerilimine göre motorun üretmesi gereken gücün belirlenip sonrasında frenleme direnci kullanımını asgari düzeye

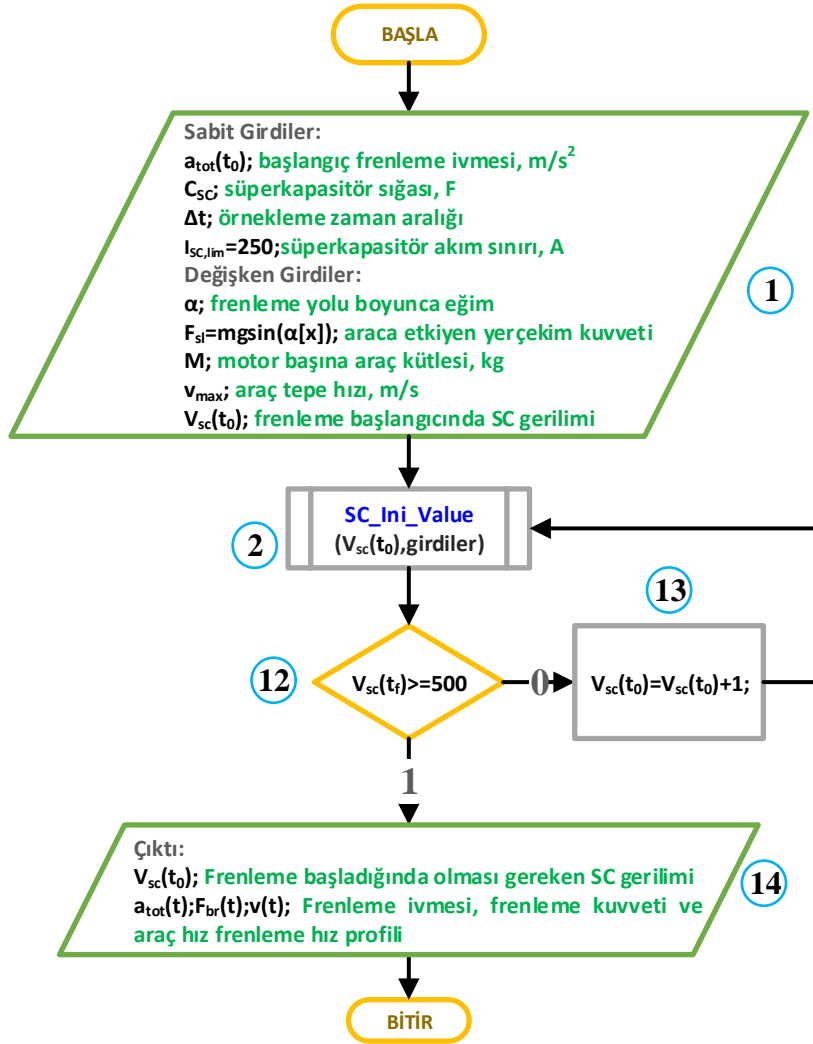
indirecek şekilde motora tork uygulamayı amaçlayan bir algoritma üzerinde çalışma anlatılmıştır.

Bölüm 2.6.1'de anlatılan başlangıç gerilimi algoritmasında motor üretebileceği azami tork ile frenleme yapmakta, süperkapasitör ise alabileceği gücün tamamını üzerine almakta geri kalan tüm güç ise mecburen frenleme direncinde harcanmaktadır. Bu bölümde anlatılan algoritma ile ise motorun frenleme torku süperkapasitörün alabileceği güce göre ayarlanabilecek hale getirilmekte, frenleme süresi bir miktar artmakta ancak frenleme esnasında açığa çıkan neredeyse hiç frenleme direncinde harcanmamaktadır.

Normal koşullarda frenleme süperkapasitör olsun olmasın izin verilen tam negatif ivme değeri ile yapılmaktadır. Çoğunlukla yolcu konforu için raylı araçlarda verilen negatif ivme değeri Çizelge 2.2'de verildiği gibi  $1.3 \text{ m/s}^2$  değerleri civarında olmaktadır. Bu değer sabit olarak baştan itibaren yapılacağı bir frenleme Şekil 2.22'deki güç eğrisini oluşturmaktadır. Bu güç eğrisi ise süperkapasitörün güç sınırından dolayı  $t_1$  anına kadarki yüksek gücün depolanamamasına neden olmaktadır. Bu sorunu aşabilmek adına frenleme başladığındaki ivmeyi süperkapasitörün alabileceği güç miktarına eşitlemek gerektiği görülmüştür.

Frenleme esnasında süperkapasitörün alacağı güç miktarını motorun uygulayacağı aracın frenleme ivmesi ile oluşturulacak olan tork eğrisi için bir profil belirlenebilirse süperkapasitör rejeneratif gücün tamamına yakınına üzerinde depolayabilecektir. İçeriğinde araca etkiyen kuvvetleri ve buna bağlı oluşacak rejeneratif motor gücünü süperkapasitörün gerilim değişimiyle denkledebilecek iteratif ve analitik algoritma kurulmuştur. Bu algoritma her durakta aracın değişen ağırlığı ve frenleme yolu boyunca eğim değişimi hesaba katılarak çalıştırıldığında neredeyse tüm koşullarda enerji geri kazanımı azami düzeye çıkarılabilecektir. Aracın hangi durakta olduğu bilgisi ile eğim bilgisi algoritmaya girilebilecek, normalde aracın mekanik fren sisteminde uygulanacak kuvveti hesaplayabilmek için bulunan ağırlık sensörleri aracılığıyla da aracın harekete başlamadan önceki ağırlık bilgisi algoritmaya girdi olarak verilebilecektir.

Şekil 2.23'te gösterildiği üzere süperkapasitörün frenleme başladığındaki ilk değeri 250 V değerinden başlatılmış ve artırılarak optimum gerilim noktasının bulunması için bir hesaplama fonksiyonu içerisine sokulmuştur. Bu fonksiyon içerisinde sürtünme kuvvetleri, buna bağlı olarak motor başına uygulanması gereken negatif kuvvet çıkartılır ve buna bağlı olarak bir tork ve ivme profili hesaplatılmış olur.



Şekil 2.23. Süperkapasitör Başlangıç Değeri, Tork, Hız Ve Negatif İvme Profillerinin Oluşturulduğu Ana Algoritma

Şekil 2.23'te verilen ana algoritma adımları şöyledir:

- Adım ①'de gerekli sabit girdiler frenleme başlangıcındaki ivme,  $a_{tot}(t_0)$ , süperkapasitör sığa değeri,  $C_{sc}$ , örnekleme zaman aralığı,  $\Delta t$ , süperkapasitör akım sınırı,  $I_{sc,lim}$ , ve gerekli değişken girdiler frenleme boyunca eğim değeri,  $\alpha$  ve araca etkiyecek yerçekim kuvveti,  $F_{sl}$ , aracın kütlesi,  $M$ , aracın tepe hızı,  $v_{max}$ , süperkapasitörün frenleme başladığında üzerindeki gerilim,  $V_{sc}(t_0)$  algoritmaya

verilir. Sabit girdiler sistem tasarımına göre, değişken girdiler ise yola, yolcu sayısına göre deęiőecek girdilerdir.

- Adım ②'de Şekil 2.24'da gösterilen iteratif fonksiyona girilir ve gerekli hesaplamalar orada devam eder.

- Adım ⑫'de, iteratif fonksiyonun çıktısında sperkapasitőrün son değeri 500 V'a gelmediyse, sperkapasitőrün frenleme başlangıç gerilimi ⑬'nc adımda 1 V arttırılır ve yeniden ②'nci adımdaki fonksiyona girilir.

- Adım ⑫'de, fonksiyon çıktısı sperkapasitőrün son değerini 500 V veya daha yüksek bulduysa, adım ⑭'e geçilerek sperkapasitőr başlangıç gerilimi, frenleme ivme ve kuvvet profilleri, ve hız profili sistemde kullanılmak üzere algoritma bitirilir.

Araca etkiyen motorların yarattığı kuvvetler dışında 4 farklı kuvvet vardır. Bu kuvvetler sırasıyla teker ile rayın arasında kalan sürtünme kuvvetleri,  $F_{fr}$  (2-31), aracın hava ile yaptığı sürtünmeden kaynaklı maruz kaldığı kuvvet,  $F_{air}$  (2-32), ve eğime bağlı araca etkiyen yer çekimi kuvveti,  $F_{sl}$  (2-33) olarak tanımlanabilir

$$F_{fr} = A + Bv \quad (2-31)$$

$$F_{air} = Cv^2 \quad (2-32)$$

$$F_{sl} = 9.81 * M * \sin(\arctan(\alpha)) \quad (2-33)$$

A ve B, statik ve dinamik sürtünme katsayıları olmak üzere bir çok çalışmada bu değerleri farklı tanımlamıőlardır. A katsayısı tekerin ray ile yaptığı sürtünme katsayısı olup iki deęiőkenden etkilenmektedir, bunlar aracın toplam kütlesi ve teker başına düşen kütle miktarıdır. B katsayısı ise deneysel olarak ölçülmeye çalışılan bir değer olup bu değer de aracın kütlesi ile doğru orantılı bir değerdir. M aracın ton cinsinden kütlesi olup, m ise yine ton cinsinden teker başına düşen kütledir [81].

$$A = \lambda M \sqrt{\frac{10}{m}} \quad \text{ve} \quad B = 0.36 M \quad (2-34)$$

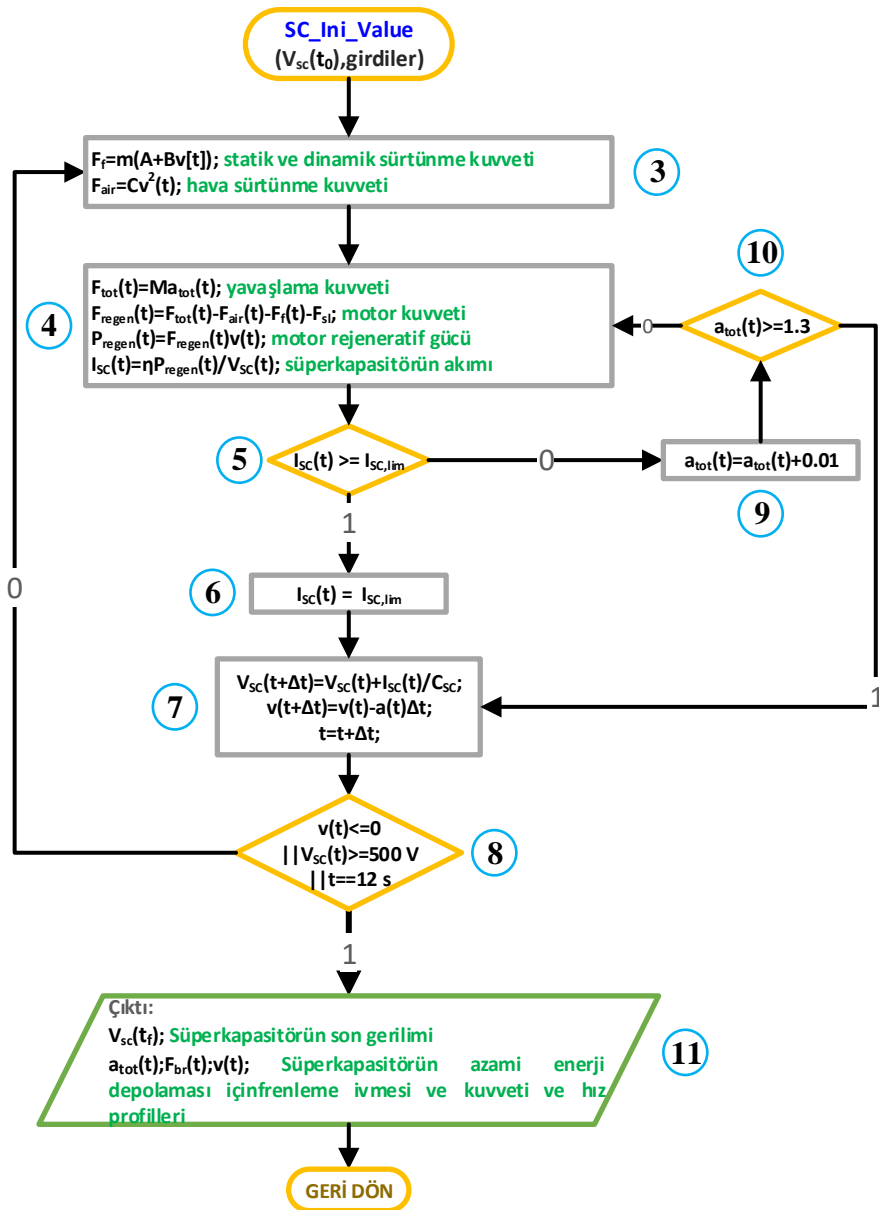
C değeri ise hava sürtünme katsayısı olarak ifade edilip, bu değer ise yine bir çok yerde deneysel ölçümlerle matematik formülüne dökülmeye çalışılan bir



katsayıdır. C değeri havanın yoğunluk katsayısı  $\rho$ , aracın rüzgara karşı gelen yüzeyinin aerodinamik katsayısı,  $C_d$ , ve bu yüzeyin alanı,  $A_d$  ile doğru orantılı bir değerdir.

$$C = \frac{1}{2} C_d \rho A_d \quad (2-35)$$

Şekil 2.24'te ise Şekil 2.23'te verilen adım ②'de belirtilen süperkapasitör ilk değeri kullanılarak uygulanan iteratif fonksiyonun akışı tanımlanmıştır. Bu fonksiyon kullanılarak frenleme ivmesi ve kuvveti ve frenleme hızı için bir profil çıkarılmaktadır.



Şekil 2.24. Tork, Hız ve İvme Profillerinin Çıkarıldığı Fonksiyon

Aracın maruz kaldığı kurp kuvvetleri için ise bir çok farklı ülkenin baz aldığı bazı hesaplamalar vardır [82]. Metro ve hafifraylı araçlarda kurplar çok geniş olup, hızlar çok yüksek olmadığından etkisi düşüktür, tramvay araçlarında ise kurplar görece daha dar olup çok düşük hızlarda seyir yapılmalıdır. Bu sebeple araç kurpa girmeden önce frenleme yapılmış düşük seyir hızlarına inmiş olacaktır. Burada sayılan sebeplerden dolayı kurp kuvvetleri benzetim ve laboratuvar çalışmalarında ihmal edilmiştir.

$F_{br}$  motorun uyguladığı frenleme kuvveti olmak üzere frenleme esnasında aracın maruz kaldığı kuvvetler toplamı şöyle verilebilir:

$$F_{tot} = F_{br} + F_{fr} + F_{air} \mp F_{sl} \quad (2-36)$$

Yukarıdaki denklemlerle birlikte çalıştırılan Şekil 2.24'teki fonksiyonun akış şeması maddeler halinde şu şekilde anlatılabilir:

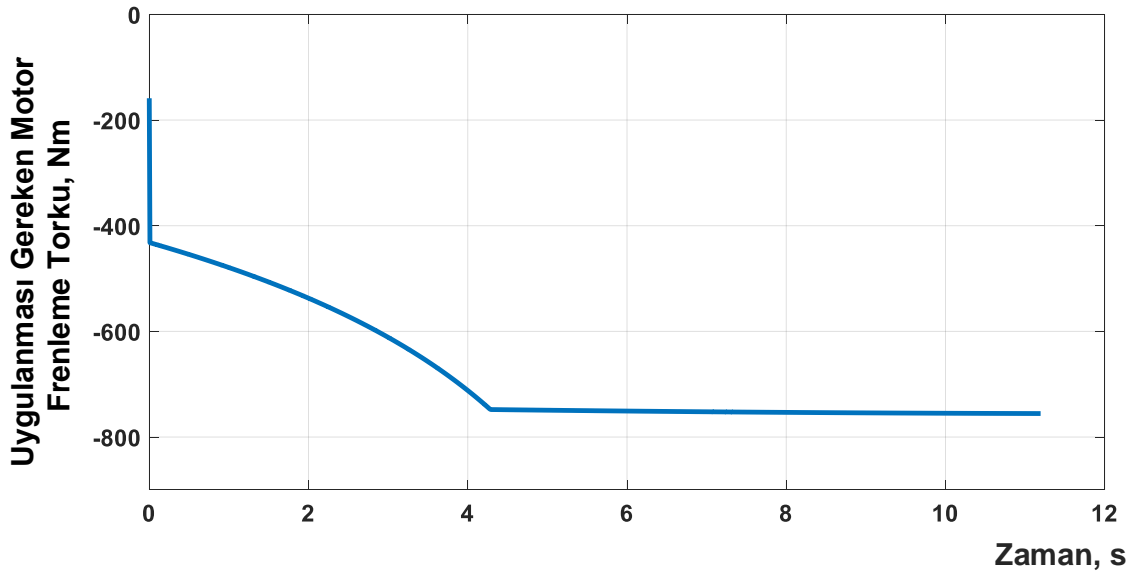
- Adım ③'te statik ve dinamik sürtünme kuvvetleri ve hava sürtünmesinden kaynaklı kuvvet hesaplanır ve hıza göre güncellenir.
- Adım ④'te araç kütlesi ve frenleme ivmesi ile araca etkiyecek olan toplam kuvvet hesaplanır, sonrasında bu kuvvetten sürtünme ve yerçekim kuvveti çıkarılarak motorun oluşturması gereken kuvvet bulunur. Yine hıza bağlı olarak oluşan motor kuvveti ile motorun üreteceği güç hesaplatılır. Verimler (motor ve çevirgeçler) ile çarpılarak süperkapasitöre gidecek güç üzerinden süperkapasitörün anlık gerilimine göre akımı bulunur.
- Adım ⑤'te eğer süperkapasitör akımı 250 A'den küçükse, frenleme ivmesi arttırılmak üzere adım [9]'a gidilir ve ivme bir örnekleme değeri kadar arttırılır.
- Adım ⑩'da frenleme ivmesi  $1.3 \text{ m/s}^2$ 'den küçükse adım ④ tekrarlanır, değilse adım ⑦'ye gidilir.
- Adım ⑤'te eğer süperkapasitör akımı 250 A'dan büyük veya buna eşitse adım ⑥'da süperkapasitör akımı 250 A ile sınırlandırılır.

- Adım ⑦'de süperkapasitör gerilimi bulunan akım değeri ile bir sonraki adımda şarj edileceği değere artırılır. Araç hızı da frenleme ivmesi ile bir sonraki adım için güncellenir.

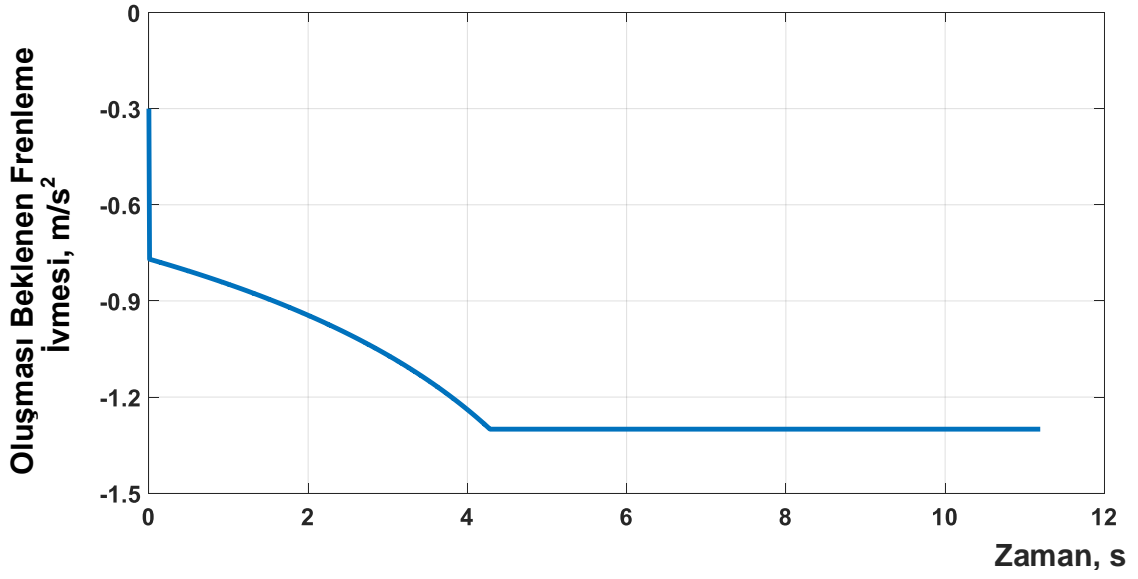
- Adım ⑧'de hız sıfıra ulaşmamışsa, süperkapasitör gerilimi 500 V olmadıysa ve azami frenleme süresi olan 12 s aşılmadıysa, döngüye adım ③ ile devam edilir.

- Adım ⑧'de hız sıfıra ulaşmış veya süperkapasitör gerilimi 500 V olmuş veya azami süre 12 s'ye ulaşılmışsa döngü bitirilir ve ana döngüye çıktılarla geri dönülür.

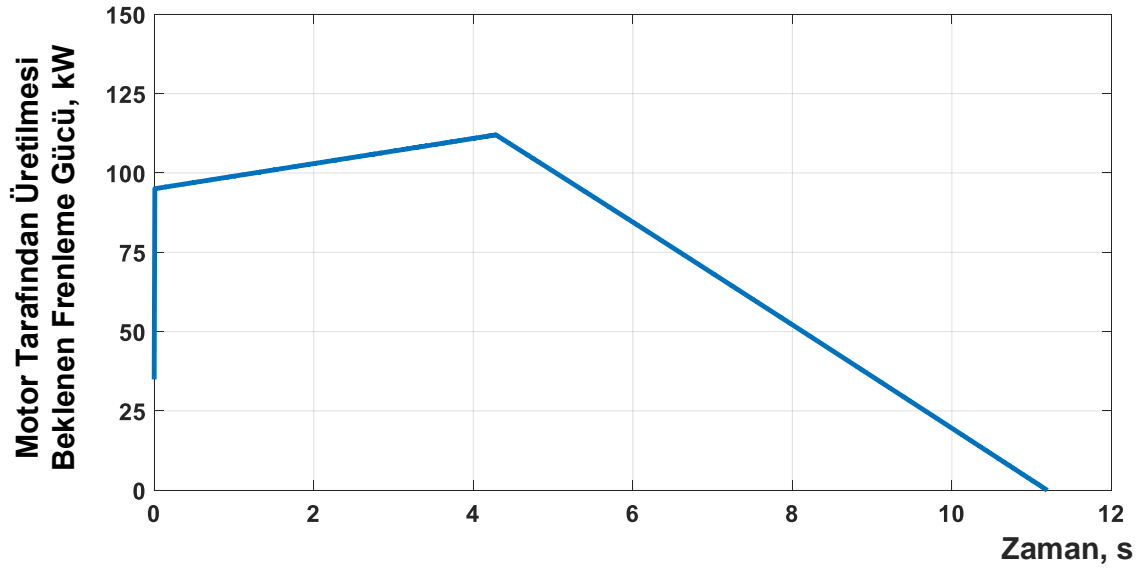
Bu algoritmadan çıkan sonuca göre motor tarafından uygulanması gereken frenleme torku Şekil 2.25'te verilmiştir. Bu frenleme torku uygulandığında ortaya çıkması beklenen frenleme ivmesi, frenleme gücü ve aracın sürati de sırasıyla Şekil 2.26, Şekil 2.27 ve Şekil 2.28'de verilmiştir. Şekil 2.27'den anlaşılacağı üzere frenleme torku tepe değerden başlamadığı için motorun ürettiği güç de tepe değerden başlamamıştır. Böylece motorun ürettiği gücün tamamı süperkapasitör üzerine aktarılabilir olacaktır.



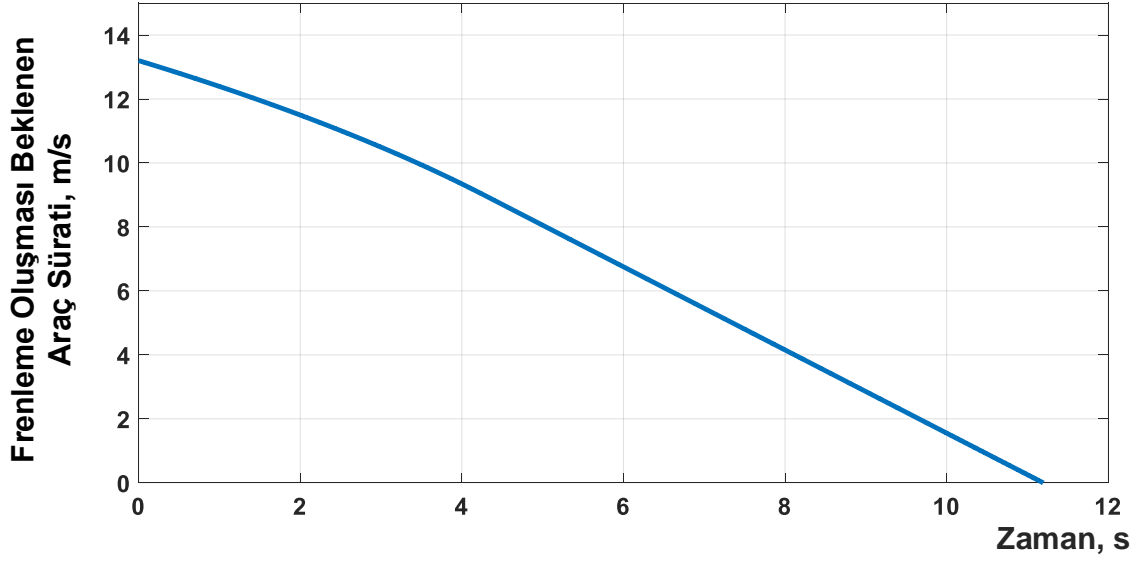
Şekil 2.25. Frenleme Profili Algoritması Sonucu Motorun Uygulanması Gereken Frenleme Torku



Şekil 2.26. Frenleme Profili Algoritması ile Elde Edilen Motorun Uygulayacağı Frenleme Torku ile Oluşacak Frenleme İvmesi



Şekil 2.27. Frenleme Profili Algoritması ile Elde Edilen Frenleme Torku ile Motorun Üreteceği Frenleme Gücü



Şekil 2.28. Frenleme Profili Algoritması ile Elde Edilen Motorun Uygulayacağı Frenleme Torku ile Oluşması Beklenen Araç Sürati

Şekil 2.28’de gösterilen hız profili incelendiğinde ilk aşamada yavaşlamanın düşük ivmeyle sonrasında ise tam frenleme ivmesiyle yapıldığı görülmektedir. Burada bir miktar frenleme süresinin uzadığı düşünülebilir fakat frenlemenin 1s kadar uzaması sistemin genel işleyinde bir sıkıntı yaratmayacağı düşünülmüştür. Bu algoritma ile ilgili detaylı benzetimler Bölüm 3.2.5’te verilmiştir.

### 3. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu bölümde tasarlanan sistemin gerçek elemanlar kullanarak çalıştırılmadan önce ve sonra MATLAB/Simulink, LTSpice ve PLECS benzetim ortamlarında benzetim sonuçları verilmiş ve değerlendirilmiştir. Benzetim çalışmaları hem elemanların seçimlerinde yol gösterici ve doğrulayıcı, hem de sistemin kapalı döngü çalışmasını doğrulamak için önem arz etmektedir.

#### 3.1 Anahtarlama Elemanlarının Anahtarlama ve Kayıp Benzetimleri

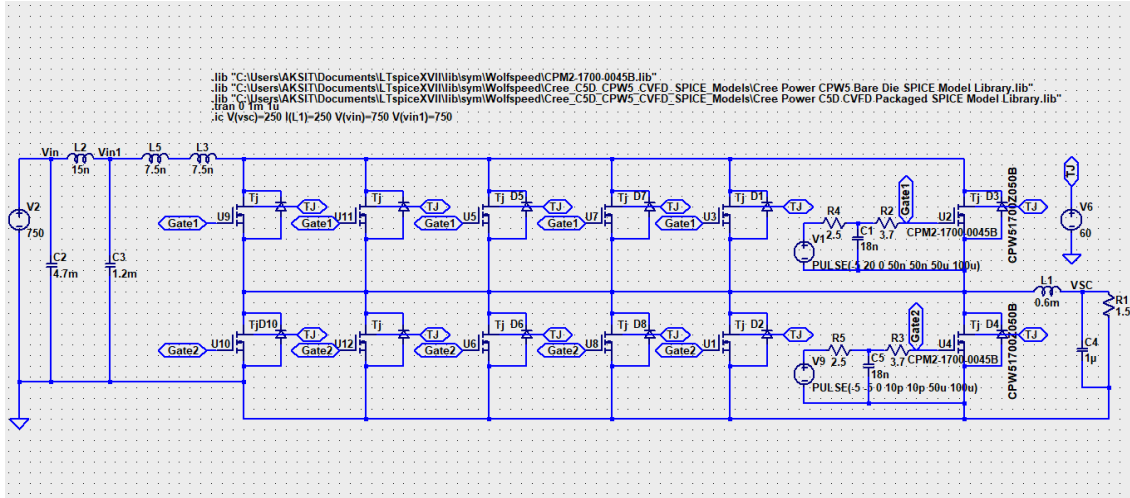
Anahtarlama elemanlarının seçimi için kayıp hesaplamaları Bölüm 2.4.4, Çizelge 2.4'te verilmiştir. Bu bölümde SiC MOSFET anahtarların en çok öne çıkan özelliklerinden hızlı açılış ve kapanış, buna bağlı düşük anahtarlama kayıpları değerlendirilmiştir. Bunun yanında üreticilerin kendi ürünlerinin ısıl başarımları için geliştirdiği benzetim programlarından yararlanarak bir başarımlar kıyaslaması yapılmıştır.

##### 3.1.1 SiC MOSFET'in LTSpice Benzetimi ile Gerçeğe Yakın Anahtarlama Benzetimleri

Bu bölümde SiC MOSFET'in anahtarlama esnasında açılış ve kapanış grafikleri incelenmiştir. Yüksek frekans anahtarlama için anahtarlama hızlarının yüksek, bunun yanında kayıpların ise düşük olması gerekmektedir. Wolfspeed herkese açık şekilde MOSFET'lerin LTSpice için modellerini vermektedir. Bu modeller ile gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu sonuçlar ölçüm sonuçlarıyla kıyas yapmak açısından önem arz etmektedir. Böylece oluşturulan model ile farklı çalışmalara başlamadan önce yapılacak benzetimlerin gerçeğe ne kadar yaklaşacağı anlaşılacaktır.

Wolfspeed modüllerin LTSpice modelini vermemekle birlikte içerisinde kullanılan çiplerin tam modelini vermektedir. Firma ile yapılan yazışmalar sonucu modülün içeriğinde hangi çiplerden kaç adet kullanıldığı öğrenilmiştir. Bu bilgi ile benzetim ortamında CAS300M17BM2 yarı köprü modülünün modeli yaklaşık olarak

çizilmiş ve indirici kiplemede anahtarlamayı görebilmek için gerekli devre şeması ile birlikte Şekil 3.1’de verilmiştir.



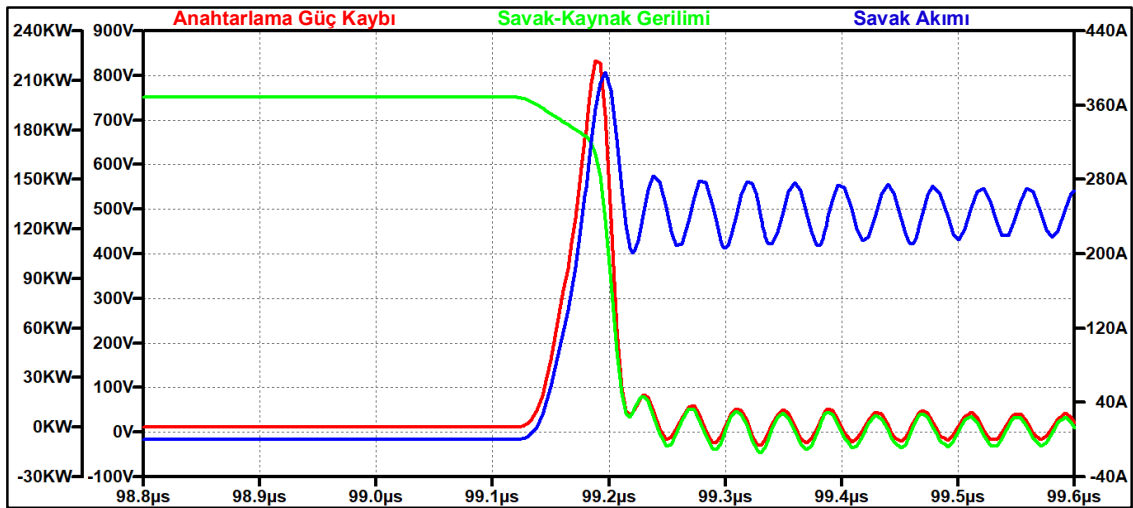
Şekil 3.1. SiC MOSFET Modülü CAS300M17BM2 için Oluşturulan Benzetim Şeması (Modül İçinde 12 adet SiC MOSFET Yongası ve 12 Adet SiC Diyot Yongası Paralel ve Yarım Köprü Oluşturacak Biçimde Bağlanmıştır)

Bu devrede 6 adet anahtar birbirine paralel bağlanmış ve bu bağlantıyla yarım köprü modülün yüksek ve alçak tarafları oluşturulmuştur. LTSpice ortamında sayısal denetim sistemi oluşturmak zor olduğundan ve uzun süreli benzetime uygun olmamasından dolayı, açık döngü sistemde endüktans ve direnç yükü kullanılarak 750 V giriş gerilimi, 0.5 görev çevrimi ve 250 A çıkış akımı olacak şekilde birkaç milisaniyelik benzetim yapılmıştır.

Yapılan benzetimlerden Savak-Kaynak gerilimi, Savak akımı ve anahtarlama güç kaybı çıkarılmıştır. Şekil 3.2’de verilen grafikte anahtarın açılış anında Savak-Kaynak gerilimi ile Savak akımı çizdirilmiştir. Kullandığımız anahtarın tam açılış süresinin veriföyünde verilen bilgiye yakın, yaklaşık 40 ns olduğu gözlenmektedir, parazitik kapasitanslardan (büyük oranda savak-kaynak kapasitansı) dolayı savak akımında ciddi bir sıçrama ve sonrasında rezonanstan kaynaklı sönümlenen bir akım salınımı görülmektedir. Anahtarın anlık akım sınırını geçmediği müddetçe akım tepesi sıkıntı yaratmayacaktır. Şekil 3.3’te ise anahtarın kapanış anındaki gerilim ve akımlar verilmiştir. Buradaki kapanış süresi incelendiğinde de yaklaşık 60 ns sürede tam kapanmanın gerçekleştiği ve bunun veriföyündeki veriye yakın olduğu anlaşılmaktadır. Kapanış esnasında ise savak-kaynak geriliminde bir sıçrama oluşmuş, bunun sebebi ise parazitik

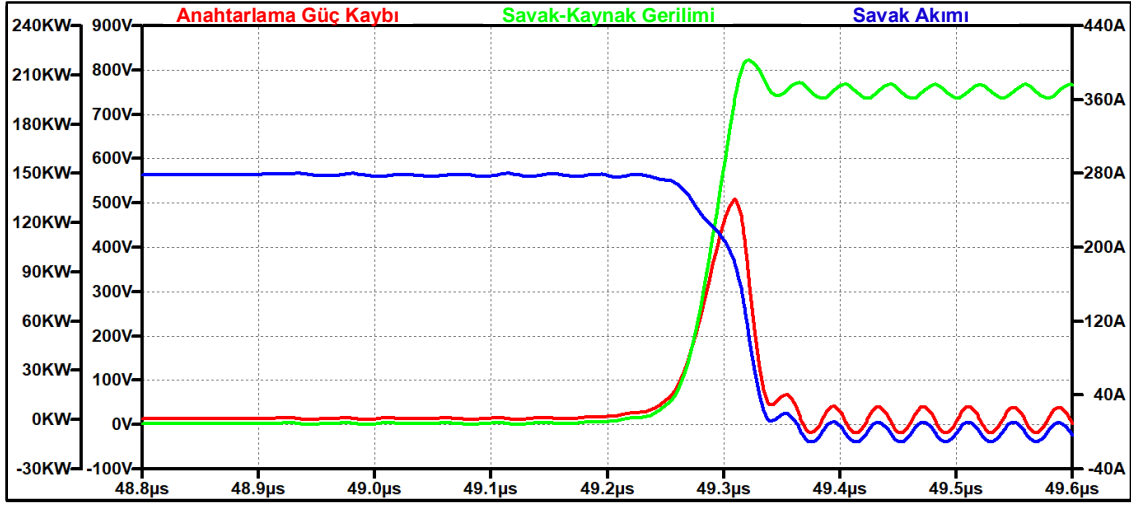
endüktanslardır. Parazitik endüktanslar küçüldükçe bu gerilim sıçraması azalacaktır. Benzetim sonuçlarıyla, devre ölçümlerinde de bu gerilim ve akım sıçramalarını görmenin normal olacağı ortaya çıkarılmıştır.

Yine Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'e bakıldığında anahtarlama esnasında kaybolan güç grafikleri gözükmemektedir. Bu grafikler anahtarlama esnasında ne kadar enerji kaybı olduğu hakkında bilgi vermektedir. Kesin bir bilgi olmasa da benzetim sonuçları anahtarlama esnasında ne kadar güç kaybı oluşacağını aşağı yukarı göstermektedir. Açılış esnasında 9.8 mJ ve kapanış esnasında 6.9 mJ kapanış enerjileri hesaplatılmıştır. Bu değerler de üreticinin veriföyündeki değerler ile örtüşmekte, ve gerçek ölçümlerimizde de buna yakın değerler alacağımızı göstermektedir.



Şekil 3.2. LTSpice Benzetimi ile SiC MOSFET'in Açılış Anındaki Akım, Gerilim ve Güç Kaybı Grafikleri





Şekil 3.3. LTSpice Benzetimi ile SiC MOSFET'in Kapanış Anındaki Akım, Gerilim ve Güç Kaybı Grafikleri

### 3.1.2 Anahtarların Kayıp ve Isıl Başarım Benzetimleri

Bu bölümde ise bu hesaplamaları doğrulamak amacıyla tüm IGBT modülleri için üretici firmaların kendi ürünleri için geliştirdiği, IPOSIM (Infineon), MELCOSIM (Mitsubishi) ve Fuji (IGBT Simulator) benzetim araçları, SiC Güç MOSFET'i için ise Wolfspeed firmasının SpeedFit Design Simulator benzetim aracı kullanılmıştır. Bu benzetim çalışmalarını yapmaktaki asıl amaç karşılaştırılan modüllerin kayıplarının ve gerçeğe yakın eklem sıcaklıklarının ulaşabileceği değerleri görebilmek; SiC Güç MOSFET'i kullanımının avantajlarını ortaya çıkarabilmektir.

Daha önceki bölümlerde sıkça bahsedildiği üzere süperkapasitör geniş bir gerilim aralığında çalışmaktadır. Bunun yanında üreticinin verdiği bilgi doğrultusunda süperkapasitörlerin eşdeğer seri direncinden (ESR) kaynaklı bir akım sınırı vardır. Benzetimler yapılırken akım sınırı olarak üretici veriföyünden aldığımız 250 A akım sınırı ve gerilim aralığı olarak 250 ~ 500 V gerilim aralığı baz alınmıştır [61]. Burada 250V ve 500V değerlerine yaklaştığımızda, ileriki bölümlerde anlatılacak olan kontrol algoritması gereği limit değerlerin aşılması için, akım düşürülmekte, sınır değerlerde 250 A akım veya biraz altında çalışmak mümkün olmamaktadır.

Yukarıda bahsedilen sebeplerle uzun süreli çalışmalarda süperkapasitörün gerilim değişiminden kaynaklı görev çevrimi sürekli değişkenlik gösterecek ve bu değişkenlik kayıplara yansiyacaktır. Kayıp ve ısı benzetimlerinde görev çevrimleri sabit verilebildiğinden akım 250 A'de sabit tutulup süperkapasitör gerilimini iki sınır değerinin ortalaması olan 375 V'ta tutularak yapılan benzetimlerin sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir; bunun yanında 750 V katener gerilimi için görev çevrimi her iki çalışma modunda (indirici veya yükseltici) 0.5 olacağı için sonuçlar eşit çıkmaktadır.

Üreticilerin verdiği veriföyleri bilgilerinde bulunan azami eklem sıcaklıkları Si-IGBTler için 150°C iken SiC MOSFET'ler için 175°C'dir. Ancak genel bir kural olarak bu sıcaklıklar sürekli uygulanmaması gereken sıcaklıklardır. Tasarlanan sistemin uzun ömürlü olması için eklem sıcaklığı 120°C'yi geçmemeli, 150°C sıcaklıklar çok nadir oluşturulmalıdır. Bu bilgilerden hareketle 5 kHz anahtarlama frekansında en çok çalışılan gerilim aralıklarında Si ve Hibrit IGBT modüllerde IGBT eklem sıcaklıkları 120°C'nin üzerinde olduğu Çizelge 3.1'de görülmektedir.

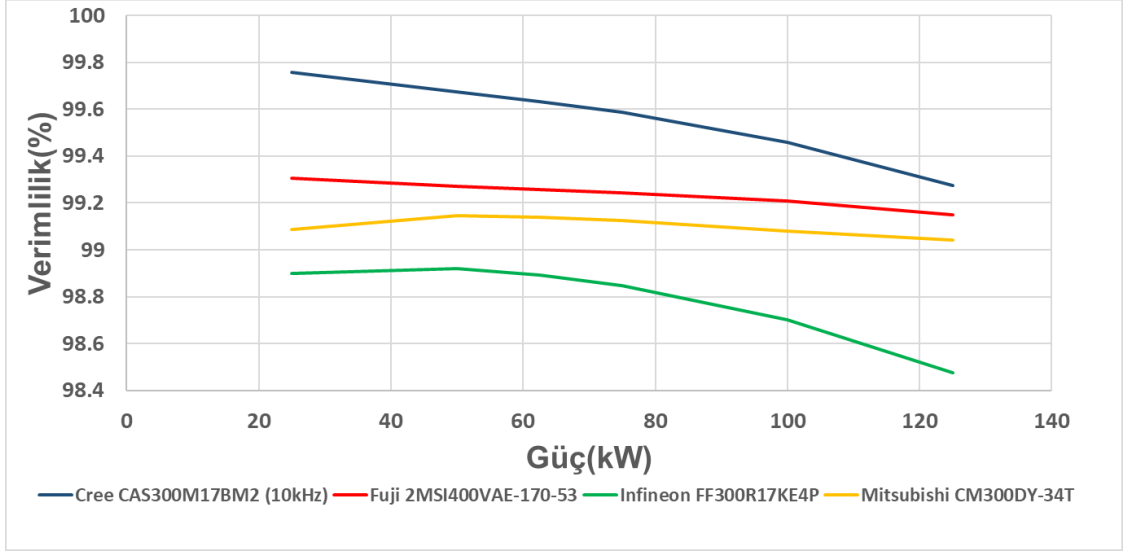
Çizelge 3.1. Süperkapasitör Gerilimi 375 V iken 250 A Akım Altında Anahtar Kayıplarının Karşılaştırılması

Anahtarlama Frekansı (kHz)	Marka (Modül)	P <sub>o</sub> =93.75 kW, V <sub>sc</sub> =375 V, V <sub>dc</sub> =750 V							
		Si IGBT Modül (FF300R17KE 4P) Infineon		Si IGBT Modül (CM300DY-34T) Mitsubishi		Hibrit IGBT Modül (2MSI400VAE-170-53) Fuji Electric		SiC MOSFET Modül (CAS300M17BM2) Wolfspeed/Cree	
		IGBT	Diyot	IGBT	Diyot	IGBT	Diyot	MOSFET	Diyot
1	Kayıp (W)	414.9	214	388.7	338.5	322.5	201	-	-
	T <sub>vj</sub> (°C)	109	98.9	94.2	100.4	79.6	79.2	-	-
2.5	Kayıp (W)	545.7	302	554.2	374.8	482.2	220	-	-
	T <sub>vj</sub> (°C)	122.2	113	111.0	112.1	96.3	87.6	-	-
5	Kayıp (W)	929	445	830.0	435.4	774.5	251	574.4	216
	T <sub>vj</sub> (°C)	166.4	139	139.7	132.5	126.8	102	110.2	73.9
10	Kayıp (W)	-	-	-	-	1846	309	678.2	216
	T <sub>vj</sub> (°C)	>200	>200	>200	>200	>200	149	122.1	75.8

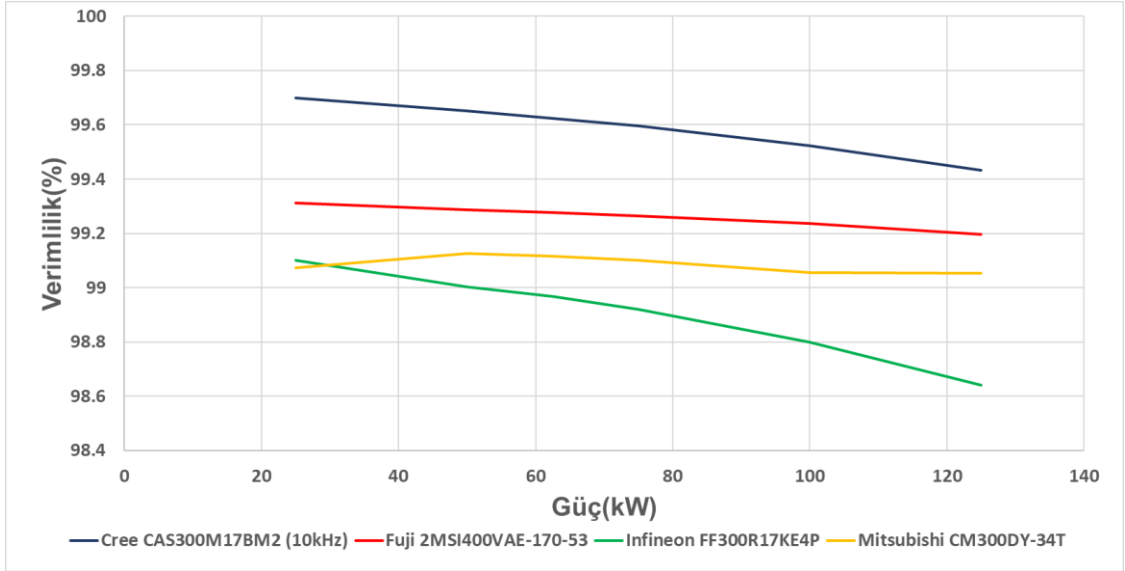
Sistemimizde kullandığımız SiC MOSFET modülde ise 10 kHz anahtarlama esnasında 120 °C sıcaklığın görece çok aşılmadığı görülmektedir. Bölüm 2.4.5'te bahsedildiği üzere anahtarlama frekansını düşürüp aynı akım salınımını yakalamak için endüktans değerini ters orantılı olarak artırmanız gerekmektedir.

Bununla birlikte endüktans değerini aynı malzemeleri kullanarak artırmanız için hacimsel boyutunuzu değer karesiyle artırmanız gerekmektedir. Sonuç olarak 10 kHz için tasarlanmış bir reaktör ile 5 kHz anahtarlama yapmak sistemde daha fazla akım dalgalanmasına yol açacak, yüksek akımlarda dahi kesintili akım modunda çalışma durumu ortaya çıkabilecektir. Bu sebeple IGBT kullanımında aynı akım salınımını yakalayabilmek için daha büyük bir reaktör kullanımı gerekmektedir. Aynı şekilde IGBT kullanımında sadece anahtar kayıpları artmamakta, bunun yanında sistem boyutu da büyümek zorunda kalmaktadır. Başka yönden baktığımızda ise sistemin boyutunu büyütmeden anahtarlama frekansını azaltmak istediğimizde ise pasif elemanların üzerindeki kayıplar bir miktar artacak, düşük akım değerlerinde ise kesintili akım moduna geçip sistemin denetimi zorlaşacaktır.

Benzetim çalışmalarının diğer ayağında ise güç bloklarının kayıplarıyla birlikte verimlerinin de karşılaştırması yer almaktadır. Bu çalışma için ise SiC MOSFET için en verimsiz bölge olan azami süperkapasitör gerilimi (500V) seçilmiştir. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te gösterilen, sırasıyla indirici ve yükseltici kip çalışmalarını içeren grafikler yine aynı benzetim programlarından çıkan sonuçların tablolara işlenmesi ile ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada ise eklem sıcaklıkları dikkate alınmamış, sadece kayıplar üzerinden bir analiz yapılmıştır. SiC MOSFET 10 kHz anahtarlama da tabii tutulmuş, diğer modüller ise 5 kHz anahtarlama da çalıştırılmıştır.



Şekil 3.4. İndirici Kipte Farklı Modüllerin Farklı Güç Seviyelerinde Verim Eğrisi



Şekil 3.5. Yükseltici Kipte Farklı Modüllerin Farklı Güç Seviyelerinde Verimlilik Eğrisi

Her iki grafikten anlaşılacağı üzere SiC MOSFET toplam verimlilikte hep %99.2'nin üzerinde çıkmaktadır. Diğer taraftan diğer ürünler akım kapasitesi olarak büyük seçilmiş olmalarına ve daha düşük frekansta anahtarlanmalarına rağmen verim olarak hiçbir aşamada aynı başarıyı yakalayamamaktadır. Bu grafikler sadece güç modüllerinin kayıplarını içermekte olup, SiC MOSFET daha yüksek frekansta anahtarlandığından pasif elemanlar üzerindeki kayıpları da daha düşük olacağı gözükmemektedir.

### **3.2 Süperkapasitör Depolamalı Frenleme Geri Kazanımı Sistemi için Benzetim Çalışmaları**

Süperkapasitör enerji depolama sistemi ve bu sistemi birlikte çalıştırmak için geliştirilen DGK doğrultucu ve yeni nesil cer sürücüsü sistemi için gerekli tüm altyapılar kurulmadan önce bir çok benzetim çalışmaları yapılmıştır. Proje başvurusu öncesi el ile hesaplamalarla birlikte her sistemin ayrı ayrı ve birlikte MATLAB/Simulink ve PLECS ortamlarında benzetimleri yapılmıştır.

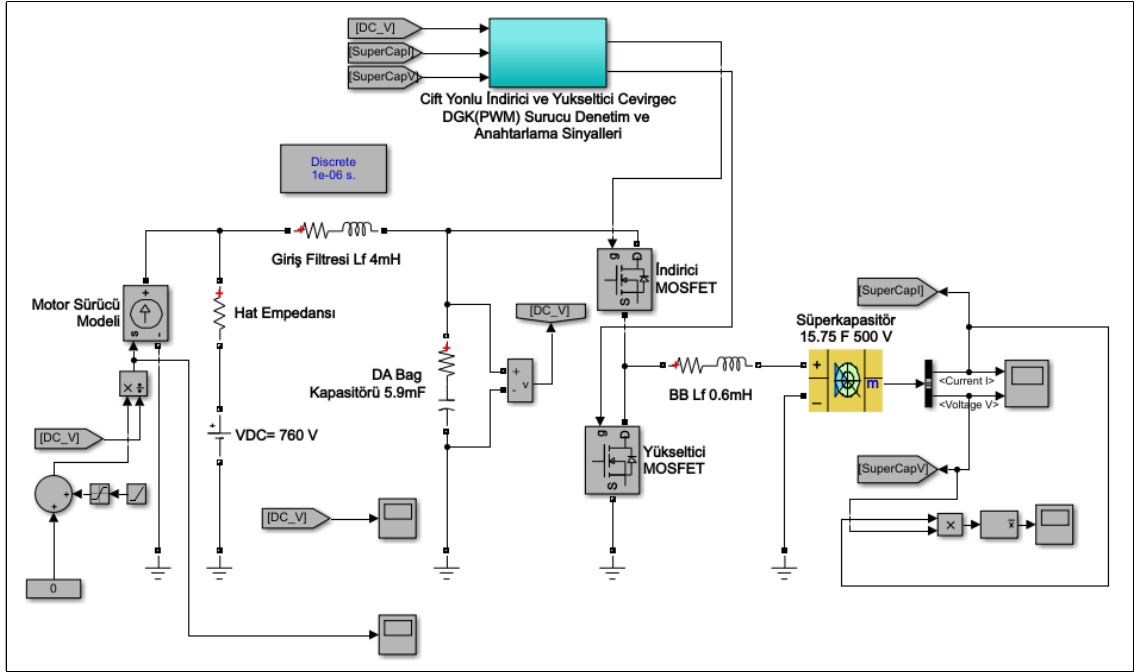
Benzetim çalışmalarının bir kısmı el ile hesaplamayı doğrulamak amacıyla yapılmış, el ile hesaplamada bulunan bazı değerlerin benzetim çalışmaları sonucunda değişmesi gerekmiştir. Benzetim çalışmaları el hesaplarında gözden kaçırılan ve ihmal edilen noktalardan hata çıkma olasılığını düşürmek için önem arz etmektedir. Benzetim sonuçlarından çıkan verilerle sistemlerin bileşenleri satın alınmıştır.

Benzetim çalışmalarında diğer bir amaç ise gerek laboratuvar ortamında, gerekse gerçek bir araca tasarlanacak sistemin yapısının, çalışma algoritmalarının ve çalışma başarımının önden ve gerçeğe yakın bir şekilde elde etmektir. Bu benzetimler laboratuvar çalışmalarını yapmadan önce çalışma koşullarını ve bu koşulların sonuçlarını görmek için gerçekleştirilmiştir. Çıkan sonuçların bir kısmının ölçüm bölümünde gerçek çalışmayla doğrulandığı gösterilmiştir.

#### **3.2.1 Benzetim Sisteminde Çift Yönlü DA/DA Çevirgecin Çalışma Kipleri ve Denetim Parametrelerinin Belirlenmesi**

Süperkapasitör depolamalı sistemin, motor sürücü ve DGK doğrultucu sistemlerin şemalarıyla birleştirmeden önce, indirici ve yükseltici çevirgeçlerin denetim sistemlerindeki katsayıların belirlenmesi amacıyla benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda Şekil 3.6'da gösterilen devre şemasında, çevirgeç ve süperkapasitör ilk olarak hat empedansı olan bir gerilim kaynağına ve güç değeri elle kontrol edilebilen bir bağımlı akım kaynağına bağlanmıştır. Gerilim

kaynağı 3. ray gerilimini modellemek, akım kaynağı ise motor sürücüyü modellemek amacıyla oluşturulmuştur.

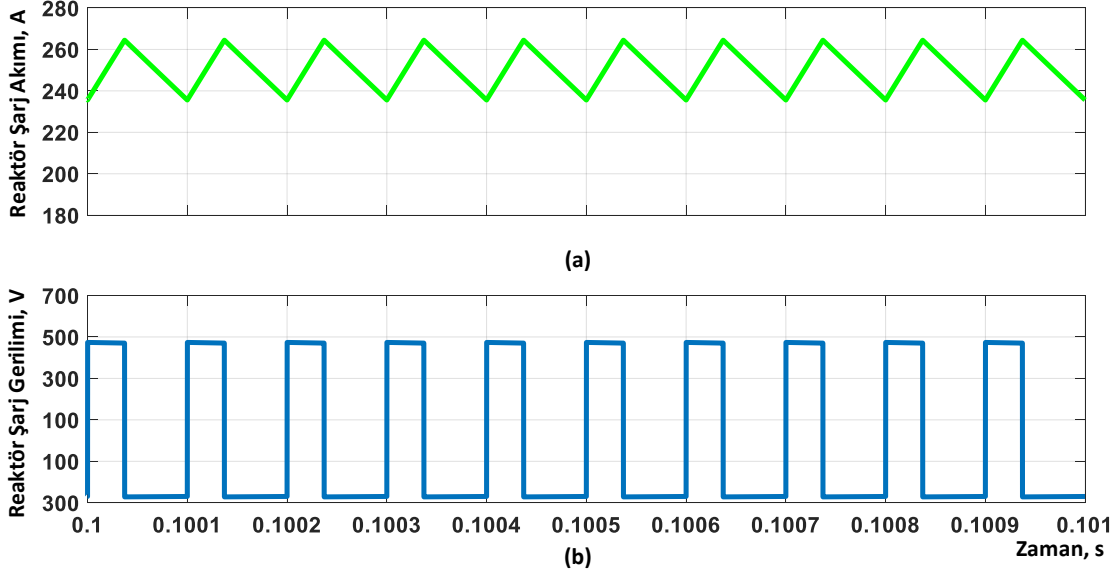


Şekil 3.6. Süperkapasitör İndirici-Yükseltici Devrenin Denetimini Gürbüz Hale Getirmek için Oluşturulan Devre Şeması

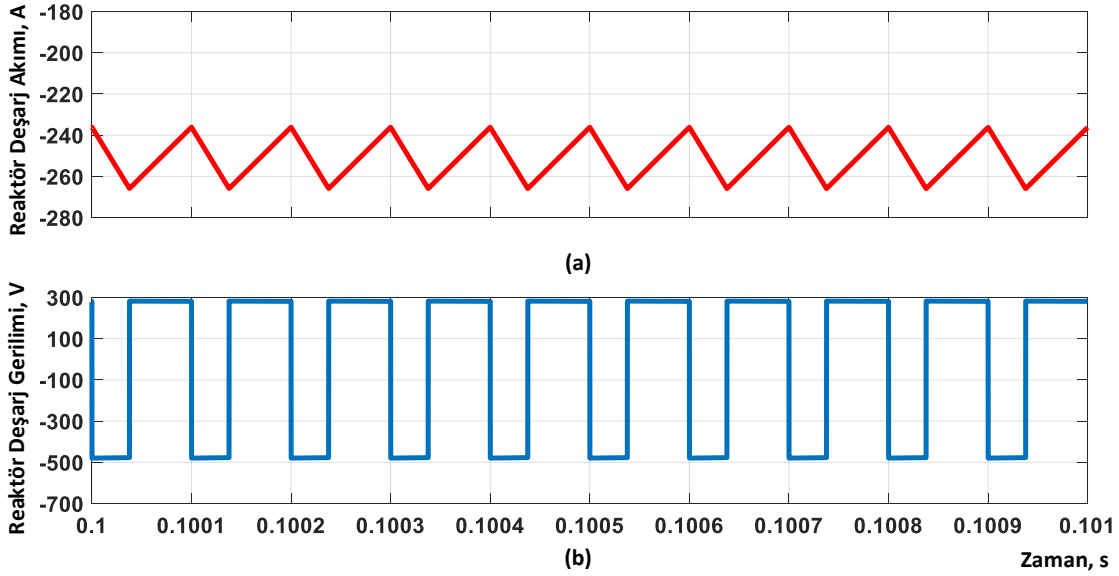
Şekil 2.20'de gösterilen denetim şemasında, öncelikle indirici kipteki denetim katsayılarını belirleyebilmek için süperkapasitörün başlangıç gerilimi değiştirilerek sadece akım denetimini yapan PI bloğunun katsayıları ayarlanmıştır. Bu aşamada indirici kipte süperkapasitör sürekli 250 A sabit akım ile şarj edilecek şekilde çalışma yapılmış ve süperkapasitör şarj esnasındaki gerilim değişiminde (250 V → 500 V) etkilenmemesi sağlanmıştır. Bu şarj esnasında oluşan reaktör akımı ve gerilimi Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Sonrasında benzetim çalışması çift katlı PI bloklarıyla giriş gerilimi, çıkış gerilimi ve akımının değişimlerine karşı kararlı ve gürbüz bir hale getirilene kadar bu şekilde çalıştırılmış ve PI denetim katsayıları ayarlanmıştır.

İndirici kipteki denetim çalışmalarının benzerleri yükseltici kip çalışmaları için de yapılmıştır. Yine önce süperkapasitör tam yükte (500 V) başlatılmış ve sadece akım denetimi yapılmak üzere PI bloğunun katsayıları ayarlanmıştır. Tam yükte deşarj esnasında oluşan reaktör akım ve gerilimi Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Süperkapasitör başlangıç gerilimi (500 V → 250 V) ve ondan çekilecek güç

değiştirilerek (125 kW → 62.5 kW) denetim sisteminin giriş gerilimi, çıkış gerilimi ve akımın değişimlerine karşı kararlı ve gürbüz hale getirilene dek denetim parametreleri ayarlanmıştır.



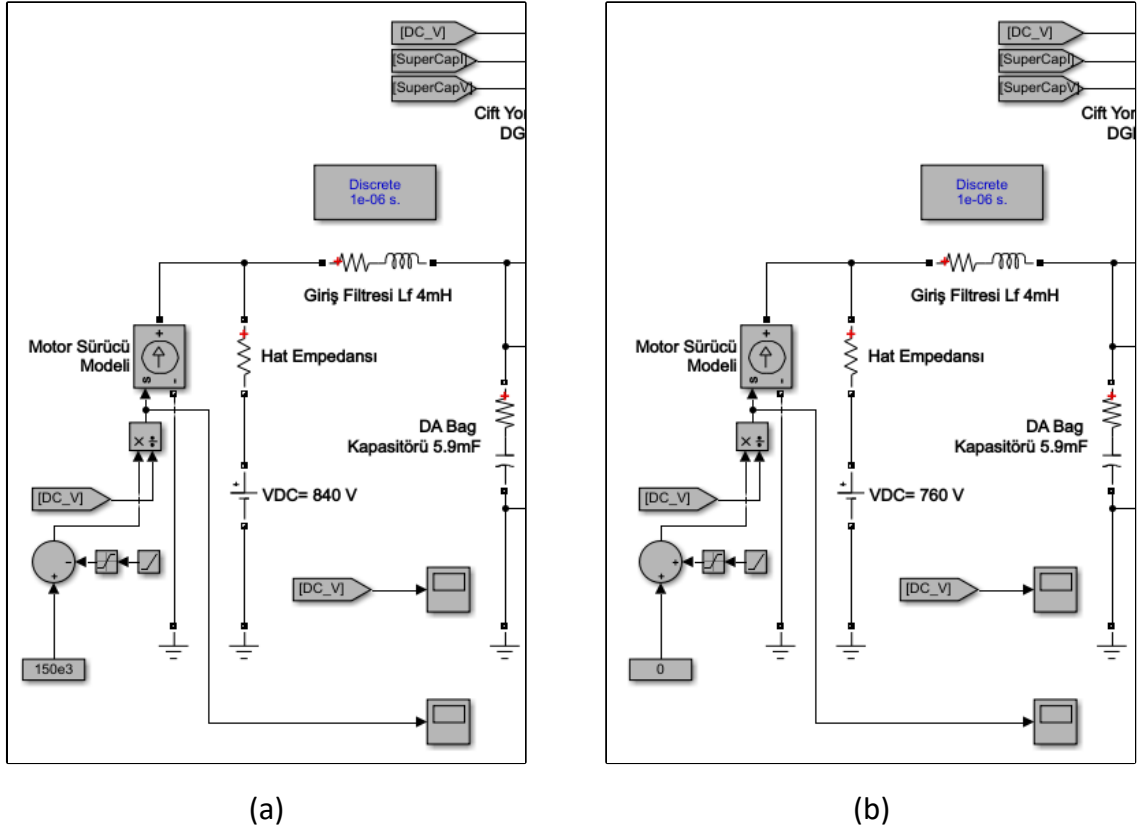
Şekil 3.7. Şarj Esnasında Reaktör Üzerindeki (a) Akım ve (b) Gerilim



Şekil 3.8. Deşarj Esnasında Reaktör Üzerindeki (a) Akım ve (b) Gerilim

Benzetim çalışmalarında Şekil 3.9 (a) ve (b)'de görüldüğü üzere 3. ray beslemesi yerine bir DA gerilim kaynağı, motor sürücüsü yerine de bağımlı akım kaynağı bağlanmıştır. Bu akım kaynağı, frenleme esnasında güç basacak ve hızlanma esnasında ise güç çekecek şekilde ayarlanmıştır. Burada bağımlı akım kaynağına girilen değer modellenecek motor gücünü DA bağ gerilimine (DC\_V) bölerek hesaplatılmış, sisteme ne kadar akım vereceği veya akım çekeceği

belirlenmiştir. Şekil 3.6 ve Şekil 3.9'daki şemalarda oluşturulan, motordan sisteme basılan güç modeli ve motora sistem tarafından aktarılan güç grafiği sırasıyla Şekil 3.10 (a) ve (b)'de verilmiştir.



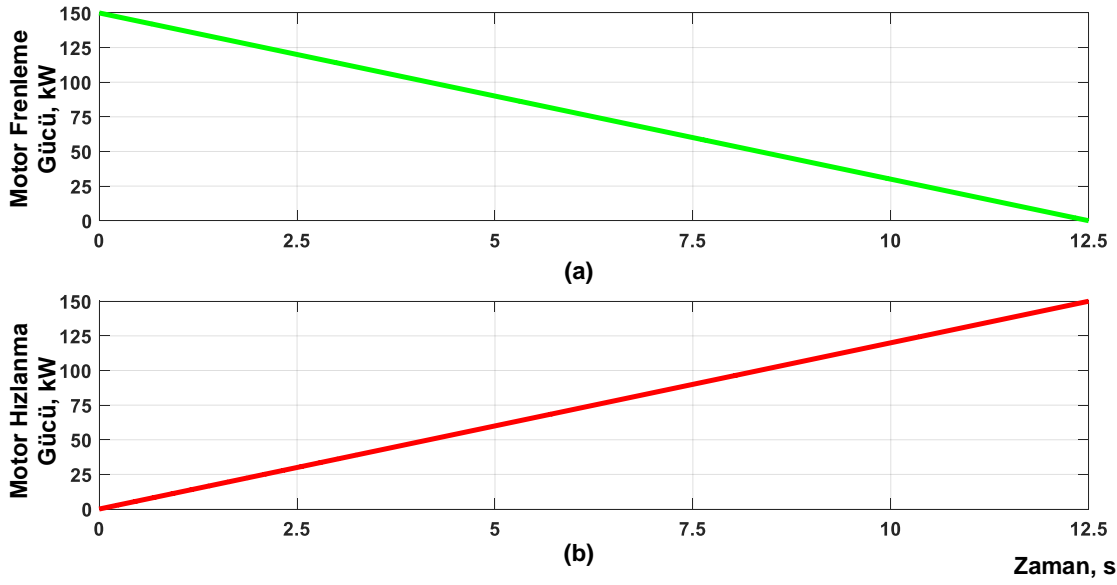
Şekil 3.9. SiC MOSFET Tabanlı Çevirgecin Şekil 4.3'te Denetim Katsayılarını Ayarlamak için Motor Modelleri; a) Süperkapsitör Şarj Etmek için Frenleme Esnasında Olası Oluşacak Negatif Rampa ile Motorda Üretilen Geri Kazanım Güç Modeli, b) Süperkapsitörü Deşarj Etmek için Hızlanma Esnasında Pozitif Rampa ile Motorun Harcadığı Güç Modeli.

Bu benzetim şemalarında kullanılan değerlerin tamamı sistem tasarımında seçilmiş bileşenlerin değerleri olup, süperkapsitör başlangıç gerilimleri indirici kipte çalışma için 250 V<sub>DC</sub>, yükseltici kipte çalışma için 500 V<sub>DC</sub> olarak belirlenmiştir.

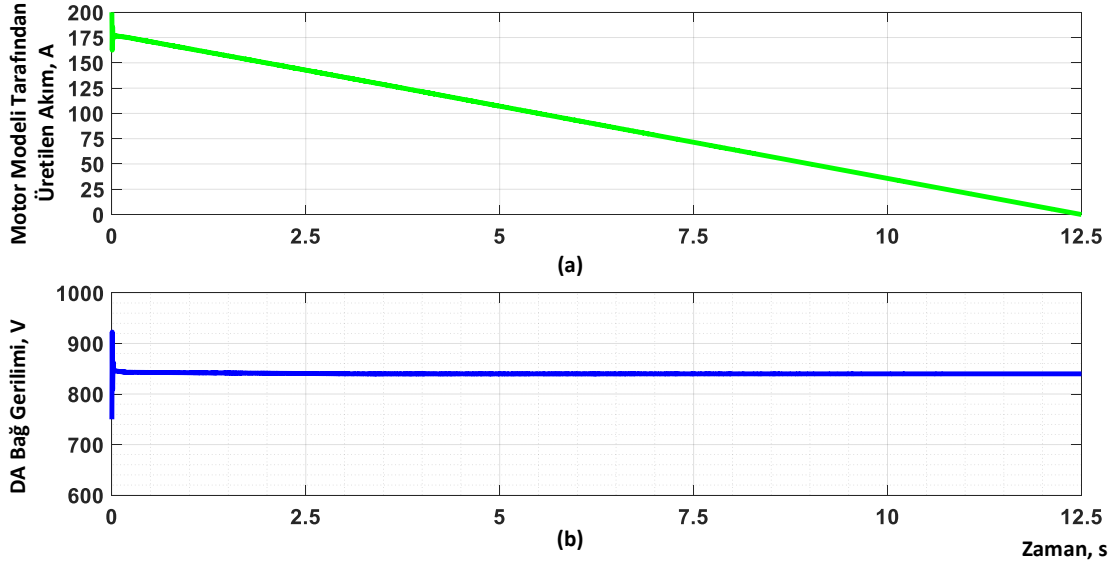
Şekil 3.10 (a)'da frenleme esnasında akım kaynağı tarafından sisteme verilen güç grafiği verilmiş ve sistem indirici kipte çalıştırılmıştır. Bu durumda motor modelinin sisteme verdiği akım ve DA bağı üzerinde oluşan gerilim rejimleri Şekil 3.11 (a) ve (b)'de ve süperkapsitörde oluşan akım ve gerilim rejimleri ise Şekil 3.12 (a) ve (b)'de verilmiştir. Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'den anlaşılacağı üzere motor



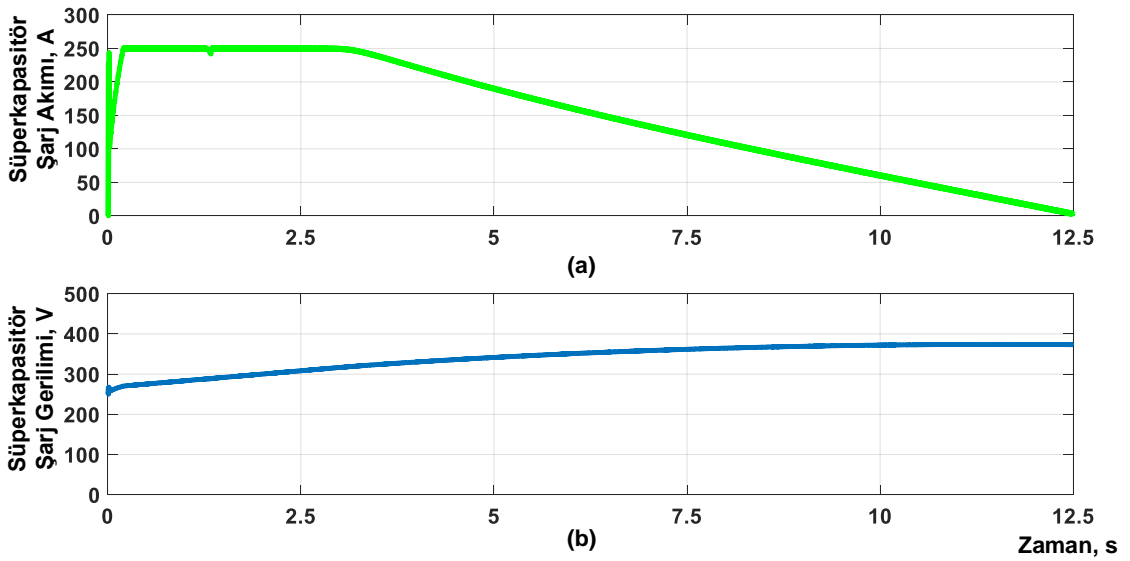
tarafından üretilen gücün miktarı süperkapasitörün akım sınırından dolayı üzerine alabileceği gücün üzerinde kalmıştır. Motor tarafından üretilen frenleme enerjisinin tamamı süperkapasitörün tepe akım sınırı ve başlangıç geriliminin düşük olması sebebiyle süperkapasitöre aktarılamamıştır. Bu enerjinin kalan kısmı gerilim kaynağına (**VDC**) aktarılmıştır. Burada gösterilen grafikler, denetim sisteminin değişken süperkapasitör ve DA bağı gerilimine karşın indirici kipte çevirgecin kararlı çalıştığını göstermektedir.



Şekil 3.10. Motor Gücü; a) Frenleme Esnasında Üretilen Güç, b) Hızlanma Esnasında Tüketilen Güç.



Şekil 3.11. Frenleme Esnasında Motor Modeli Tarafından (a) Üretilen Akım ve (b) DA Bağ Üzerinde Oluşan Gerilim

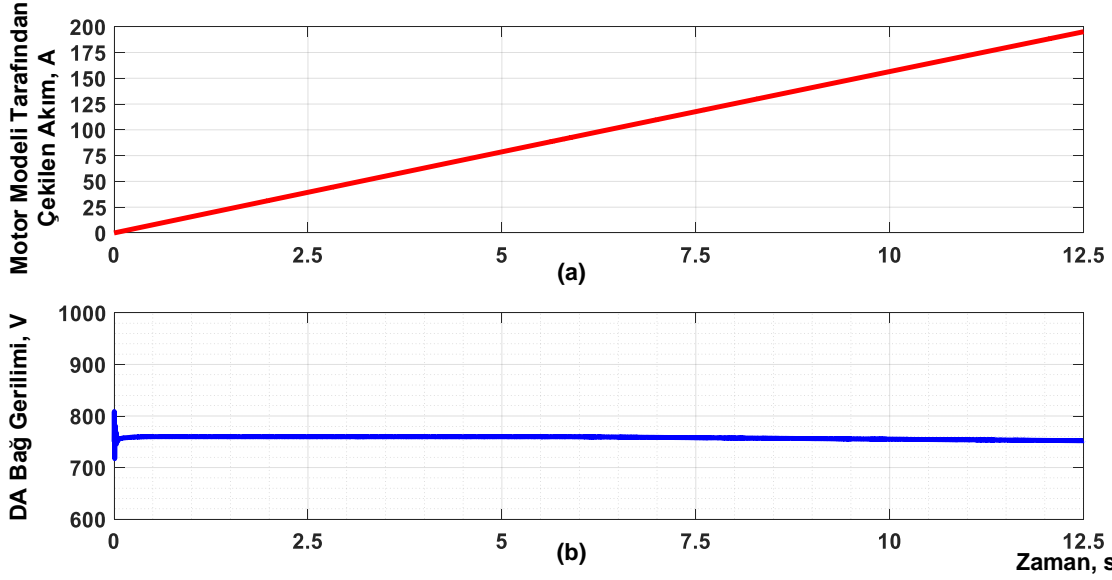


Şekil 3.12. Frenleme Esnasında Süperkapasitör Üzerinde Oluşan (a) Şarj Akımı ve (b) Şarj Gerilimi

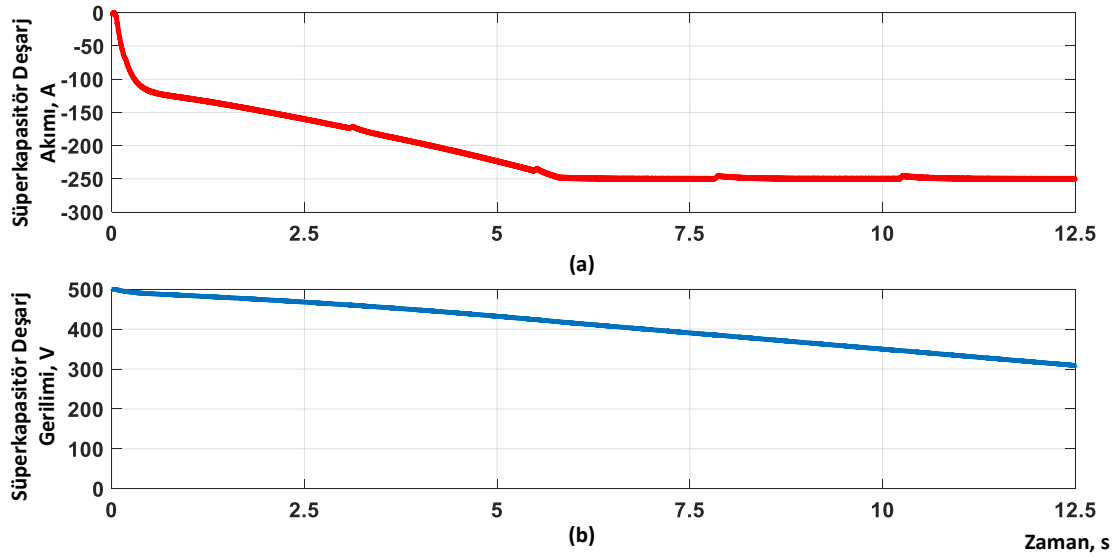
Aynı şekilde yükseltici kipteki çalışmalar için hızlanma esnasında motor modelinin sistemden çektiği güç Şekil 3.10 (b)'de gösterilmiştir. Motor modelinin sistemden çektiği akım ve DA bağ gerilimi, Şekil 3.13 (a) ve (b) süperkapasitör deşarj akım ve gerilimi ise Şekil 3.14 (a) ve (b)'de verilmiştir.

Şekil 3.14 (a)'da görüldüğü üzere sistemin güç ihtiyacı arttıkça, süperkapasitörün verdiği akım miktarı artmış ancak hızlanmanın sonlarına doğru süperkapasitör

akımı sınıra dayanmış ve Şekil 3.14 (b)'de görüldüğü süperkapasitör gerilimi arz edebildiği güç miktarı azalmıştır. Bu durum Şekil 3.13 (b)'de DA bağ geriliminin daha fazla aynı seviyede kalamayıp düştüğü durumla belirginleşmiştir.



Şekil 3.13. Hızlanma Esnasında Oluşan a) Motor Sürücü Tarafından Çekilen Akım ve b) DA Bağ Gerilimi



Şekil 3.14. Hızlanma Esnasında Süperkapasitör Üzerinde Oluşan a) Deşarj Akımı ve b) Deşarj Gerilimi

Buradaki sonuçlarla birlikte yükseltici kipte de belirlenen PI denetim katsayılarının tüm süperkapasitör ve giriş gerilimi ve akımı değişimlerinde dahi gürbüz şekilde tepki verdiği anlaşılmaktadır.

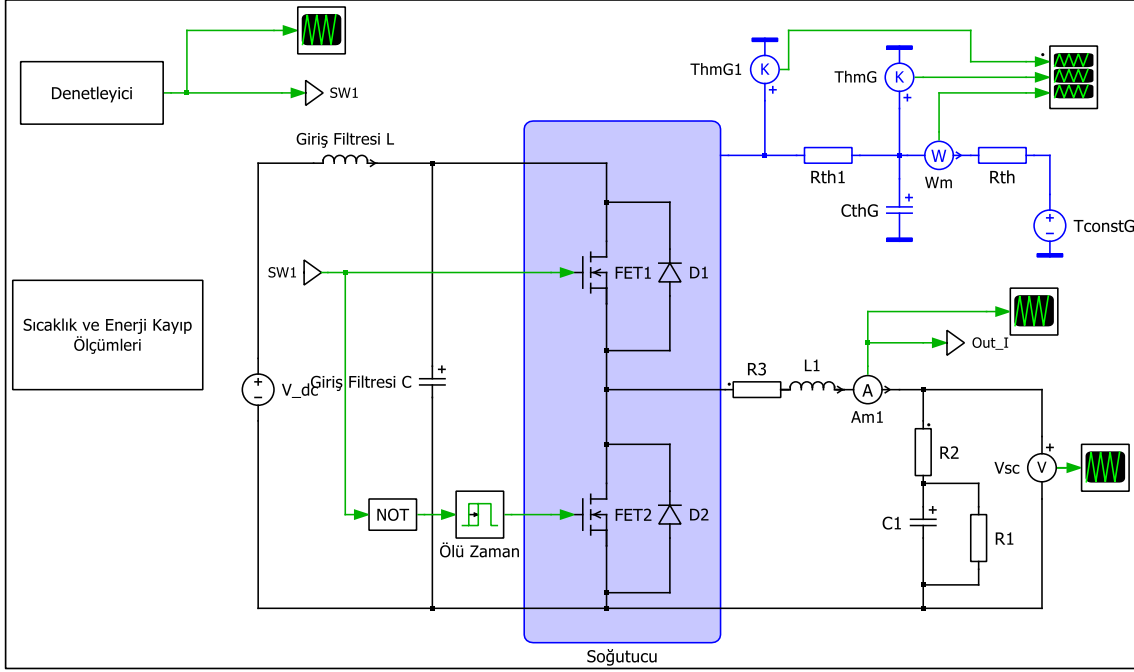
### 3.2.2 Benzetim Çalışmalarında Anma Akımı ile Şarj ve Deşarj için Enerji Kayıpları ve Isıl Başarımlar

Bu bölümde, Bölüm 3.1.2'de yapılan kıyaslamaya göre daha detaylı bir kıyas çalışması yapmak amaçlanmıştır. Bunun için Şekil 3.6'da verilen devre şemasının bir benzeri PLECS ortamında kurulmuştur. SiC MOSFET ve IGBT'li devrelerin şemaları ve bunların denetleyicisi ile sıcaklık ve enerji kayıplarının ölçüm bloklarının şemaları sırasıyla Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de verilmiştir. PLECS'in kullanım amacı yarı-iletkenler üzerinde oluşan kayıpları hesaplamak, bu kayıpların tasarımımızda kullandığımız soğutucular ile düzgün çalışabildiğini, ve uzun süreli ısıl değişimleri gözlemektir; buradan çıkacak sonuca göre tasarımımızı doğrulamak ve farklı yarı-iletken türleri için karşılaştırma yapmak amaçlanmıştır. Bu şemalar, sınır koşullar altında, ortam sıcaklığı  $T_A=40^{\circ}\text{C}$ , sürekli anma akımında (250 A) şarj ve deşarj altında çalıştırılmıştır. Bu çalışmada giriş veya çıkış gerilimlerinin denetimi yapılmamış, sadece akım denetimi yaparak süperkapasitör akımı sabit tutulmuş ve ısıl kayıpların sürekli en yüksek seviyede oluşturulması amaçlanmıştır.

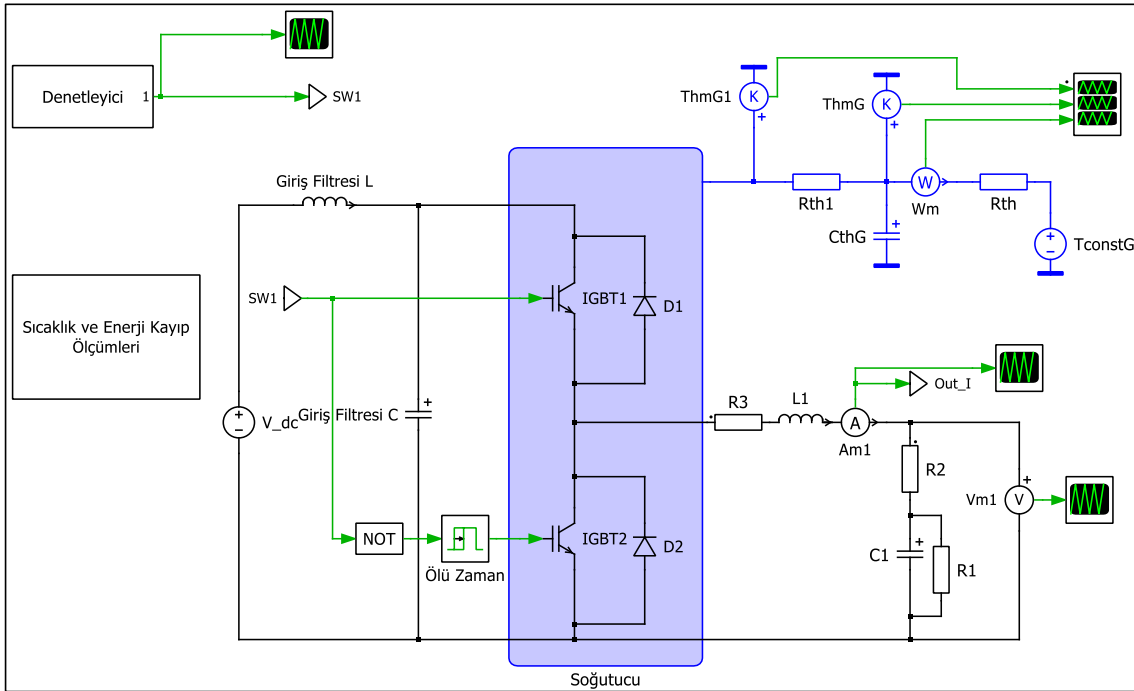
PLECS ortamındaki en büyük avantaj yarı-iletken üreticisi firmaların modülleri için kayıp ve ısıl değerlerinin PLECS modellerini vermeleridir. Bir diğer durum ise PLECS benzetim ortamında diğer benzetim ortamlarından farklı olarak ısıl direnç ve kapasitelerin tanımlanabilmesidir. Bu benzetimde firmaların verdiği modellerin yanında kullandığımız termal macun ve soğutucu plakanın ısıl direnç ve kapasite değerlerini firmaların veriföylerinden alınmış [83]; termal macunun ısıl direnci  $R_{TH,CS}=0.02 \text{ K/W}$ , soğutucu plakanın ısıl direnci  $R_{TH,SA}=0.018 \text{ K/W}$ , ısıl kapasitesi ise  $C_{TH,S}=800 \text{ J/K}$  olarak benzetime tanımlanmıştır.

250 A akım miktarı süperkapasitörün sürekli maruz kalacağı tepe değeridir. PLECS ortamında amaçlanan, 250 A akım değerinde SiC MOSFET ve IGBT üreticilerinin verdiği modeller üzerinden seçtiğimiz soğutucu plaka ile uzun süreli çalışmalarda eklem sıcaklıklarının hangi değerlere ulaşabileceğini hesaplamaktır. Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da görülen sırasıyla SiC MOSFET ve IGBT tabanlı benzetim modelleri, öncelikle indirici kipte, daha sonra yükseltici kipte çalıştırılmıştır. Bu benzetimlerden çıkan sonuçlar grafikleriyle birlikte

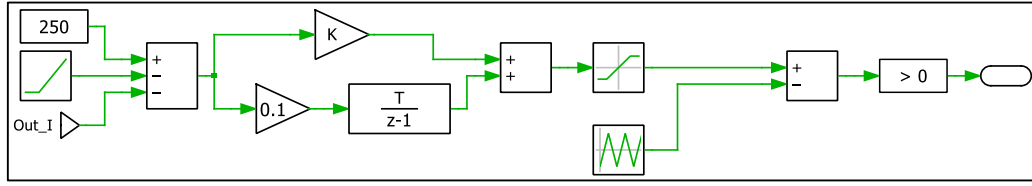
ayrıntılı olarak verilmiştir. Benzetim çalışmasında süperkapasitörün sürekli olarak en uzun süreyle çalışabileceği koşullar kullanılmış, buna göre anahtarlama elemanlarında oluşacak enerji kayıpları, paketlerin ve eklemlerin maruz kalacağı sıcaklıklar çıkarılmıştır.



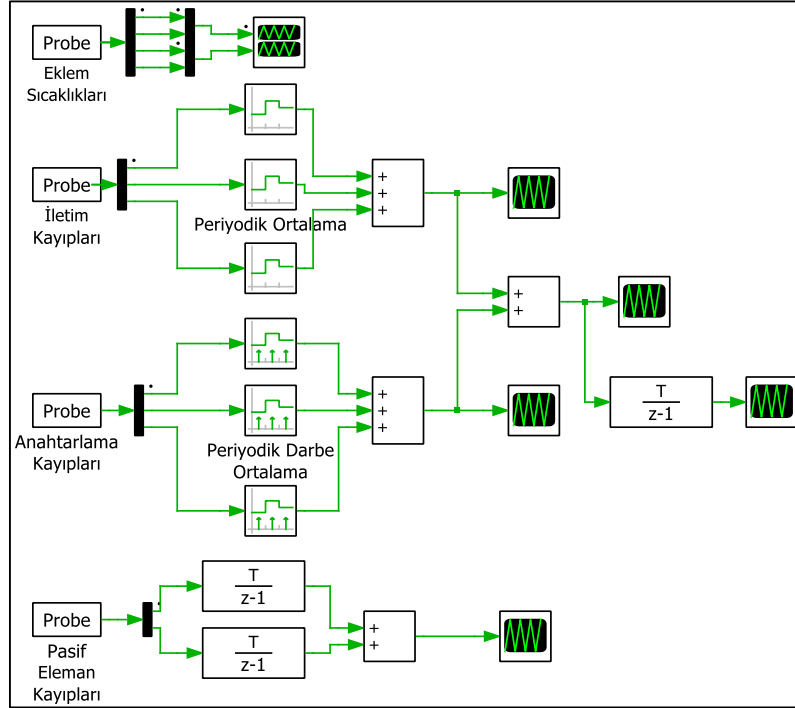
Şekil 3.15. SiC MOSFET Tabanlı Çevirgecin PLECS Ortamında Benzetim Şeması



Şekil 3.16. IGBT Tabanlı Çevirgecin PLECS Ortamında Benzetim Şeması



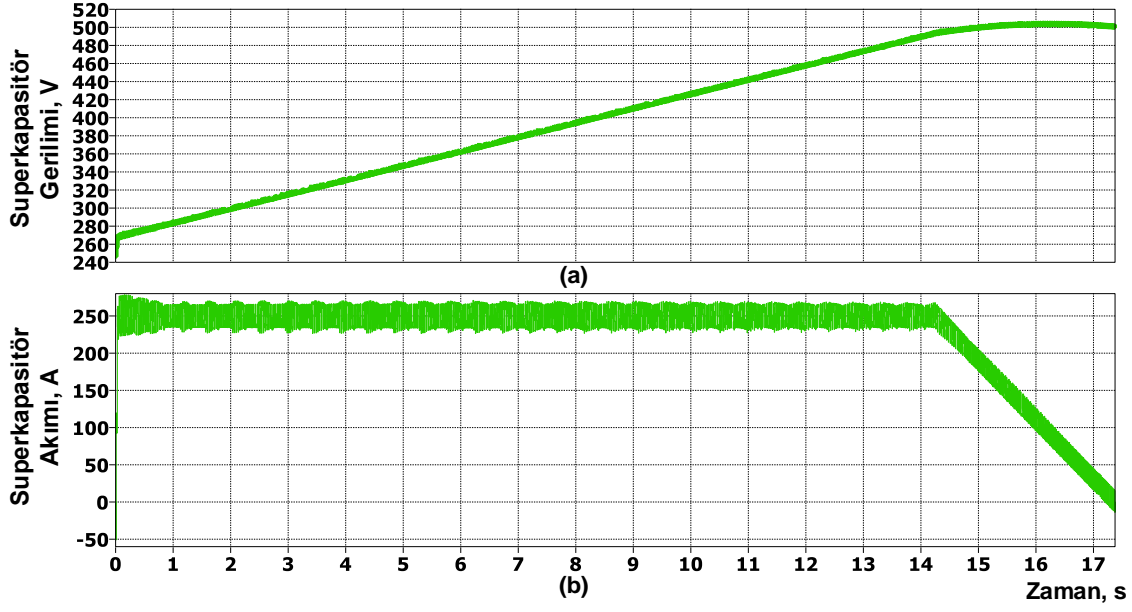
(a)



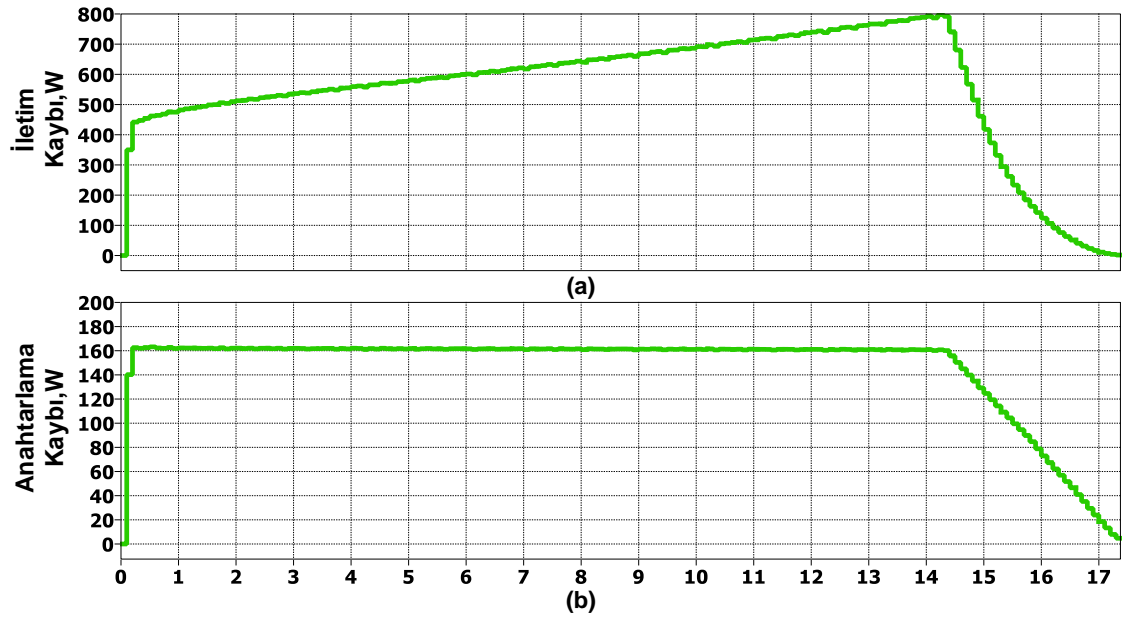
(b)

Şekil 3.17. PLECS (a) Denetim, (b) Sıcaklık ve Kayıp Ölçüm Şemaları

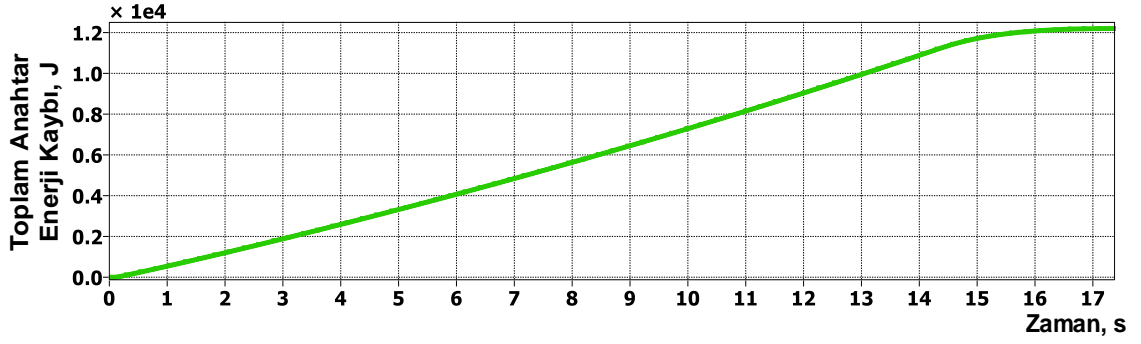
İlk benzetimde Şekil 3.15'teki SiC MOSFET tabanlı devre indirici kipte 10 kHz anahtarlama frekansında çalıştırılmıştır. Şekil 3.18'de görüldüğü üzere şarj akımı denetlenerek 250 A'de sabit tutulmuş ve süperkapasitör şarj (250 V → 500 V) edilmiştir. Bu akım değeriyle anahtarlar üzerinde oluşan iletim ve anahtarlama güç kayıpları sırasıyla Şekil 3.19 (a) ve (b)'de ve şarj esnasındaki toplam anahtar kaybı Şekil 3.20'de gösterilmiş ve tam yük şarjda yaklaşık 12 kJ olmuştur.



Şekil 3.18. PLECS Ortamında İndirici Kipte 250 A ile Şarj Esnasında (a) Gerilim ve (b) Akım Grafikleri

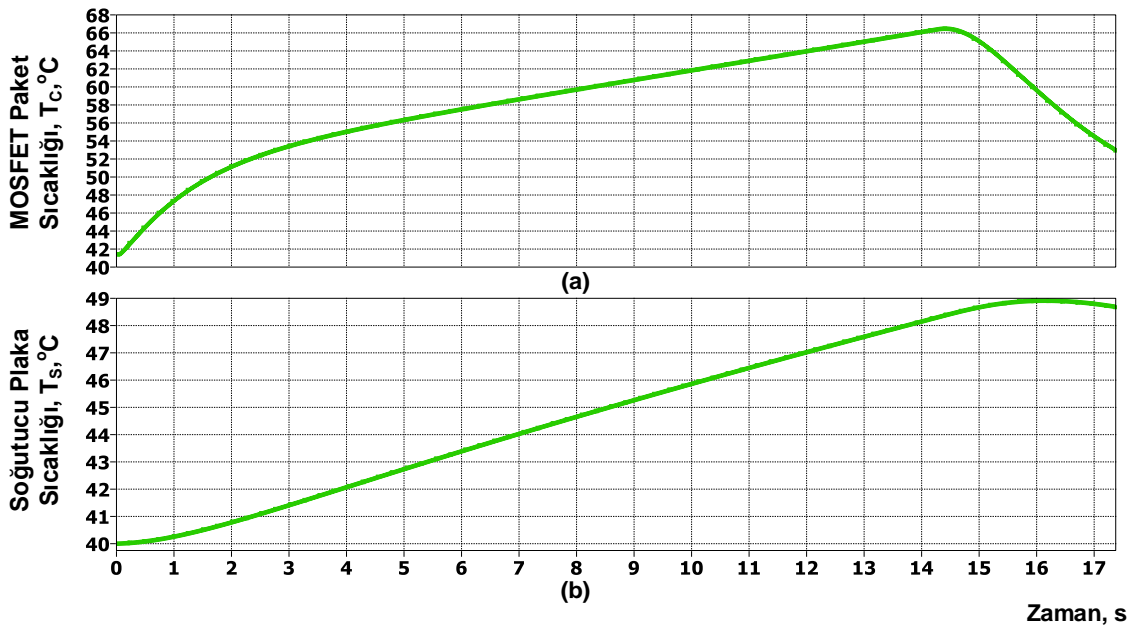


Şekil 3.19. PLECS Ortamında İndirici Kipte 250 A ile Şarj Esnasında (a) İletim ve (b) Anahtarlama Kayıpları



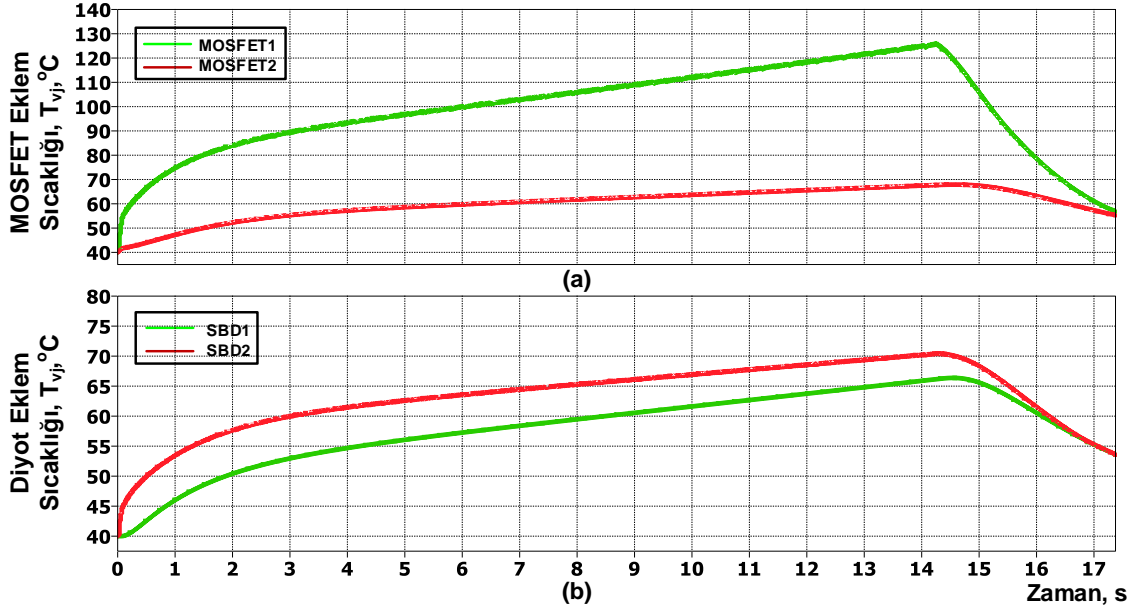
Şekil 3.20. PLECS Ortamında İndirici Kipte Anahtarların Toplam Enerji Kaybı

Bu enerji kaybı, modelde gerçek değerleri tanımlanan ısı direnç ve kapasiteler ile, MOSFET modülünün paketinde kullanılan taban malzemesine ve soğutucu plakaya akmaktadır. Şekil 3.21 (a) ve (b) ve Şekil 3.22 (a) ve (b)'de enerji kayıplarının sırasıyla MOSFET modülünün paketinde ve soğutucu plaka üzerinde ve bu sıcaklıklara ve ısı dirençlere bağlı MOSFET ve diyot eklemleri üzerinde oluşturduğu sıcaklık değişim grafikleri verilmiştir. Tüm sıcaklık değerleri başlangıçta ortam sıcaklığı olan  $T_A=40^\circ\text{C}$  sıcaklığında başlatılmış, böylece test koşullarında ve gerçekte olabilecek en zorlu sıcaklık koşulları benzetim ortamında modellenenmiştir. Bu sonuçlara göre oluşan azami sıcaklıkların soğutucu plakada  $T_S \approx 49^\circ\text{C}$ , modül tabanında  $T_C \approx 66.5^\circ\text{C}$ , en sıcak eklem sıcaklığı olan MOSFET 1'de ise yaklaşık  $T_{vj,max} \approx 125^\circ\text{C}$  olacağı ortaya çıkmıştır.



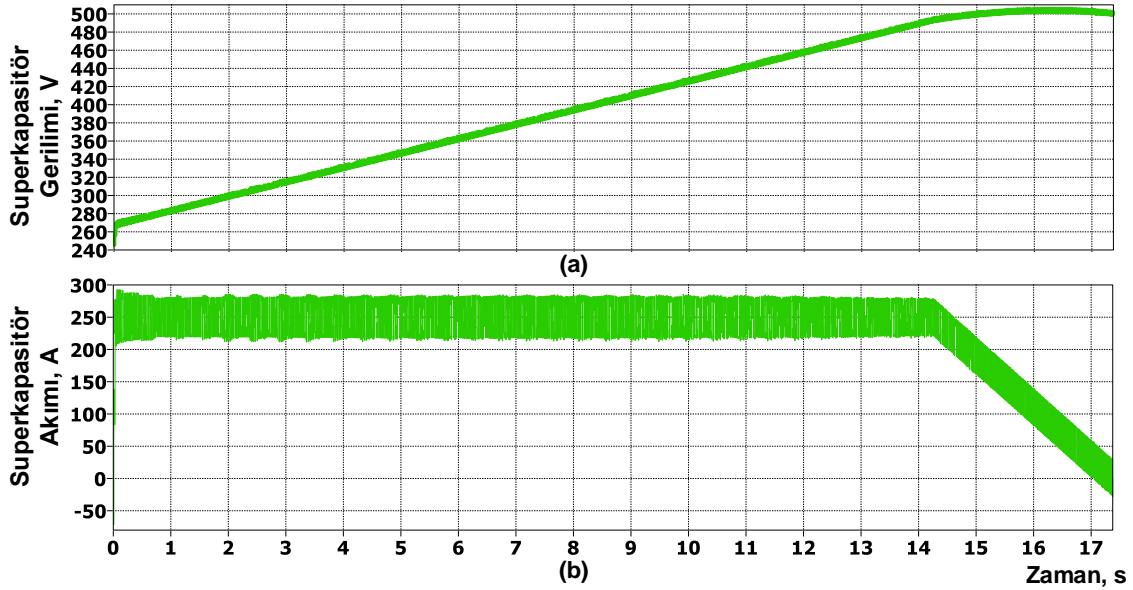
Şekil 3.21. PLECS Ortamında İndirici Kipte (a) MOSFET Paketinin ve (b) Soğutucu Plakanın Sıcaklık Değişim Grafiği





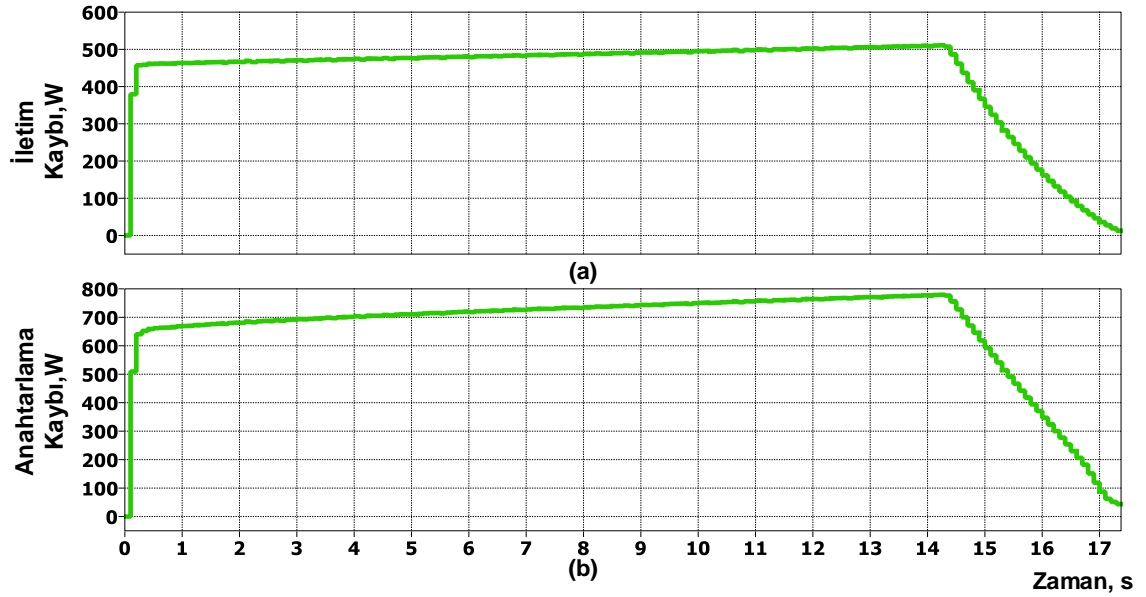
Şekil 3.22. PLECS Ortamında İndirici Kipte (a) Anahtarların ve (b) Diyotların Şarj Esnasında Oluşan Eklem Sıcaklıkları

İkinci benzetimde Şekil 3.16'daki IGBT anahtarların kullanıldığı devre 5 kHz anahtarlama frekansında indirici kipte çalıştırılmıştır. Şekil 3.23'te görüldüğü üzere şarj akımı denetlenerek 250 A'de sabit tutulmuş ve süperkapasitör şarj (250 V → 500 V) edilmiştir; IGBT ile şarj esnasında anahtarlama frekansı daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi 5 kHz ile sınırlı kalmış, bunun sonucu olarak akım dalgalanması iki katına çıkmıştır.

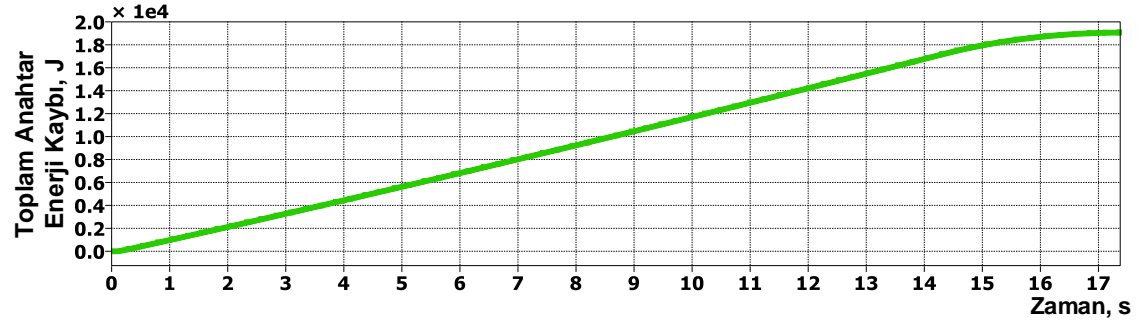


Şekil 3.23. IGBT Tabanlı Çevirgecin PLECS Ortamında İndirici Kipte 250 A ile Şarj Esnasında (a) Gerilim ve (b) Akım Grafikleri

Anahtarlar üzerinde oluşan iletim ve anahtarlama güç kayıpları sırasıyla Şekil 3.24 (a) ve (b)'de ve şarj esnasındaki toplam anahtar kaybı Şekil 3.25'te gösterilmiş ve tam yük şarjda yaklaşık 19 kJ olduğu grafikte görülmektedir.



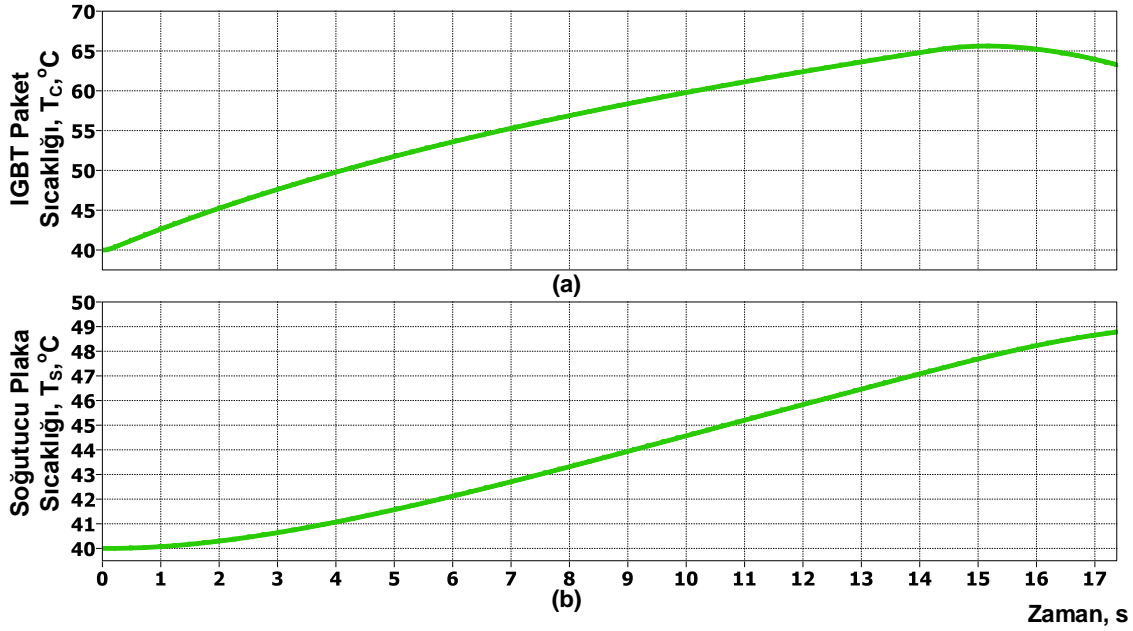
Şekil 3.24. PLECS Ortamında İndirici Kipte 250 A ile Şarj Esnasında (a) İletim ve (b) Anahtarlama Kayıpları



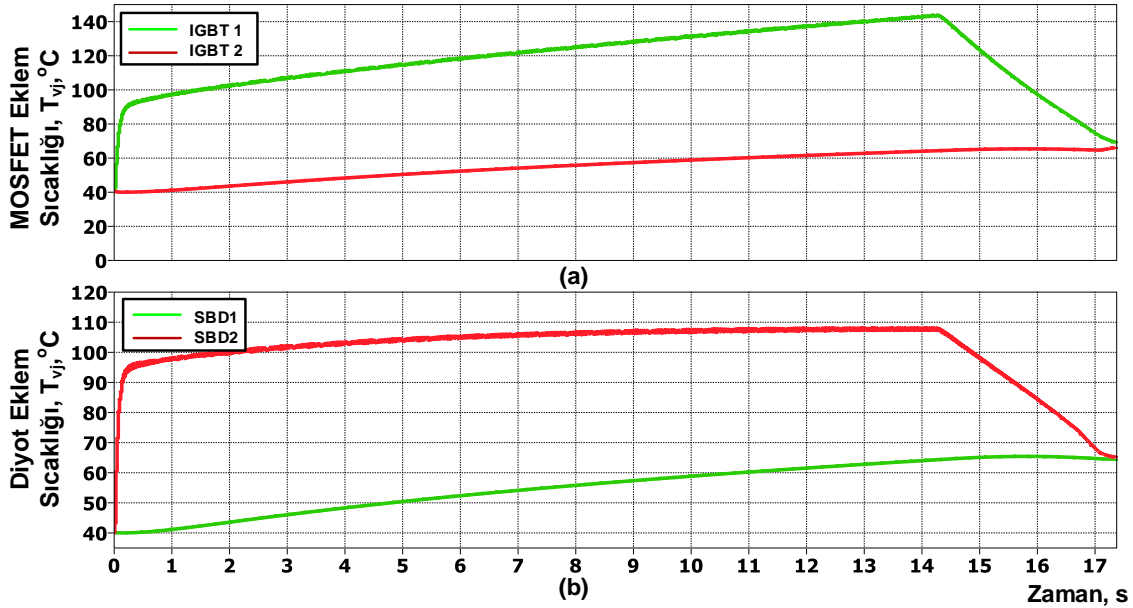
Şekil 3.25. PLECS Ortamında İndirici Kipte Anahtarların Toplam Enerji Kaybı

Bu enerji kaybı, IGBT modül modelinde gerçek değerleri tanımlanan ısı direnç ve kapasiteler ile, modülün paketinde kullanılan taban malzemesine ve soğutucu plakaya akmaktadır. Şekil 3.26 (a) ve (b) ve Şekil 3.27 (a) ve (b)'de enerji kayıplarının sırasıyla IGBT modülünün paketinde ve soğutucu plaka üzerinde ve bu sıcaklıklara ve ısı dirençlere bağlı IGBT ve diyot eklemleri üzerinde oluşturduğu sıcaklık değişim grafikleri verilmiştir. Tüm sıcaklık değerleri başlangıçta ortam sıcaklığı olan  $T_A=40^\circ\text{C}$  sıcaklığında başlatılmış, böylece test koşullarında ve gerçekte olabilecek en zorlu sıcaklık koşulları benzetim ortamında modellenebilmiştir. Bu sonuçlara göre oluşan azami sıcaklıkların

soğutucu plakada  $T_S \approx 49 \text{ }^\circ\text{C}$ , modül tabanında  $T_C \approx 66 \text{ }^\circ\text{C}$ , en sıcak eklem sıcaklığının IGBT 1'de yaklaşık  $T_{vj,max} \approx 143 \text{ }^\circ\text{C}$  olacağı gösterilmiştir.



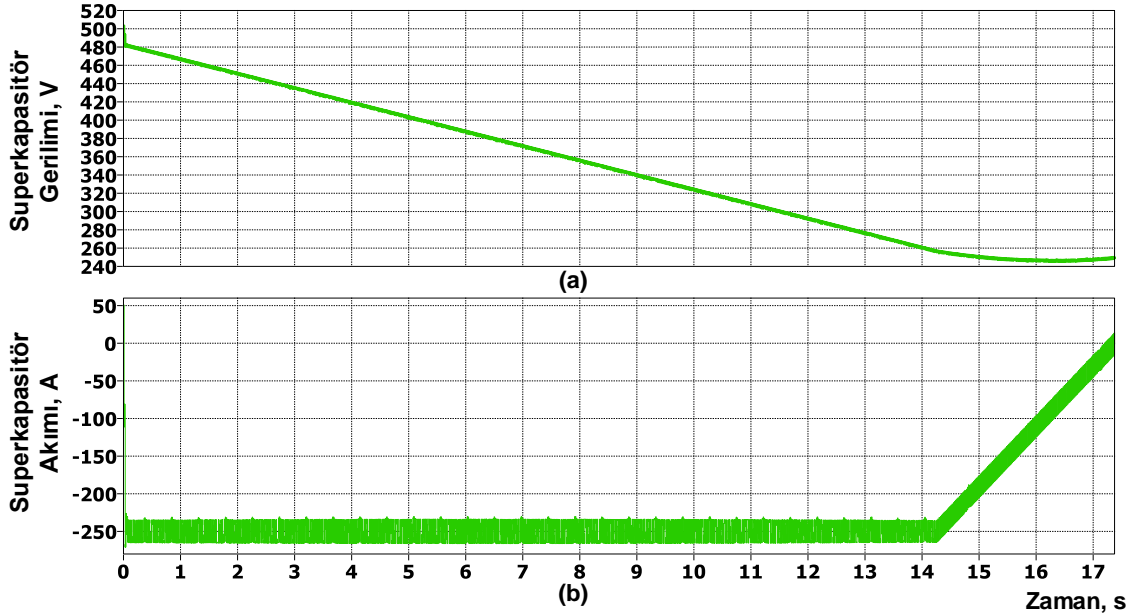
Şekil 3.26. PLECS Ortamında İndirici Kipte (a) IGBT Paketinin ve (b) Soğutucu Plakanın Sıcaklık Değişim Grafiği



Şekil 3.27. PLECS Ortamında İndirici Kipte (a) Anahtarların ve (b) Diyotların Şarj Esnasında Oluşan Eklem Sıcaklıkları

Yukarıda yapılan benzetim çalışmalarının benzerleri yükseltici çalışma kiplerinde de sırasıyla önce SiC MOSFET tabanlı (10 kHz anahtarlama frekansı), sonra IGBT tabanlı (5 kHz anahtarlama frekansı) çevirgeç için tekrarlanmıştır. Burada yine aynı yapı kullanılmış ve devre süperkapasitörden ana kaynağa enerji

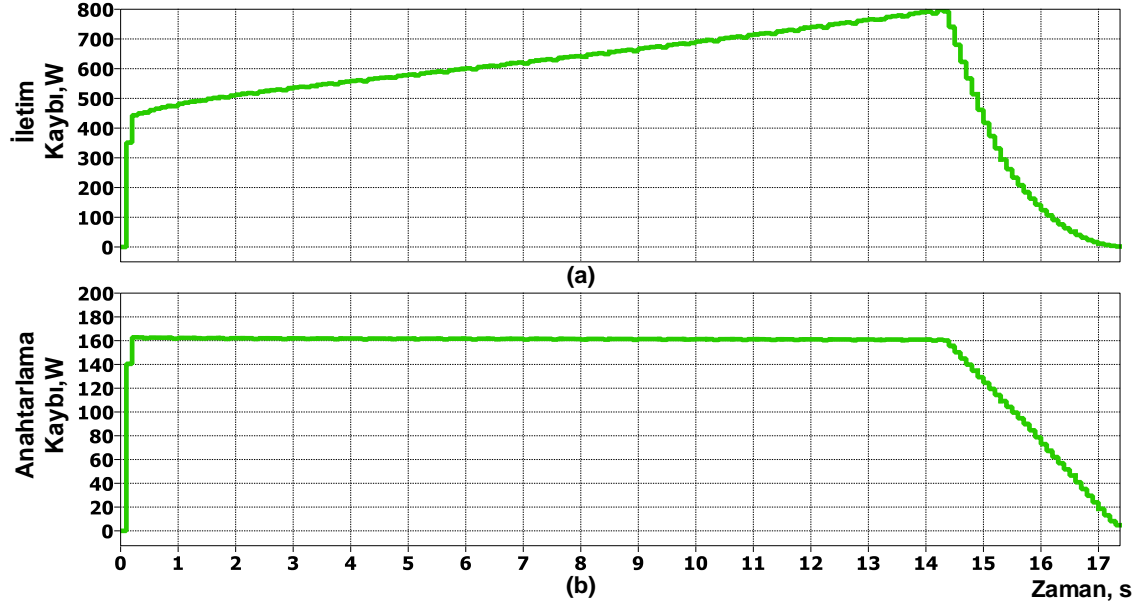
aktarmıştır. Süperkapasitör 250 A akımla deşarj (500 V → 250 V) edilmiştir. Şekil 3.15'te görülen SiC MOSFET tabanlı çevirgeç yükseltici kipte çalıştırılmıştır. Şekil 3.28 (b)'de görüldüğü üzere denetim ile 250 A akım sabit tutulmuş Şekil 3.28 (a)'da gösterilen deşarj grafiğı elde edilmiştir.



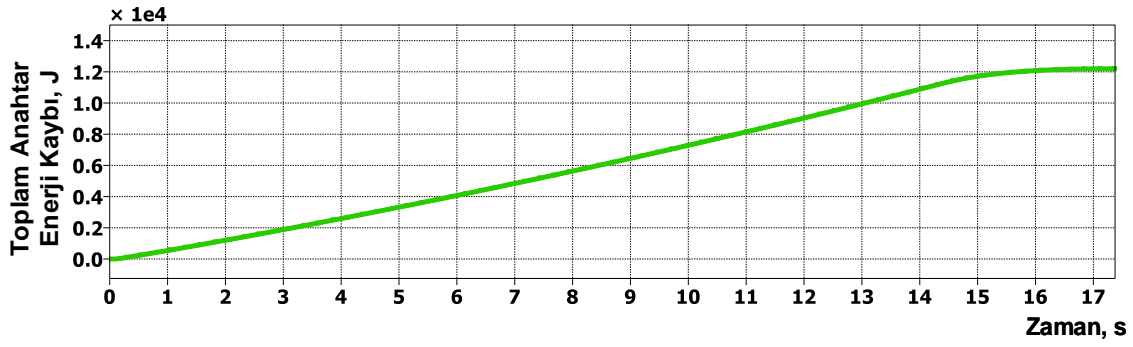
Şekil 3.28. SiC MOSFET Tabanlı Çevirgecin PLECS Ortamında İndirici Kipte 250 A ile Şarj Esnasında (a) Gerilim ve (b) Akım Grafikleri

Anahtarlar üzerinde oluşan iletim ve anahtarlama güç kayıpları sırasıyla Şekil 3.29 (a) ve (b)'de verilmiştir. Deşarj boyunca oluşan toplam enerji kaybı ise Şekil 3.30'da gösterilmiştir; toplam enerji kaybının tam yük deşarjda indirici kipteki duruma benzer şekilde yaklaşık 12 kJ olduğu hesaplanmıştır.

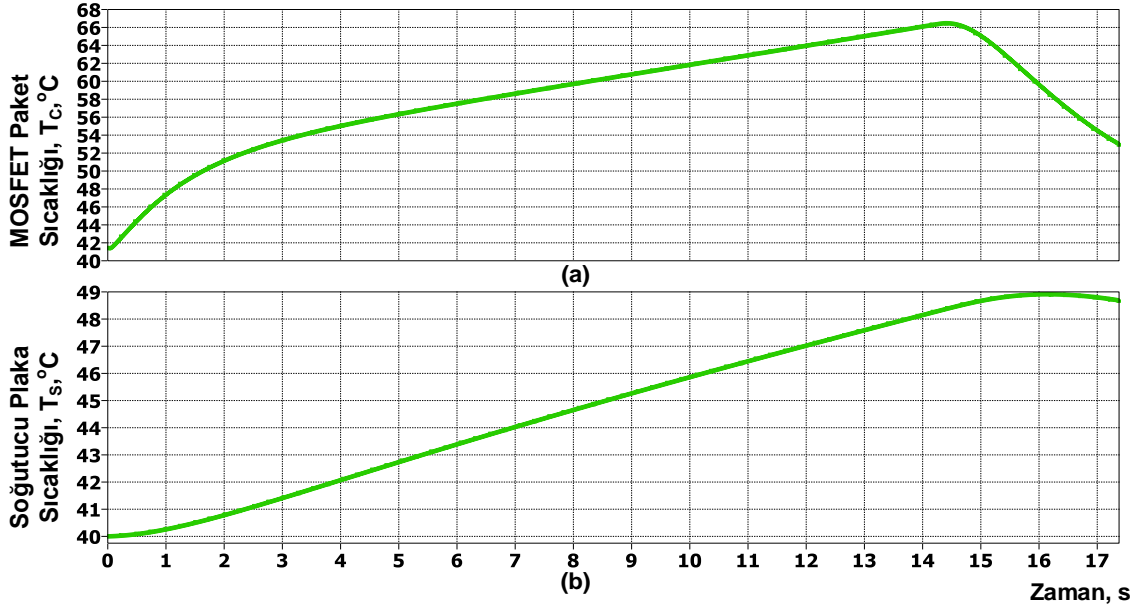
Enerji kaybının MOSFET modül modelindeki değerler ile birlikte modül tabanında ve soğutucu plakada oluşturduğu yüzey sıcaklıkları Şekil 3.31 (a) ve (b)'de verilmiş, bu değerler de soğutucu plakada  $T_S \approx 49 \text{ }^\circ\text{C}$ , modül tabanında  $T_C \approx 66 \text{ }^\circ\text{C}$  olmuş ve indirici kipte çalışan çevirgeç ile yaklaşık eşit çıkmıştır. Şekil 3.32 (a) ve (b)'de ise modül içerisindeki MOSFET ve diyotların sıcaklıkları verilmiş, bu değerlerde de indirici çevirgeçten farklı olarak ters anahtarların ve diyotların sıcaklıklarının benzer çıktığı görülmektedir. Yükseltici kip benzetiminin sonucunda da indirici kiptekine ters olarak en sıcak eklem noktası MOSFET 2'de oluşacağı, sıcaklık değerinin ise yaklaşık  $T_{vj,max} \approx 125 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ulaşacağı gösterilmiştir.



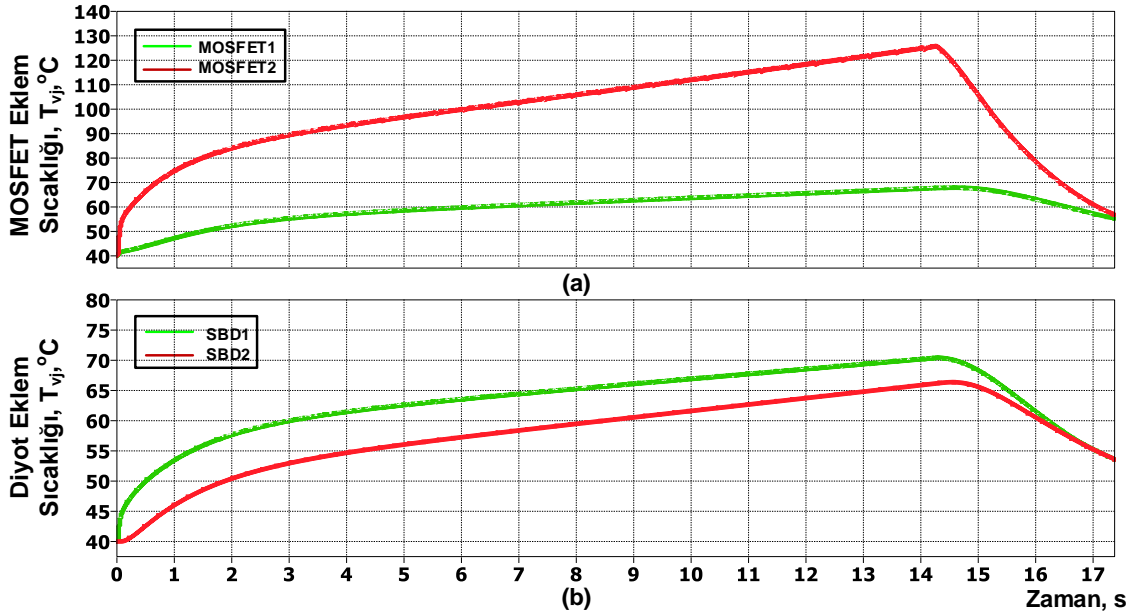
Şekil 3.29. PLECS Ortamında Yükseltici Kipte 250 A ile Şarj Esnasında (a) İletim ve (b) Anahtarlama Kayırları



Şekil 3.30. PLECS Ortamında Yükseltici Kipte Anahtarların Toplam Enerji Kaybı



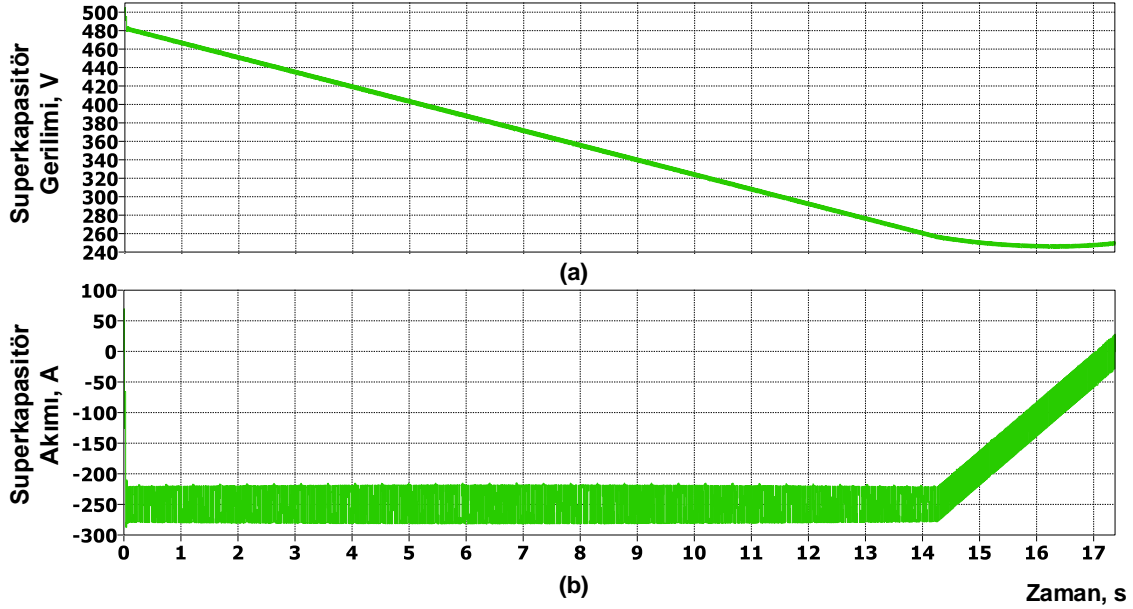
Şekil 3.31. PLECS Ortamında Yükseltici Kipte (a) MOSFET Paketinin ve (b) Soğutucu Plakanın Sıcaklık Değişim Grafiği



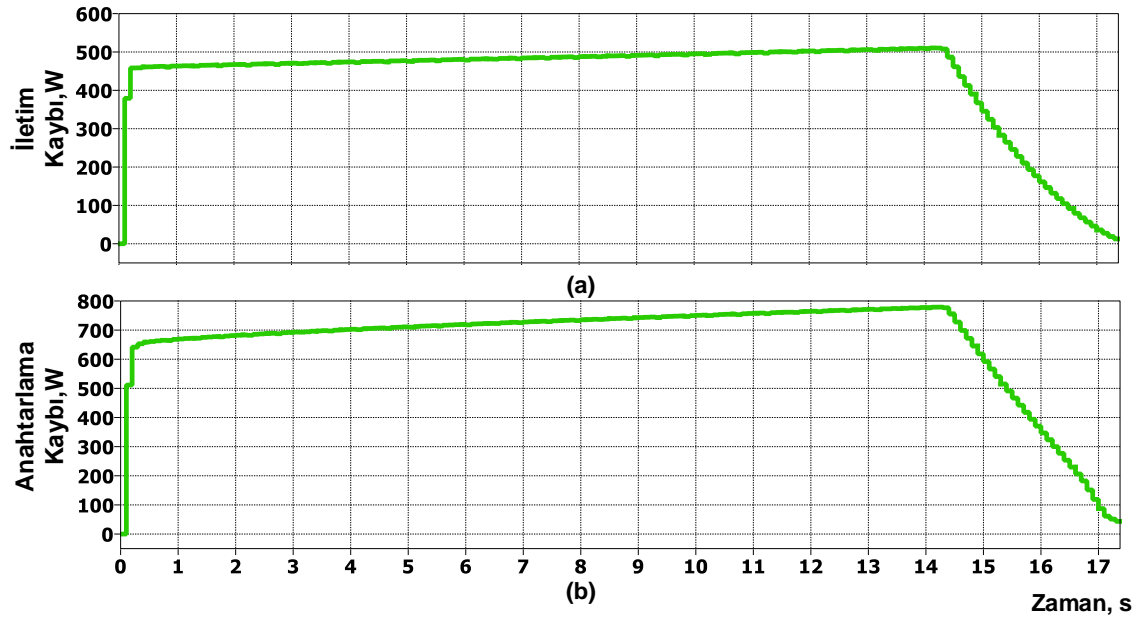
Şekil 3.32. PLECS Ortamında Yükseltici Kipte (a) Anahtarların ve (b) Diyotların Şarj Esnasında Oluşan Eklem Sıcaklıkları

Son olarak Şekil 3.16'da görülen IGBT tabanlı çevirgeç yükseltici kipte çalıştırılmıştır. Şekil 3.33 (a)'da gösterilen deşarj rejimini oluşturmak için Şekil 3.33 (b)'de görülen şekilde sabit akım denetimi ile 250 A akım ile deşarj yapılmıştır.

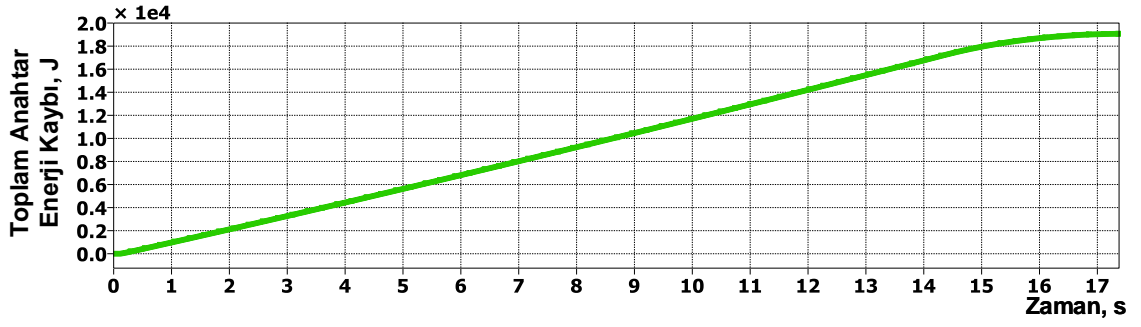
Anahtarlar üzerinde oluşan iletim ve anahtarlama güç kayıpları sırasıyla Şekil 3.34 (a) ve (b)'de verilmiştir. Bu anahtarların deşarj süresi boyunca toplam enerji kayıpları ise Şekil 3.35'te gösterilmiş ve toplam anahtar kaybının tam yük deşarjda indirici kipteki durumdaki gibi yaklaşık 12 kJ olduğu hesaplatılmıştır.



Şekil 3.33. IGBT Tabanlı Çevirgecin PLECS Ortamında İndirici Kipte 250 A ile Şarj Esnasında (a) Gerilim ve (b) Akım Grafikleri

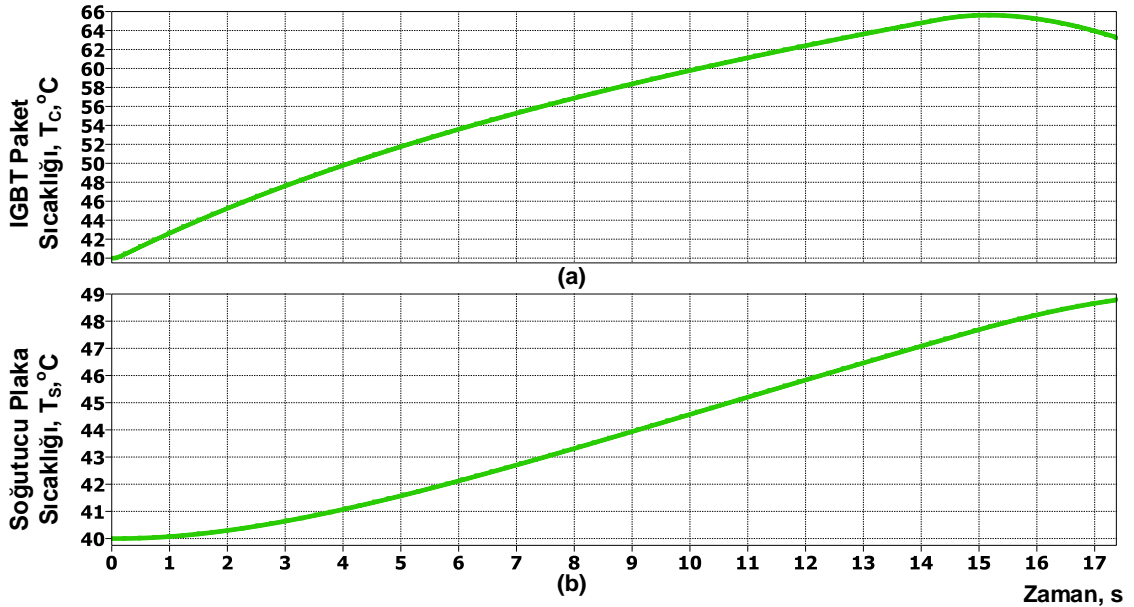


Şekil 3.34. PLECS Ortamında Yükseltici Kipte 250 A ile Şarj Esnasında (a) İletim ve (b) Anahtarlama Kayıpları



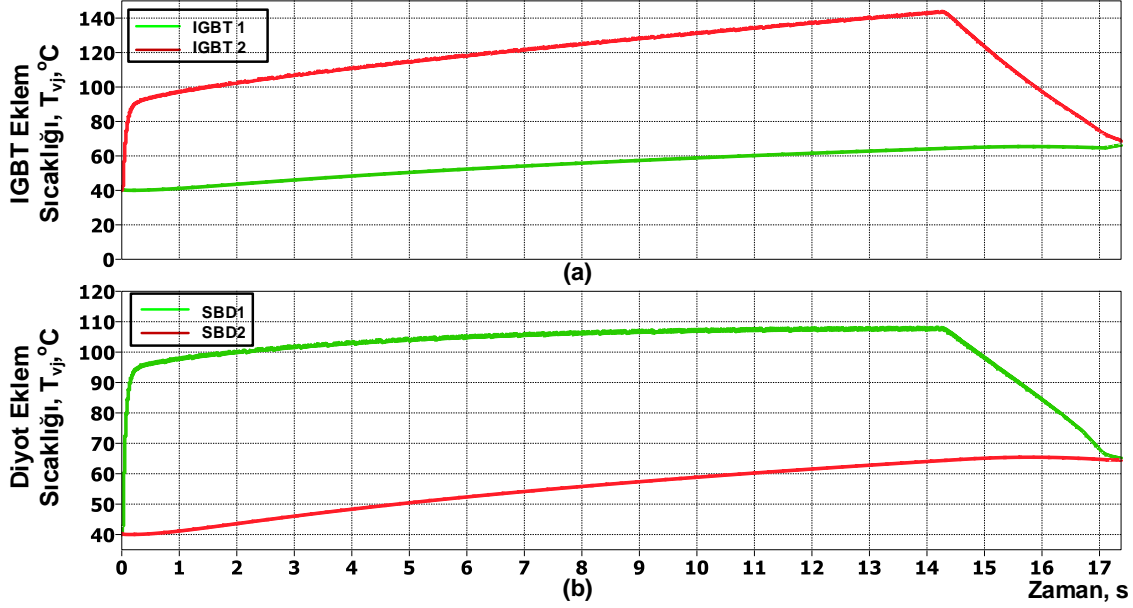
Şekil 3.35. PLECS Ortamında Yükseltici Kipte Anahtarların Toplam Enerji Kaybı

Enerji kaybının IGBT modül modelindeki değerler ile birlikte modül tabanında ve soğutucu plakada oluşturduğu yüzey sıcaklıkları Şekil 3.36 (a) ve (b)'de verilmiş, bu değerler ise soğutucu plakada  $T_s \approx 49 \text{ }^\circ\text{C}$ , modül tabanında  $T_c \approx 66 \text{ }^\circ\text{C}$  olmuş ve diğer tüm durumlardaki çalışmalar ile yaklaşık eşit çıkmıştır. Şekil 3.37 (a) ve (b)'de ise modül içerisindeki IGBT ve diyotların sıcaklıkları verilmiş, bu değerlerde de indirici çevirgeçten farklı olarak ters anahtarların ve diyotların sıcaklıklarının benzer çıktığı görülmektedir. Yükseltici kip benzetiminin sonucunda da indirici kiptekine ters olarak en sıcak eklem noktasının IGBT 2'de oluşacağı, sıcaklık değerinin ise yaklaşık  $T_{vj,max} \approx 143 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ulaşacağı gösterilmiştir.



Şekil 3.36. PLECS Ortamında Yükseltici Kipte (a) IGBT Paketinin ve (b) Soğutucu Plakanın Sıcaklık Değişim Grafiği





Şekil 3.37. PLECS Ortamında Yükseltici Kipte (a) Anahtarların ve (b) Diyotların Şarj Esnasında Oluşan Eklem Sıcaklıkları

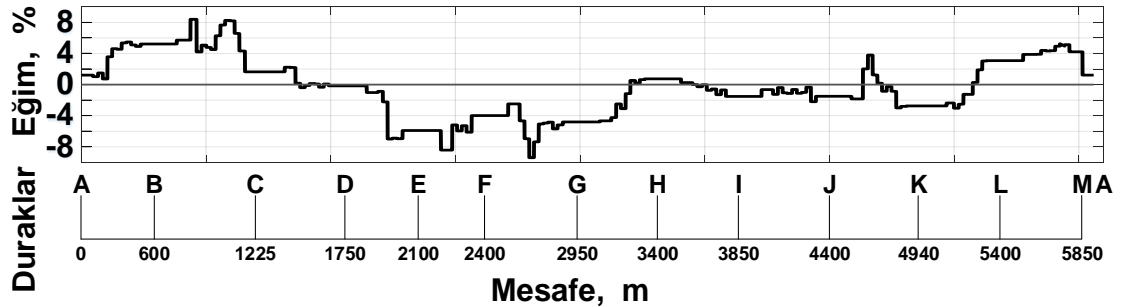
Bu benzetimler sonucunda her iki çalışma kipinde de IGBT kullanımında anahtarların eklemi 143 °C civarına yükselmektedir. IGBT'lerin eklem sıcaklığının sınır değer olan 150 °C'ye çok yakın sıcaklıklara çıkabileceği görülmektedir. SiC MOSFET kullanımında ise bu değerler 125 °C'de kalmakta ve sınır değerden uzak kalmaktadır. Burada önemsenmesi gereken diğer husus ise sürekli çalışmada SiC MOSFET kullanımında IGBT kullanımına göre anahtarın eklem sıcaklıklarının değişim miktarıdır. Yarı-iletkenlerin, özellikle modül tabanlı yarı-iletkenlerin sıcaklık değişimleri kullanım ömürleri açısından ciddi bir önem teşkil etmekte, sıcaklık değişimi arttıkça özellikle paket ile çipin değişik genişleme katsayılarından dolayı kullanım ömrü sıcaklık değişimiyle ters orantılı olarak azamaktadır [84].

Bu çalışmadan başka bir çıkarım da SiC MOSFET kullanımında enerji veriminin çok az da olsa daha yüksek olmasıdır. Bu verimin yanında anahtarlama frekansının da yüksek olması sistemin çıkış filtresindeki reaktörün ses frekansını arttırmakta ve genliğini azaltmaktadır. Bununla birlikte yüksek frekans anahtarlama ile oluşacak düşük akım dalgalanması süperkapasitörün kullanım ömrünün daha uzun olacağını göstermektedir [85].

### 3.2.3 Süperkapasitör Depolama Sisteminin Gerçeğe Yakın Bir Motor Sürücü ve Katener Hattı ile Bağlanmasının Benzetimleri

Benzetim çalışmaları, daha sonraki aşamalarda tüm sistemlerin gerçeğe yakın modelleri ile bir araya getirildiği şekilde yürütülmeye devam etmiştir. MATLAB/Simulink benzetim ortamında kurulu olan ve Bölüm **Error! Reference source not found.**'de detaylarıyla verilen Şekil 6.1'deki cer sürücüsü ve cer motoru ile Şekil 6.2'deki raylı sistemlerin bir çoğunda güç çevrim istasyonunda kurulu olan 12-darbeli, 3 faz diyot köprü doğrultucu ve Şekil 6.3'te gösterilen süperkapasitör enerji depolama sistemi (EDS) bloklar halinde birbirine bağlanmıştır. Süperkapasitör EDS, Şekil 6.4'te görülen denetim şeması ile şarj veya deşarj modları ve gerilim seviyeleri açısından denetlenmektedir.

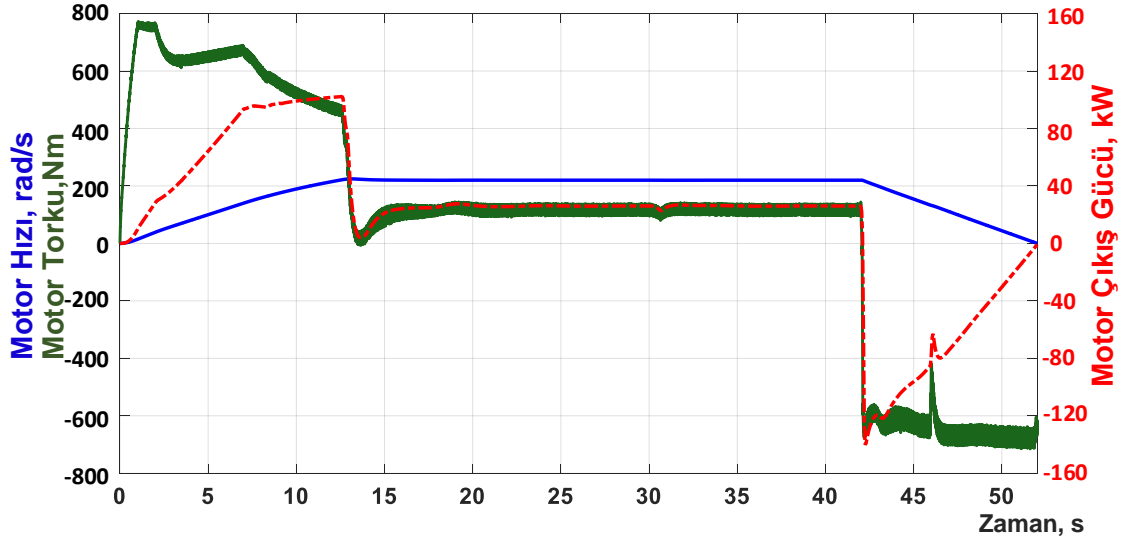
Bu karşılaştırmayı yapmak için tüm benzetim ve laboratuvar çalışmalarında gerçekte var olan ve Çizelge 2.2 'de tariflenen parkurun eğim bilgileri kullanılmıştır. Bu parkur 5850 m uzunluğunda ve en fazla % 8.5 eğime sahiptir. Parkurun konuma göre eğimleri Şekil 3.38'de verilmiştir.



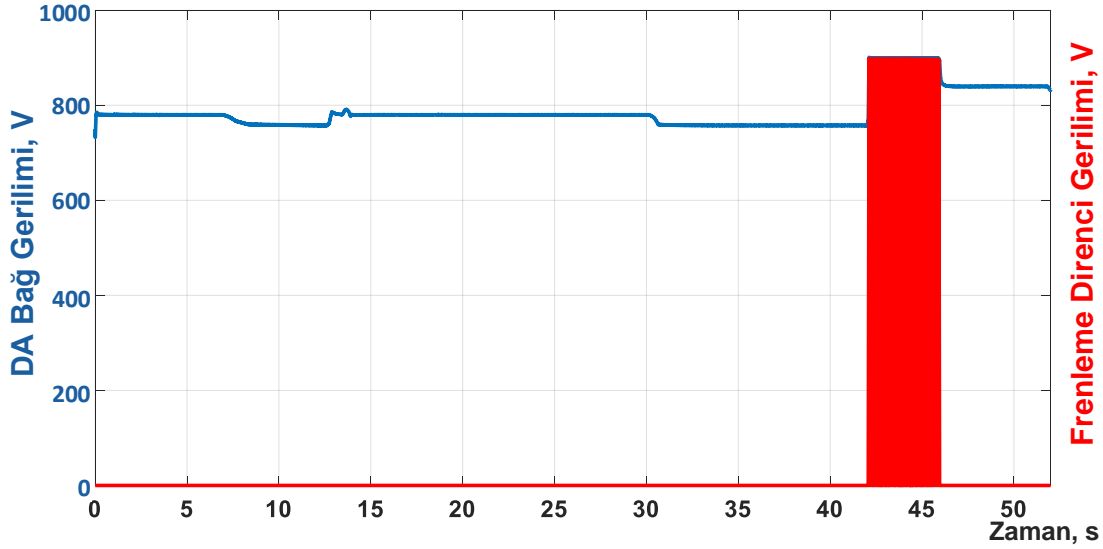
Şekil 3.38. Gerçek Bir Parkurun Durakları Arası Mesafeleri ve Eğim Değerleri

Benzetimi yapılan 550 m'lik yol Şekil 3.38'de verilen parkurun I ve J durakları arasındadır. Bu benzetimin sonuçları sırasıyla zamana karşı gidilen yol ve bunlarla birlikte cer motorunun ürettiği tork ve motor hızı Şekil 3.39'da, cer motorunun gücü ve buna bağlı olarak DA bağ ve frenleme direncindeki gerilim Şekil 3.40'ta, katener beslemesinden ve süperkapasitörden sisteme verilen güç miktarı, bununla birlikte motor sürücünün girişinde harcadığı güç; yine motor sürücünün girişinde üretilen güç ve süperkapasitörün sistemden aldığı güç miktarları Şekil

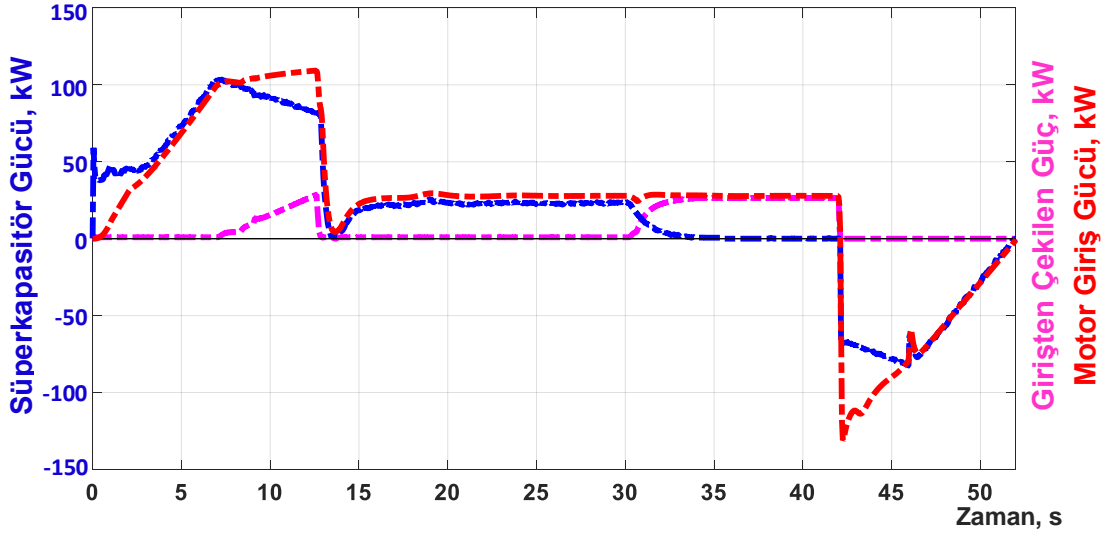
3.41'de, süperkapasitör üzerinde oluşan gerilim ve akım ise Şekil 3.42'de verilmiştir.



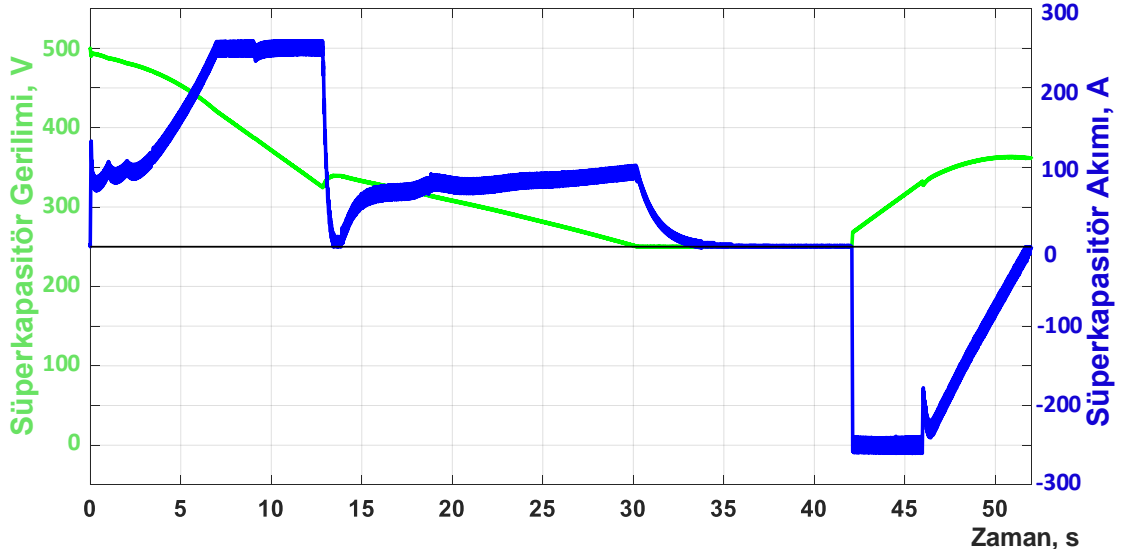
Şekil 3.39. Örnek Parkur için I ve J Durakları Arası Benzetimi Yapılan Motorun Hızı, Ürettiği Tork ve Çıkış Gücü



Şekil 3.40. Yol Boyunca Değişen DA-Bağ Gerilimi ve Frenleme Direnci Kıyıcısı Tarafından Oluşturulan Anahtarlamalı Gerilimi



Şekil 3.41. Sistemin Süperkapasitör Gücü, Katener Gücü ve Motorun Giriş Gücü



Şekil 3.42. I ve J Durakları arası Süperkapasitör Gerilim ve Akım Değişimi

Grafiklerden anlaşılacağı üzere normal bir frenleme esnasında DA bağ geriliminin belirli bir gerilime kadar yükselmesine izin verilmektedir. Süperkapasitör EDS çok düşük bir gerilim oynamasında devreye girmekte ancak özellikle Şekil 3.40'ta görüldüğü üzere gerilimin 900 V üzerine çıkmasına izin verilmemektedir. 900 V değerinin üzerine çıktığında frenleme direncini kontrol eden kıyıcı devreye girmektedir.

Bu grafiklerden hesaplanan enerji tüketim ve üretim sonuçları şöyledir:

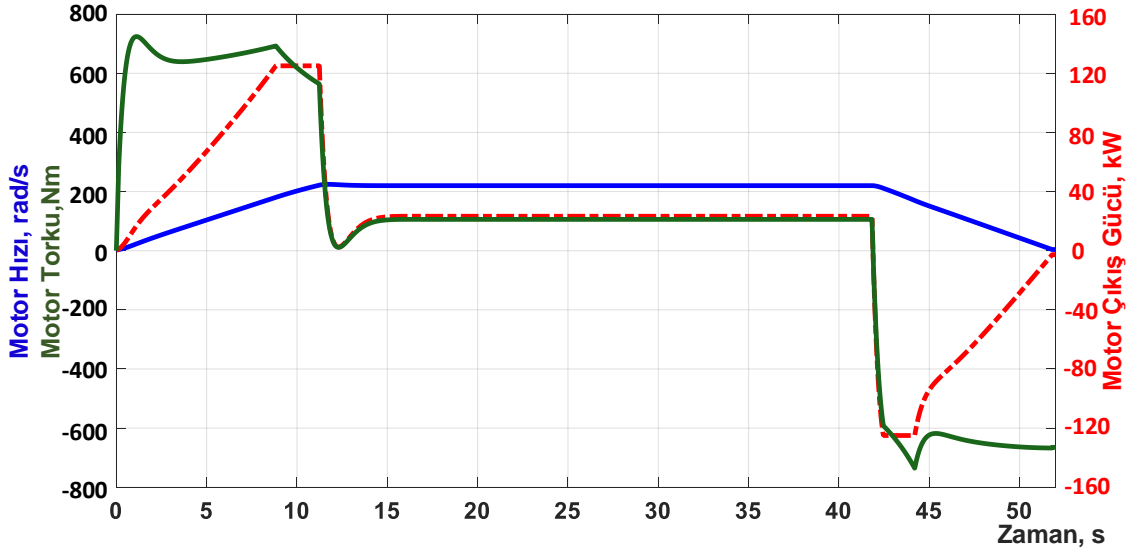
- Diyot köprü (katener hattından) çekilen enerji : ~395 kJ
- Süperkapasitör tarafından sağlanan enerji : ~1350 kJ

- Motor tarafından tüketilen enerji (elektriksel) : ~1731 kJ
- Motor tarafından üretilen frenleme enerjisi (elektriksel) : ~640 kJ
- Süperkapasitör tarafından depolanan enerji : ~535 kJ
- Frenleme direncinde harcanan enerji: ~98 kJ
- Süperkapasitör son gerilimi: ~361 V

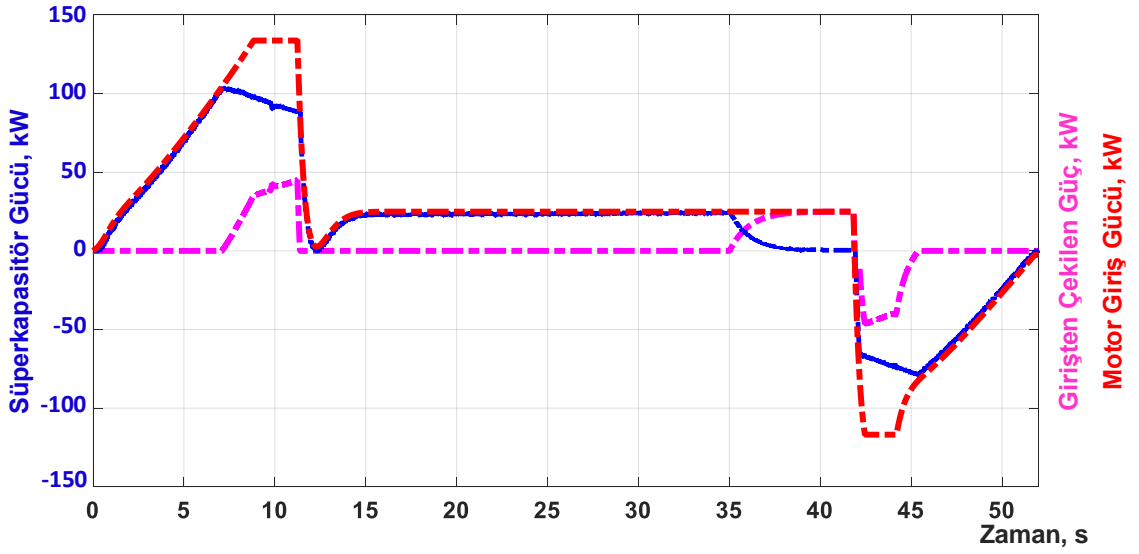
Bu grafiklerden hesaplanan sonuca göre 550 m'lik düz bir yolda toplam enerji geri kazanımı yaklaşık 533 kJ olmuştur. Bu verilerle, sürüş esnasında tasarruf yüzdesi ise yaklaşık % 30.7 olarak hesaplanmaktadır. Burada yapılan benzetimde eğim tüm hat boyunca %0 olarak alınmış ve sürtünme kuvvetleri ise Bölüm 2.6.2'deki değerler kullanılarak benzetime işlenmiştir.

Benzetim çalışmalarını laborotavar sistemine uyarlamak ve motor sürücüsü benzetiminin getirdiği yavaşlığı ortadan kaldırmak amacıyla, diyot doğrultucu kontrollü bir gerilim kaynağı ile, motor sürücü modeli ise matematiksel bir model ile değiştirilmiştir. Laboratuvarda kurulu sisteme ve alınacak ölçümlere daha uygun bir yapı haline getirilmiştir. Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te gösterilen devre şemaları Şekil 6.5'e, Şekil 6.1'de gösterilen devre şeması ise Şekil 6.6'ya sadeleştirilmiştir. Bu sayede denetlenen blok sayısı azaltılmış ve benzetim hızlandırılmıştır.

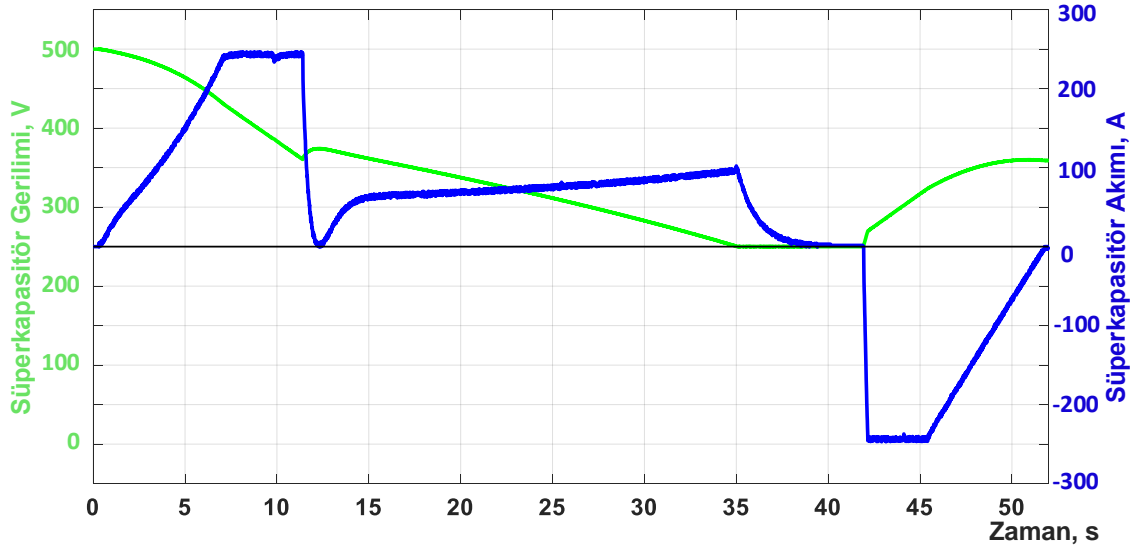
Önceki benzetime çok yakın sonuçlar elde edilmiş, bu benzetimin sonuçları ise daha önceki sonuçların sırasıyla Şekil 3.43, Şekil 3.44 ve Şekil 3.45'te verilmiştir.



Şekil 3.43. 550 m'lik Eğimsiz Yolda Motor Modeli Benzetiminde Motorun Hız ve Ürettiği Tork Modelleri ve Motor Çıkış Gücü



Şekil 3.44. Sistemin Katener ve Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü



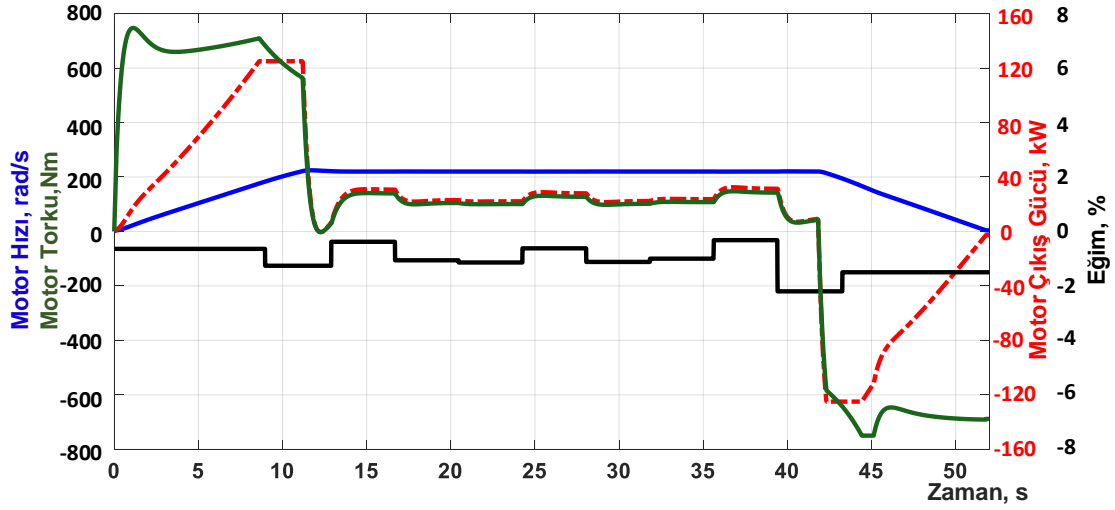
Şekil 3.45. 550 m'lik Eğimsiz Yol için Süperkapasitör Gerilim ve Akım Değişimi

Bu grafiklerden hesaplanan enerji tüketim ve üretim sonuçları şöyledir:

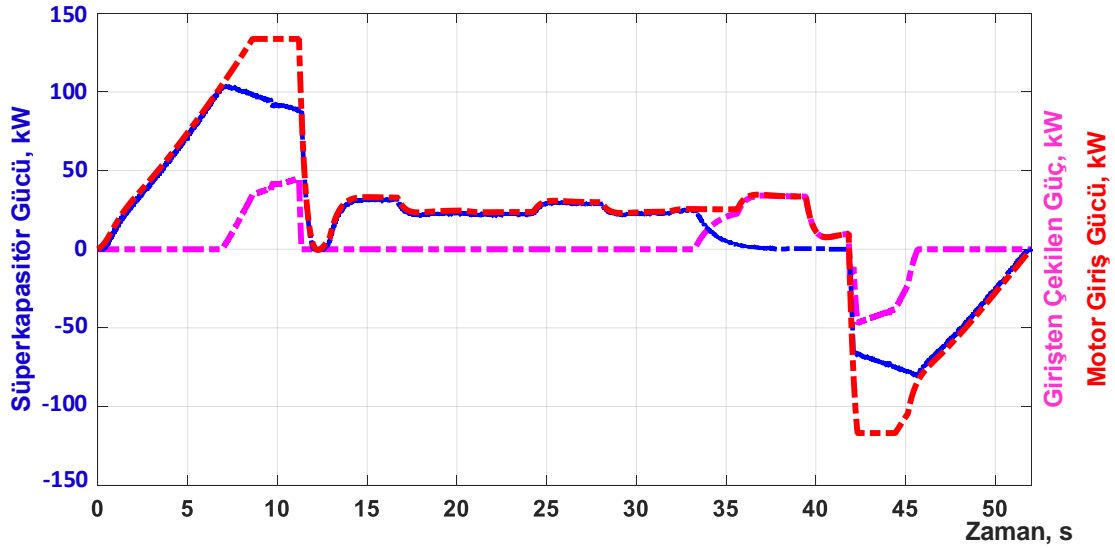
- Güç Kaynağından (katener hattı) çekilen enerji : ~305 kJ
- Süperkapasitör tarafından sağlanan enerji : ~1350 kJ
- Motor tarafından tüketilen enerji (elektriksel) : ~1650 kJ
- Motor tarafından üretilen frenleme enerjisi (elektriksel) : ~642 kJ
- Süperkapasitör tarafından depolanan enerji : ~525 kJ
- Güç Kaynağına (katener hattı) verilen enerji : ~110 kJ
- Süperkapasitör son gerilimi: ~360 V

Grafiklerden anlaşılacağı üzere motor sürücünün kendisi ile yapılan benzetim ile motor sürücünün ve güç kaynağının basit modelinin olduğu benzetim sonuçlarının çok benzer olduğu görülmektedir. Bu benzetim çalışmasında elde edilen veriler yaklaşık %0 eğimli bir hafif raylı araca uygulandığında çok yakın veriler elde edilecektir.

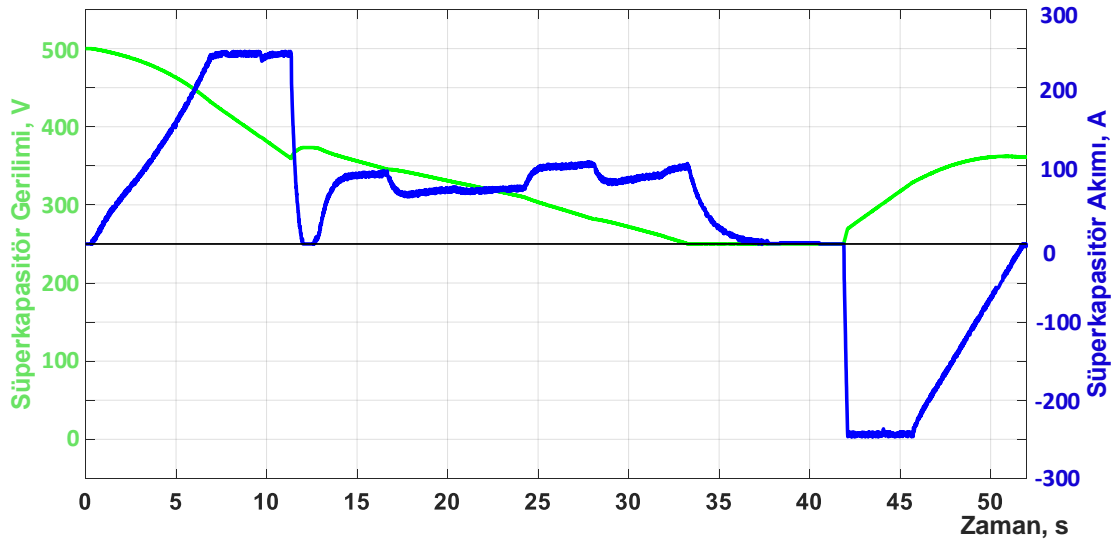
Bu benzetim çalışmasının farklı eğim profili altında aynı model üzerinde çalışması yapılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları ise yine sırasıyla Şekil 3.46, Şekil 3.47 ve Şekil 3.48'de verilmiştir.



Şekil 3.46. I ve J Durakları arası Motor Modeli Benzetiminde Motorun Hız ve Ürettiği Tork Modelleri, Motor Çıkış Gücü ve Eğim Verisi



Şekil 3.47. Sistemin Katener ve Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü



Şekil 3.48. I ve J Durakları arasında Süperkapasitör Gerilimi ve Akımı Değişimi



Bu grafiklerden hesaplanan enerji tüketim ve üretim sonuçları ise şöyledir:

- Güç Kaynağından (katener hattı) çekilen enerji : ~285 kJ
- Süperkapasitör tarafından sağlanan enerji : ~1350 kJ
- Motor tarafından tüketilen enerji (elektriksel) : ~1630 kJ
- Motor tarafından üretilen frenleme enerjisi (elektriksel) : ~677 kJ
- Süperkapasitör tarafından depolanan enerji : ~535 kJ
- Güç Kaynağına (katener hattı) verilen enerji : ~135 kJ
- Süperkapasitör son gerilimi: ~361 V

Şekil 3.46'da görülen eğim profiline bakıldığında eğimin sürekli olarak negatif olduğu görülmektedir. Yukarıdaki sonuçları gözden geçirdiğimizde eğimin negatif olmasının frenleme enerjisinin daha fazla olmasına yol açtığını görmekteyiz. Sonuç olarak eğimin negatif olduğu yolda daha fazla enerji depolanması söz konusu olmaktadır. Burada enerji tasarrufu %32.8 çıkmaktadır.

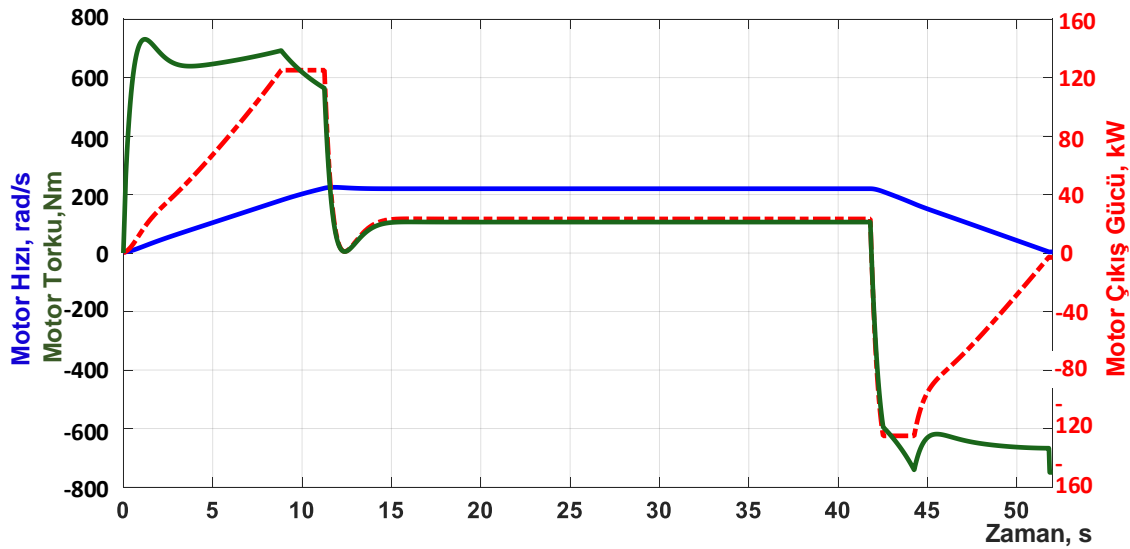
### **3.2.4 Süperkapasitör Başlangıç Gerilimi Optimizasyonu Benzetim Sonuçları**

Bölüm 3.2.3'te yapılan benzetim çalışmasında süperkapasitör kullanımıyla herhangi ekstra yöntem kullanmadan ne kadar tasarruf edilebileceği gösterilmiştir. Yine motorun dönüş hızının 220 rad/s, frenleme başlangıç torkunun ise yaklaşık 700 Nm olduğu Şekil 3.39 ve Şekil 3.43'te sırasıyla gösterilmiştir. Hafif raylı ve metro araçlarında enerji depolama sistemi kullanımında enerji tasarrufu ile birlikte katener gerilimi regülasyonu, katenersiz sürüş gibi bir çok avantaj birlikte gelmektedir. Ancak enerji depolamalı sistemlerin en önemli amacı bilindiği üzere enerji tasarrufudur.

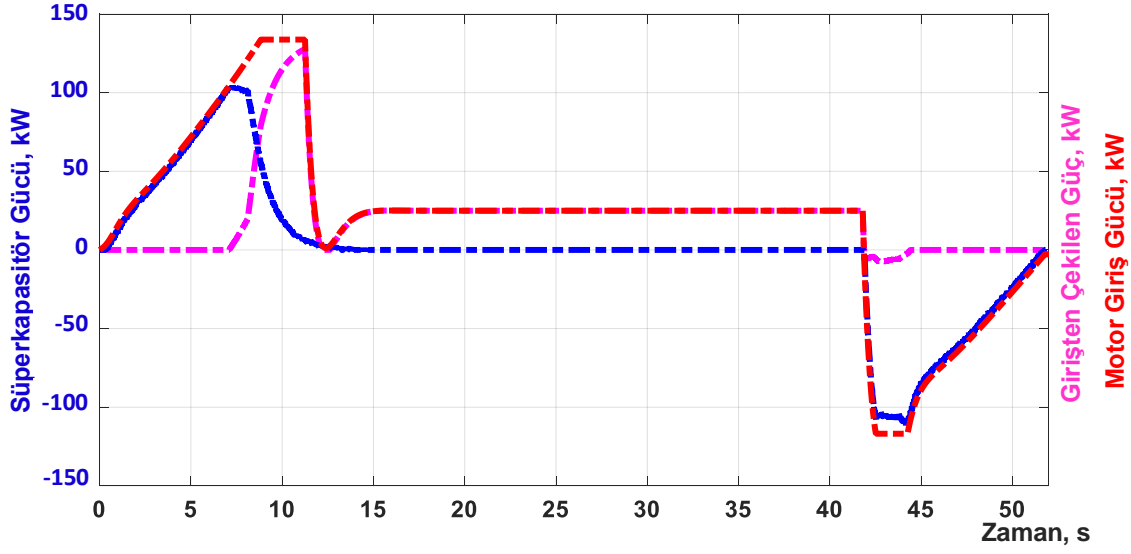
Şekil 3.43 'te görüldüğü üzere motorun ürettiği tepe güç 125 kW, toplam frenleme süresi ise 10.2 s olarak ölçülmektedir. Bölüm 2.6.1'de anlatılan süperkapasitörün frenleme başladığında olması gereken gerilim seviyesi optimizasyonu hesaplamaları kullanıldığında 125 kW tepe frenleme gücü çıktısı olan bir motor 10.2 saniye süre ile frenleme yaptığında süperkapasitör 416 V gerilim

seviyesinden başlamalı sonucu çıkmaktadır. Bu bölümde ise yine aynı yolun benzetimi motor modeli kullanılarak yapılmış fakat süperkapasitör 250 V yerine 416 V değerine kadar deşarj edilmiştir.

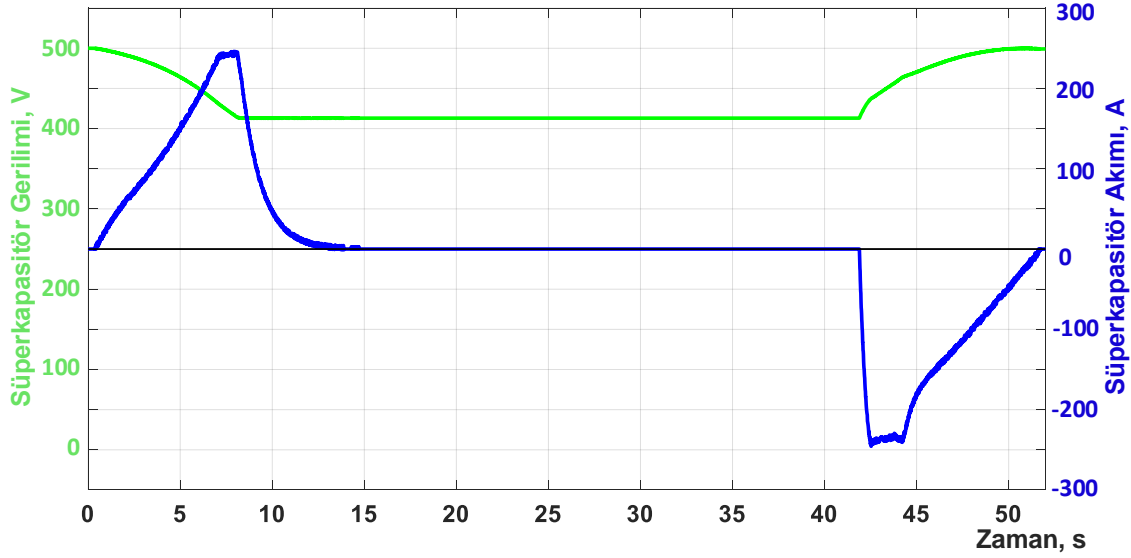
Bu benzetimin sonuçları da sırasıyla Şekil 3.49'da motorun hız ve tork modeli, bunun yanında motorun çıkış gücünü, Şekil 3.50'de cer motorunun giriş gücü, bu gücü sağlayan süperkapasitör ve katener gücünün değişimleri gösterilmiştir. Şekil 3.51'de ise süperkapasitörün gerilim ve akım değişimleri verilmiştir. Şekil 3.50 ve Şekil 3.51'deki grafik değerlerinin, Şekil 3.44 ve Şekil 3.45'teki grafik değerlerinden farklı olması süperkapasitörün başlangıç geriliminin yüksek olması sebebiyle oluşmuştur.



Şekil 3.49. Başlangıç Gerilimi Optimizasyonu sonrası 550 m'lik Eğimsiz Yolda Benzetimi Yapılan Motorun Hızı ve Ürettiği Tork Modelleri, Motor Çıkış Gücü ve Eğim Verisi



Şekil 3.50. Sistemin Katener ve Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü



Şekil 3.51. Başlangıç Gerilimi Optimizasyonu sonrası Eğimsiz Yolda Süperkapasitör Gerilimi ve Akım Değişimi

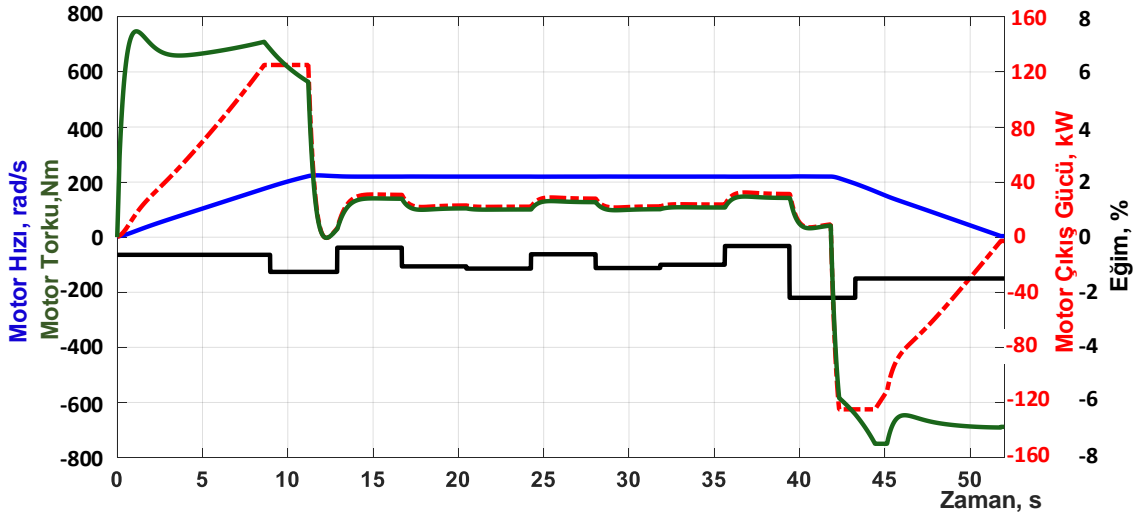
Bu grafiklerden hesaplanan enerji tüketim ve üretim sonuçları şöyledir:

- Güç Kaynağından (katener hattı) çekilen enerji : ~1065 kJ
- Süperkapasitör tarafından sağlanan enerji : ~590 kJ
- Motor tarafından tüketilen enerji (elektriksel) : ~1650 kJ
- Motor tarafından üretilen frenleme enerjisi (elektriksel) : ~640 kJ
- Süperkapasitör tarafından depolanan enerji : ~605 kJ
- Güç Kaynağına (katener hattı) verilen enerji : ~13 kJ

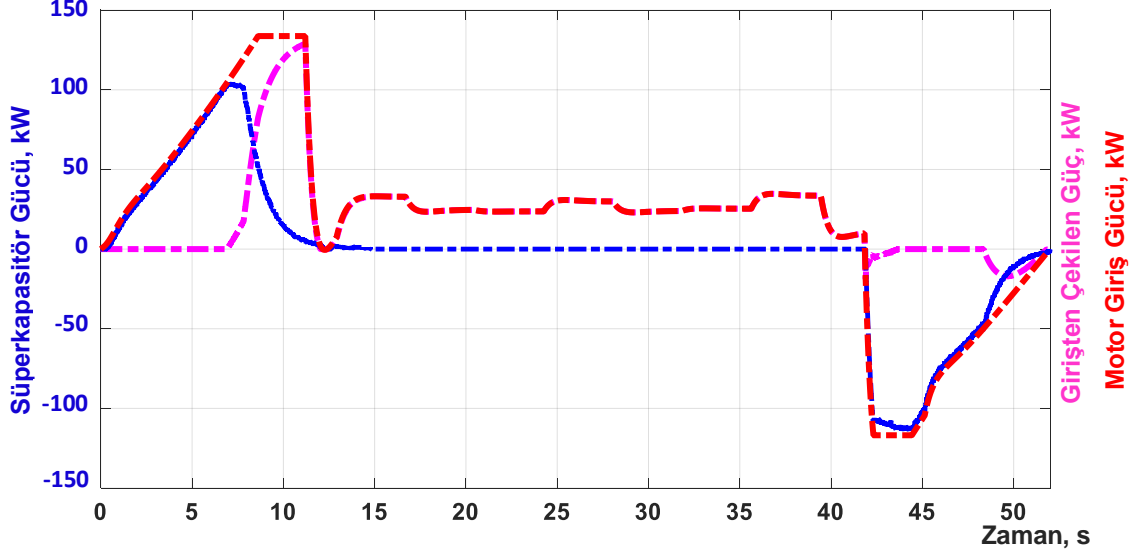
- Süperkapasitör ilk gerilimi: 416 V
- Süperkapasitör son gerilimi: 500 V

Sonuçlardan anlaşılacağı üzere süperkapasitörü 250 V'a kadar deşarj etmemek, frenleme gücü ve süresine göre optimum seviyede tutmak bu mesafedeki bir yolda enerji tasarrufunu %36.7 seviyelerine çıkarabilmektedir. Bunun yanında hatta geri basılan enerjinin düşük olması, araca takılacak frenleme direncinin boyutunun küçülebileceği anlamına gelmektedir.

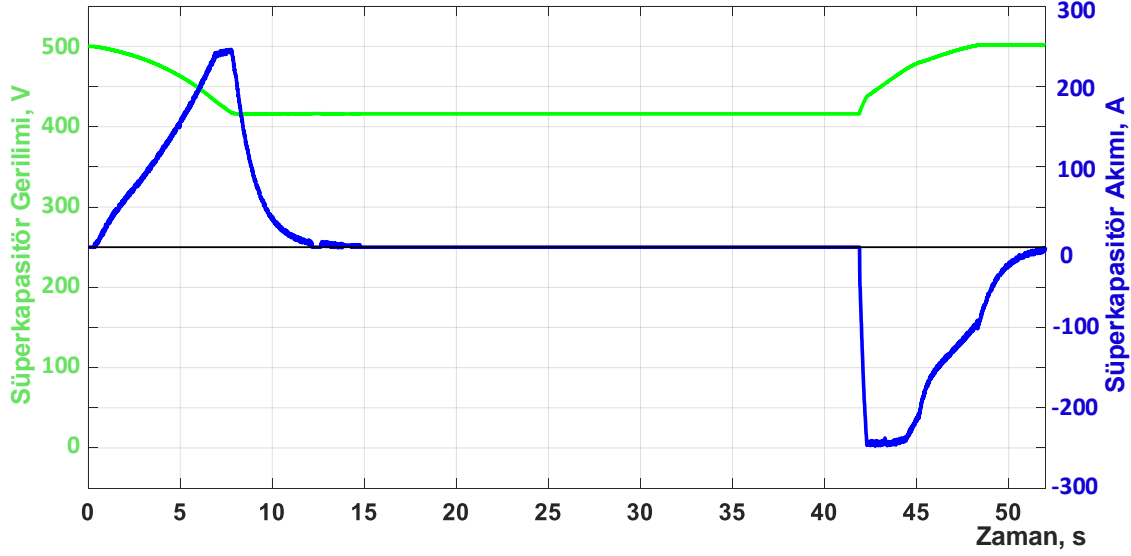
Yine bu benzetim çalışması da Bölüm 3.2.3'teki eğim profili ile tekrar edilmiştir. Buradan çıkan sonuçlar ise sırasıyla Şekil 3.52, Şekil 3.53 ve Şekil 3.54'te verilmiştir.



Şekil 3.52. Örnek Parkurda I ve J Durakları Arası, Başlangıç Gerilim Optimizasyonu sonrası Benzetimi Yapılan Motorun Hızı ve Ürettiği Tork Modelleri, Motor Çıkış Gücü ve Eğim Verisi



Şekil 3.53. Sistemin Katener ve Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü



Şekil 3.54. Başlangıç Gerilimi Optimizasyonu sonrası I ve J arası Süperkapasitör Gerilim ve Akım Değişimi

Bu grafiklerden hesaplanan enerji tüketim ve üretim sonuçları şöyledir:

- Güç Kaynağından (katener hattı) çekilen enerji : ~1045 kJ
- Süperkapasitör tarafından sağlanan enerji : ~590 kJ
- Motor tarafından tüketilen enerji (elektriksel) : ~1630 kJ
- Motor tarafından üretilen frenleme enerjisi (elektriksel) : ~677 kJ
- Süperkapasitör tarafından depolanan enerji : ~605 kJ
- Güç Kaynağına (katener hattı) verilen enerji : ~65 kJ

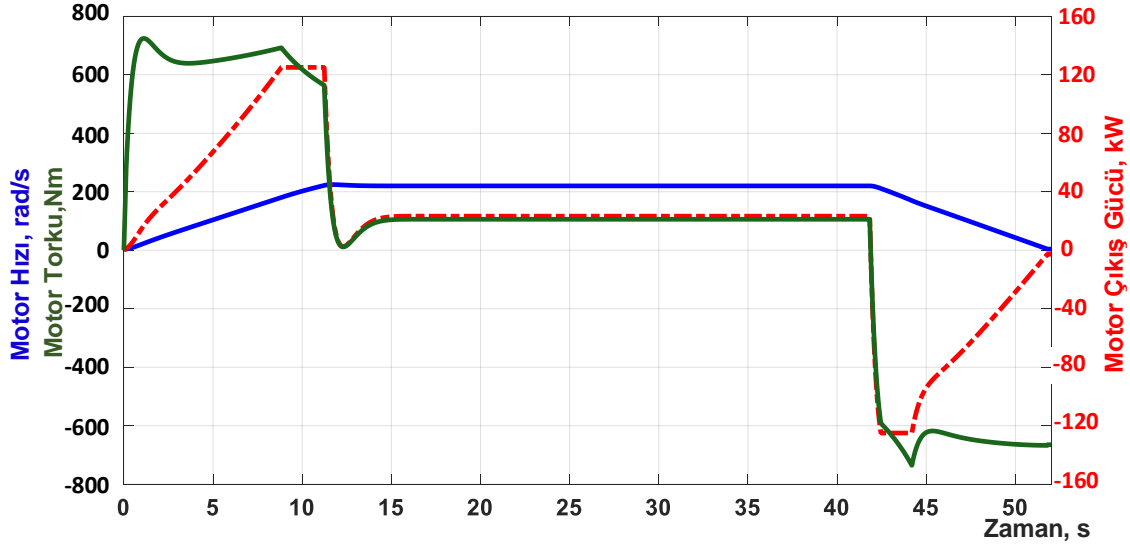
- Süperkapasitör ilk gerilimi: 416 V
- Süperkapasitör son gerilimi: 500 V

Bu değerler ile oluşan sonuç yaklaşık %37.1 civarındadır. Bu yöntemde eğim hesaba katılmadığı ve süperkapasitörün frenleme başlangıcındaki değeri değiştirilemediği için depolanan enerji aynı kalmış, katener modeline basılan enerji artmıştır. Ancak yolun geneli negatif eğimli bir sürüş yaptığı için tüketilen enerji miktarı azalmış buna bağlı tasarrufun yüzde değeri değişmiştir.

### **3.2.5 Azami Enerji Geri Kazanımı için Frenleme Profili Algoritması ile Benzetim Sonuçları**

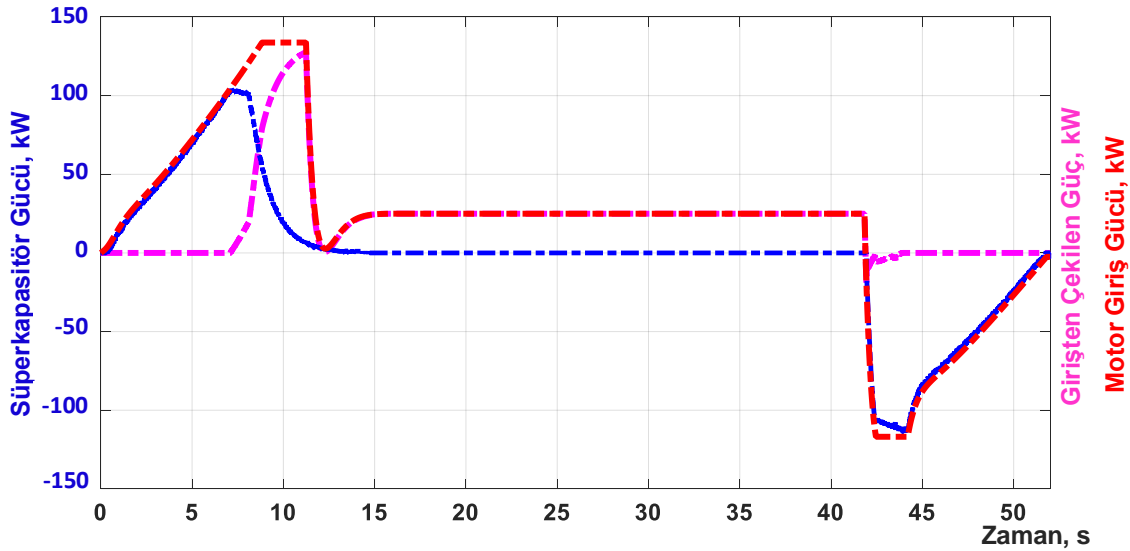
Bölüm 2.6.2'de enerji tasarrufunu artırmanın amaçlandığı algoritma ve akış şeması anlatılmış, bu algoritma ve içerisinde yapılan hesaplamalar ile enerji tasarrufunun nasıl azami hale getirilebileceği anlatılmıştır. Bu algoritma frenleme için bir tork-hız profili çıkartmakta, bununla birlikte süperkapasitörün akım ve gerilim profillerini de oluşturmaktadır. Bu sayede frenleme enerjisi geri kazanımının azami miktara çıkarılabilmektedir.

Bu bölümde ise Bölüm 2.6.2'de verilen algoritmanın çıktısının benzetimlerde nasıl bir sonuç verdiği gösterilmiştir. Diğer benzetimlerde olduğu gibi 550 m'lik mesafede nasıl bir motor hızı ve torkunun oluşturulduğu Şekil 3.55'te verilmiştir. Şekil 3.49'dan farklı olarak burada frenleme süresinin arttığı, ancak sadece 0.5 saniyelik ek bir süre ihtiyacı olduğu gözükmemektedir; bununla birlikte uygulanan frenleme torku profili buna sebebiyet vermiştir.



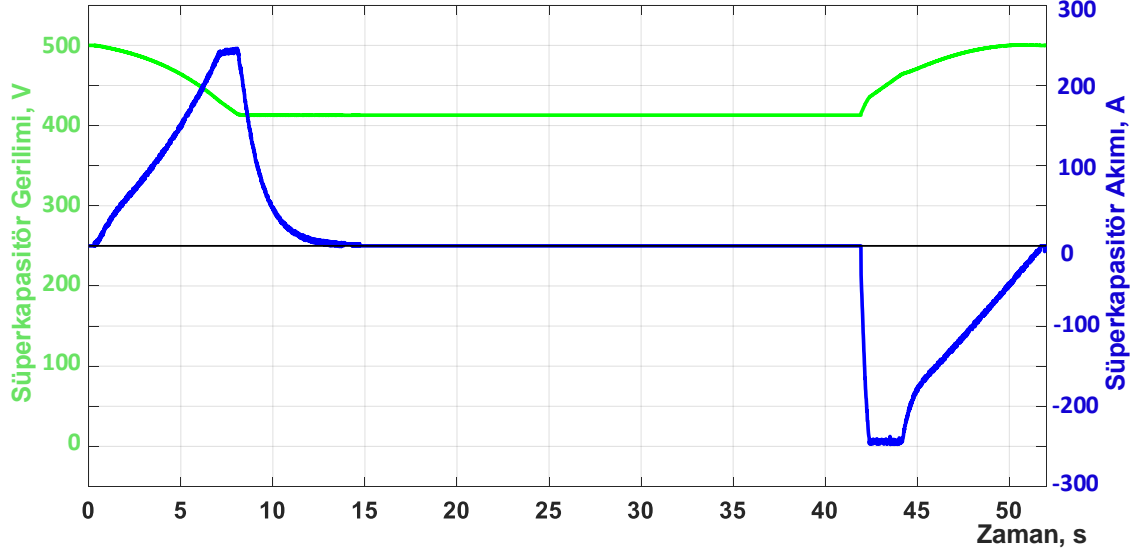
Şekil 3.55. Azami Enerji Geri Kazanımı Algoritması ile 550 m'lik Eğimsiz Yolda Benzetimi Yapılan Motorun Hızı ve Ürettiği Tork Modelleri, Motor Çıkış Gücü ve Eğim Verisi

Bununla birlikte Şekil 3.56'da motor gücü, buna bağlı süperkapasitörün ve katener hattının güç grafikleri verilmiştir. Şekil 3.55 ve Şekil 3.56'daki grafikler incelendiğinde tork daha yavaş negatif tepe noktasına ulaşmış, buna bağlı gözlemleneceği üzere frenlemede üretilen motor gücü de aynı rejimi izlemiştir. Bu sayede üretilen gücün tamamına yakını süperkapasitöre aktarılabilmiş katener hattına neredeyse hiç güç aktarılmamıştır.



Şekil 3.56. Sistemin Katener ve Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü

Şekil 3.57’de ise süperkapasitörün gerilim ve akımı verilmiştir. Tork profili sayesinde süperkapasitörün frenleme başladığındaki gerilim seviyesi daha düşük olabilmiş, frenleme bitişindeki gerilimi ise aynı seviyeye gelebilmiştir.



Şekil 3.57. Azami Enerji Geri Kazanımı Algoritması ile Eğimsiz Yolda Süperkapasitör Gerilimi ve Akımı

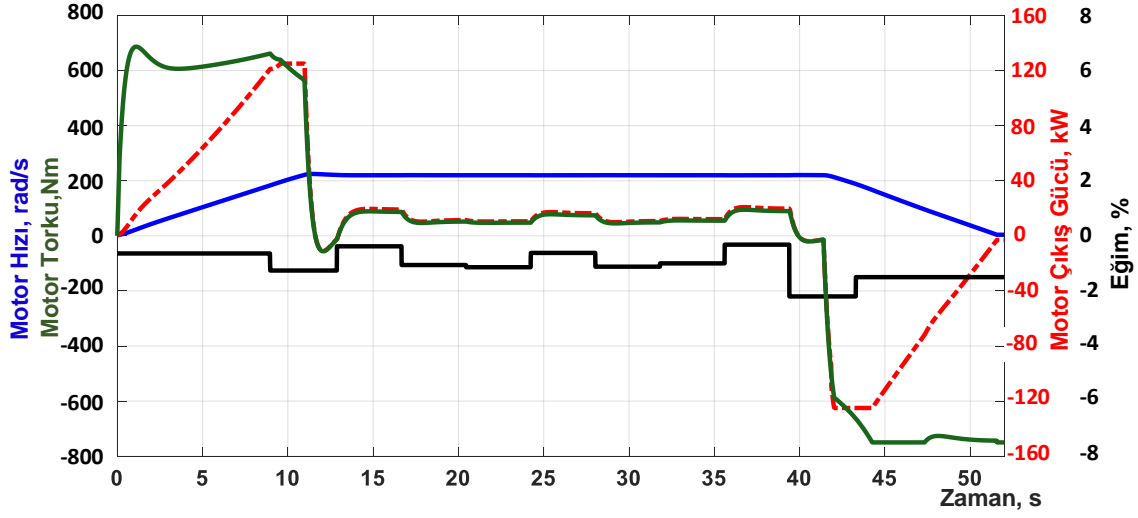
Bu grafiklerden hesaplanan enerji tüketim ve üretim sonuçları şöyledir:

- Güç Kaynağından (katener hattı) çekilen enerji : ~1045 kJ
- Süperkapasitör tarafından sağlanan enerji : ~610 kJ
- Motor tarafından tüketilen enerji (elektriksel) : ~1650 kJ
- Motor tarafından üretilen frenleme enerjisi (elektriksel) : ~641 kJ
- Süperkapasitör tarafından depolanan enerji : ~625 kJ
- Güç Kaynağına (katener hattı) verilen enerji : ~8 kJ
- Süperkapasitör ilk gerilimi: 413 V
- Süperkapasitör son gerilimi: 500 V

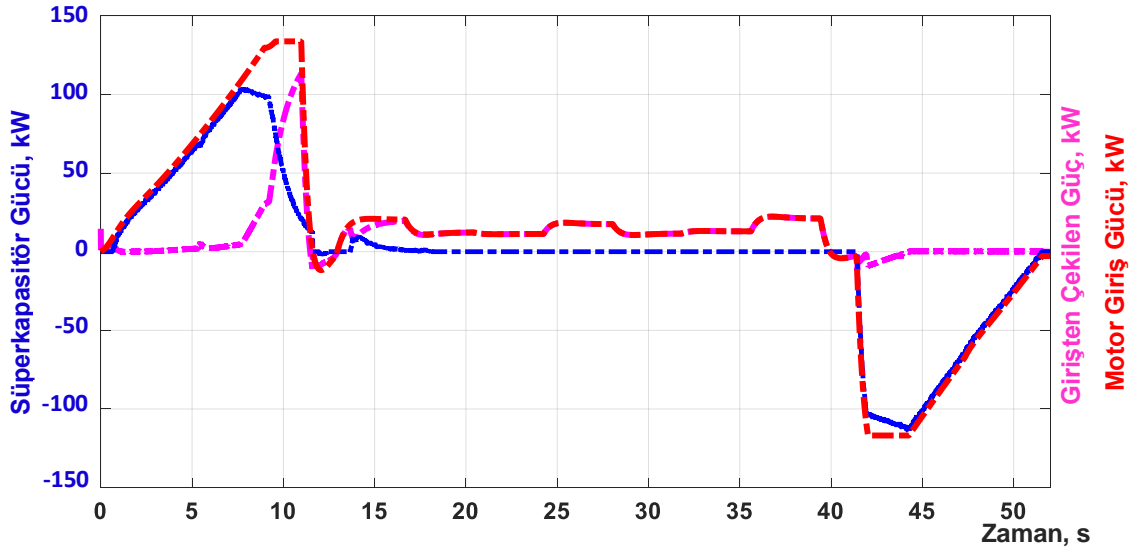
Benzetim sonuçları ve hesaplamalardan görüleceği üzere frenleme profilini uyguladığımız durumda kayıplar hariç motor tarafından üretilen enerjinin neredeyse tamamı süperkapasitöre aktarılabilmektedir. Buradan hesapladığımız enerji tasarrufu ise % 37.8 olmuştur.



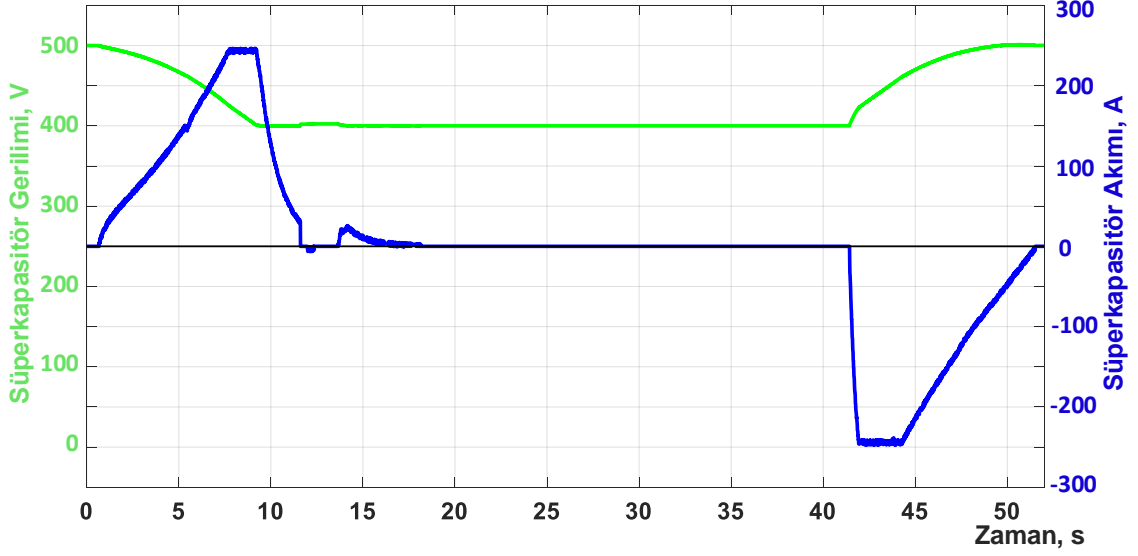
Bu bölümde de eğim profili ile benzetim yeniden koşturulmuş ve sonuçları Şekil 3.58, Şekil 3.59 ve Şekil 3.60'te verilmiştir.



Şekil 3.58. Azami Enerji Geri Kazanımı Algoritması ile Örnek Parkurda I ve J Durakları arası Benzetimi Yapılan Motorun Hızı ve Ürettiği Tork Modelleri, Motor Çıkış Gücü ve Eğim Verisi



Şekil 3.59. Sistemin Katener ve Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü



Şekil 3.60. Azami Enerji Geri Kazanımı Algoritması ile Örnek Parkurda I ve J Durakları arası Süperkapasitör Gerilim ve Akım Değişimi

Bu grafiklerden hesaplanan enerji tüketim ve üretim sonuçları şöyledir:

- Güç Kaynağından (katener hattı) çekilen enerji : ~940 kJ
- Süperkapasitör tarafından sağlanan enerji : ~695 kJ
- Motor tarafından tüketilen enerji (elektriksel) : ~1630 kJ
- Motor tarafından üretilen frenleme enerjisi (elektriksel) : ~720 kJ
- Süperkapasitör tarafından depolanan enerji : ~708 kJ
- Güç Kaynağına (katener hattı) verilen enerji : ~4 kJ
- Süperkapasitör ilk gerilimi: 400 V
- Süperkapasitör son gerilimi: 500 V

Bu algoritmanın uygulanması ile birlikte eğimli yolda fark daha belirgin hale gelmiştir. Tork profili daha erken frenleme yapma zorunluluğu getirdiğinden motor daha fazla enerji üretebilmiştir. Katenere güç aktarımı asgari düzeye indirilmiş, enerji tasarrufu %43.4'e kadar çıkarılabilmektedir, bununla birlikte gerçek bir sistemde frenleme direnci çok küçük olarak kullanılabilir. önlem amacıyla kullanılabilir hale gelebilecektir.

Bölüm 5'te tüm parkur boyunca enerji tüketimi ve enerji geri kazanımı farklı boyutlardaki sistemler ve farklı algoritmalar için karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte her durum için ilk yatırım maliyetinin geri dönüşü üzerine çalışma da bu bölümde yapılmıştır.

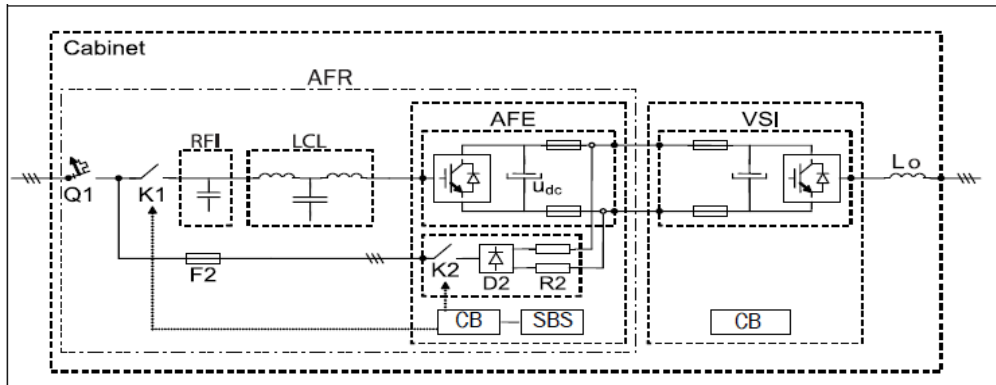
## 4. SİSTEM DONANIM KURULUMLARI VE ÖLÇÜM SONUÇLARI

Bu bölümde, Bölüm 2’de anlatılan sistem tasarımlarının laboratuvar ortamında kurulum aşamaları ve sistemlerin bir araya getirilmesi hakkında bilgiler verilmiş; DGK (PWM) doğrultucu, Motor Sürücü ile Süperkapasitör Enerji Depolama Sisteminin birlikte çalıştırılması üzerinde durulmuştur. Laboratuvar kurulumuyla birlikte, sistem çalışmasından alınan ölçüm verileri paylaşılmıştır. Bunların yanında süperkapasitör enerji depolama sisteminin cer sürücüsü sistemiyle birlikte çalıştırıldığı hafif raylı sistem modeli ile alınan ölçüm sonuçları verilmiştir.

### 4.1 Sistem Kurulumu

Süperkapasitörlü enerji depolama sistemi üzerinde çalışma yapabilmek için daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere öncelikle bu sistemi besleyecek Şekil 2.5’te gösterilen toplam sistem şeması kurulmuştur. Motor sürücünün DA beslemesini gerçekleştirmek için 3 faz şebekeyle güç bağlantısını sağlayan ve çift yönlü aktif DGK doğrultucunun kurulumu yapılmıştır.

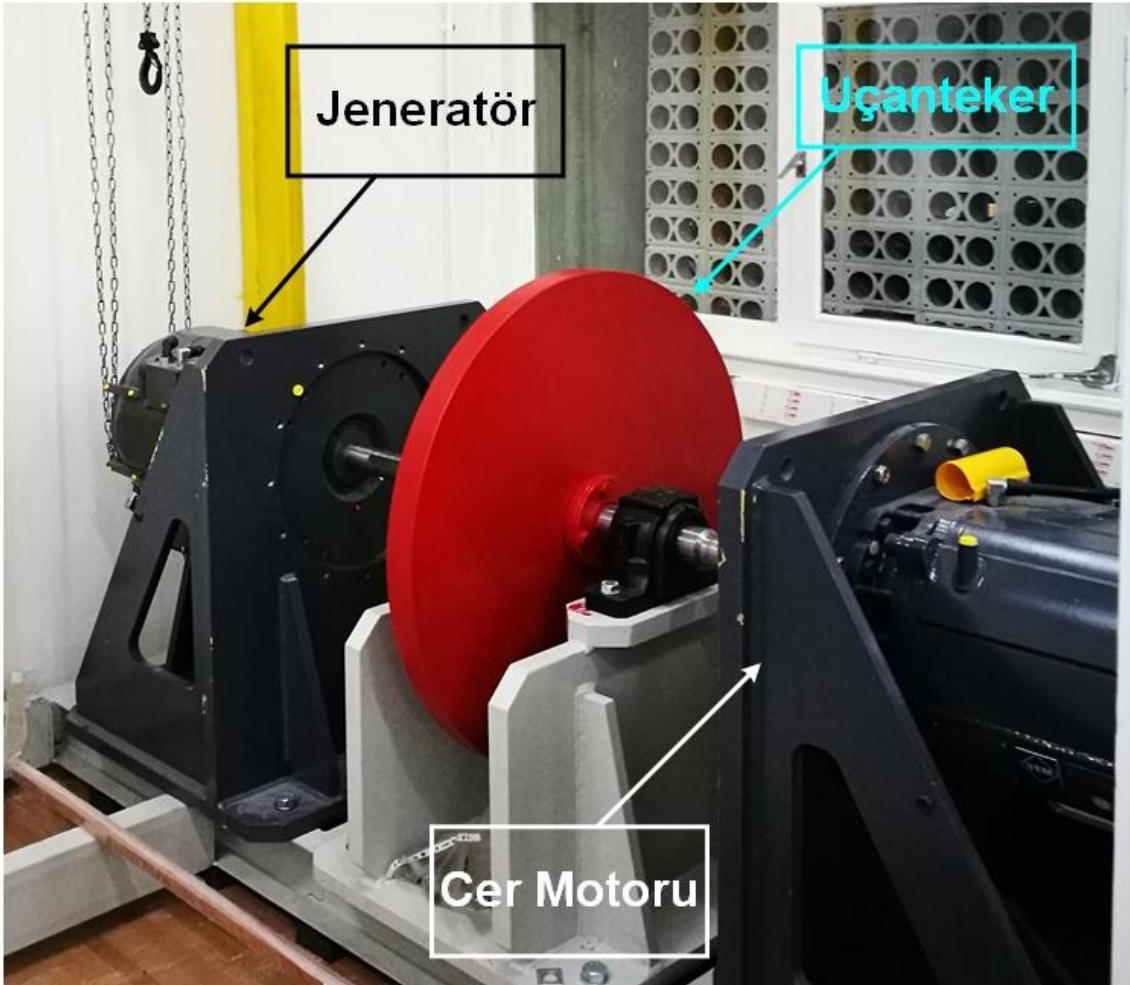
Kendi DGK doğrultucusunu içerisinde barındıran ve içerisinde Gerilim Kaynaklı Eviricisi bulunan, motorları sağlayan VEM firmasının önerdiği EMOTRON VFXR/FDUL46-430 ürünü satın alınmış ve jeneratör tarafına bağlanmıştır. Bu sürücünün ürün sağlayıcı tarafından verilen devre şeması Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu ürünün elektronik çevirici kısımları devre şemasından anlaşılacağı üzere Si IGBT tabanlıdır.



Şekil 4.1 EMOTRON VFXR/FDUL46-430 Aktif Doğrultucu ve Endüstriyel Motor Sürücüsü Devre Şeması

Bölüm 2.4.1'de anlatılan ve Şekil 2.5'te blok şeması verilen Raylı Araçlar Çekiş Sistemlerini modellemek için kurulan Fiziksel Simülatörde bulunan DGK (PWM) doğrultucu, Cer Sürücüsü ve Süperkapasitör EDS için DA/DA Çevirgeç bloklarının tamamı SiC MOSFET tabanlı olup herbiri birlikte çalışılan ekip tarafından tasarlanmış, kurulmuş ve çalıştırılmıştır. Bu simülatörle ilgili detaylara yayımlanan makalemizden ulaşabilirsiniz [68].

Şekil 4.1'de gösterilen aktif doğrultucu içeren motor sürücü ile sürülen Jeneratör ve laboratuvar kurulumunda tasarlanan DGK Doğrultucu ve Cer Sürücüsü ile sürülen Motor Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Aracın sabit yükünü modellemek için Çizelge 2.3'te verilen atalet momenti değerini sağlamayı amaçlayarak Motor-Jeneratör setinin arasına yine Şekil 4.2'de görülen Uçanteker (Flywheel) dönen yük olarak bağlanmıştır.



Şekil 4.2 Raylı Araç Modelini Oluşturmak için Laboratuvar Ortamına Kurulan Motor-Uçanteker-Jeneratör Seti

Yukarıda anlatılan sistemlerin kurulmasıyla birlikte hafif raylı bir aracın bir motoru ve motor başına düşen yükü 1:1 ölçekle fiziksel olarak modellenebilecek hale getirilmiştir. Bu aşamayla birlikte süperkapasitör depolamalı frenleme enerjisi geri kazanımı sistemi bu sisteme entegre edilebilir hale gelmiştir. Süperkapasitör Enerji Depolamalı Sistem Çift Yönlü DA/DA çevirgeç ile Cer Sürücüsüne paralel olarak bağlanmış ve Cer Sürücüsünün Bölüm 2.1'de anlatıldığı gibi enerji depolama birimi ve yedek enerji kaynağı haline gelmiştir.

Süperkapasitör Enerji Depolama Sistemi Çift Yönlü DA/DA Çevirgecinin güç bloğu kurulumu Şekil 4.3'te montaj sırasıyla verilmiştir. İndirici ve yükseltici tipte çift yönlü DA/DA çevirgecin güç bloğu tasarımında Şekil 4.3 (a)'da görülen soğutucu fin üzerine 4 adet SiC MOSFET montajlanmıştır. Burada 4 adet yarım köprü anahtar kullanımı ile güç bloğunun kapasitesini 4 paralel süperkapasitör setini (4 seri x 4 paralel) besleyecek şekilde tasarlamaktır. Gelecekte olası bir sistem entegrasyonuna hazır bir ürün tasarlanmıştır. Bu anahtarların üzerine Şekil 4.3 (b)'de gösterilen yüksek frekans akımları alacak ve EMI gürültüyü azaltacak kapasitörleri içeren (+) ve (-) DA bağlantısını içeren lamine bara montajlanmıştır. Sonrasında Şekil 4.3 (c)'de görülen yarım köprülerin orta noktası (D2-S1) tek bir kaplı bara ile dışarıya bağlantı ucu verecek şekilde montajlanmıştır. Şekil 4.3 (d)'de ise bu blokların üzerine yerleştirilen denetim bloğu gösterilmektedir.

Şekil 4.4'te ise çift yönü DA/DA çevirgecin nihai hali gösterilmektedir. Güç bloğunun bağlandığı bu sistemde davlumbaz altına gizlenmiş DA/DA (İndirici-Yükseltici) filtre indüktörü vardır, bunun yanında güç bloğunun cer sürücüsüne bağlı tarafında bulunan ve DA bağına oluşturan 4.7 mF'lık kapasitör bu fotoğrafta görünmektedir. Yine sistemin hem yüksek (750 V DC), hem de düşük gerilim (500 – 250 V DC, Süperkapasitör) tarafına bağlı olan akım ve gerilim algılayıcılar bu fotoğrafta tariflenmiştir.



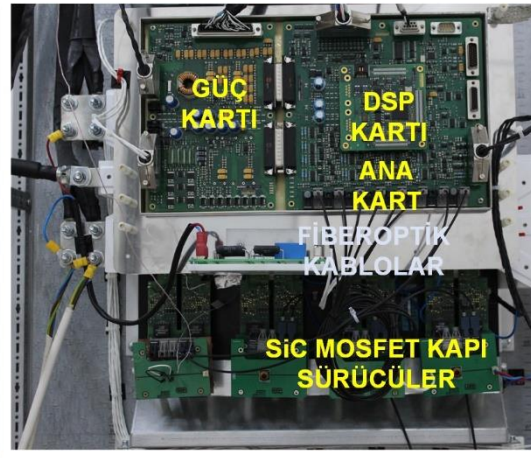
(a)



(b)

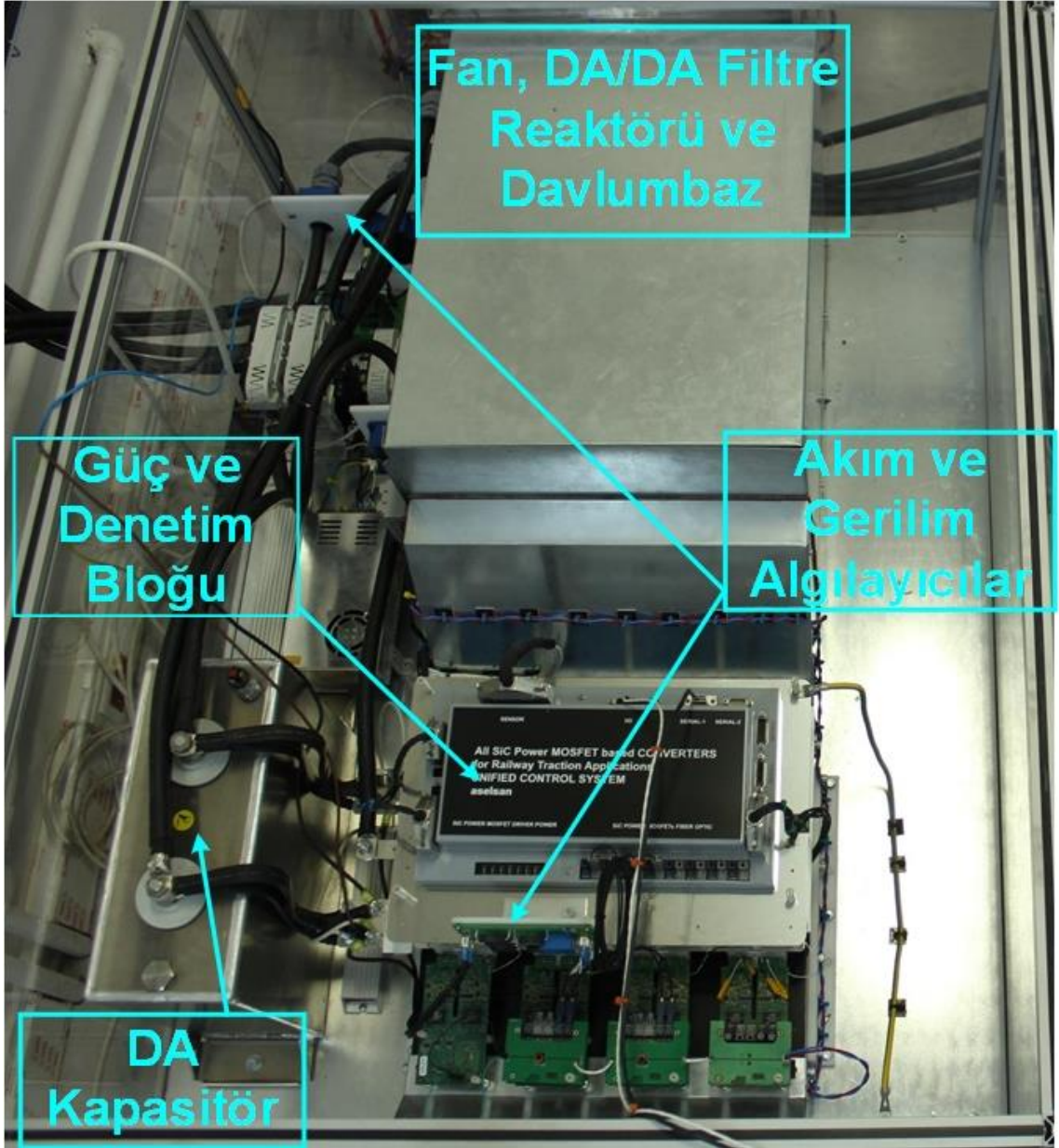


(c)



(d)

Şekil 4.3. Laboratuvar Ortamında Kurulan Süperkapasitör Depolamalı Frenleme Enerjisi Geri Kazanımı Sistemi için İndirici ve Yükseltici Tipte Çift Yönlü DA/DA Çevirgecin Güç Bloğu Kurulum Aşamaları (a) MOSFET Modüllerinin Soğutucu Fine Montajı, (b) Modüllerin Üzerine Mekanik ve Elektriksel Montajı Yapılan EMI Kapasitörlerin Bulunduğu Lamine Bara, (c) MOSFET Modüllerinin Orta Bacaklarına Mekanik Olarak Montajı Yapılan Tek Ortak Çıkışlı Bara, (d) Güç Bloğu Üzerine Gelen İletken ve Topraklanmış Plaka Üzerine Montajı Yapılan Denetim Kartları, ve MOSFET'lerin Kapılarına Takılan Fiberoptik Arayüzlü Kapı Sürücü Kartları



Şekil 4.4 Süperkapasitör Depolamalı Frenleme Enerjisi Geri Kazanımı Sistemi için İndirici ve Yükseltici Tipte Çift Yönlü DA/DA Çevirgeç

Süperkapasitör bankaları yapısal olarak birçok süperkapasitörün seri olarak bağlanmasıyla meydana gelmektedir. Çalışmada kullandığımız süperkapasitör bankaları aktif gerilim dengelemesi içeren modüllerdir [61]. Çalışmada Süperkapasitör bankalarının 4 adet seri bağlanmasıyla oluşan bir yapı kullanıldığından aktif gerilim dengeleme sistemi modüller arasında da dengesizlik oluşmasını engellemektedir, bunu 12 adet seri bağlantıya (1500 V seri gerilim) kadar yapabildiği yine veriföyünden bulunabilir. 4 adet süperkapasitörün biraraya getirildiği laboratuvar kurulumu ise Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



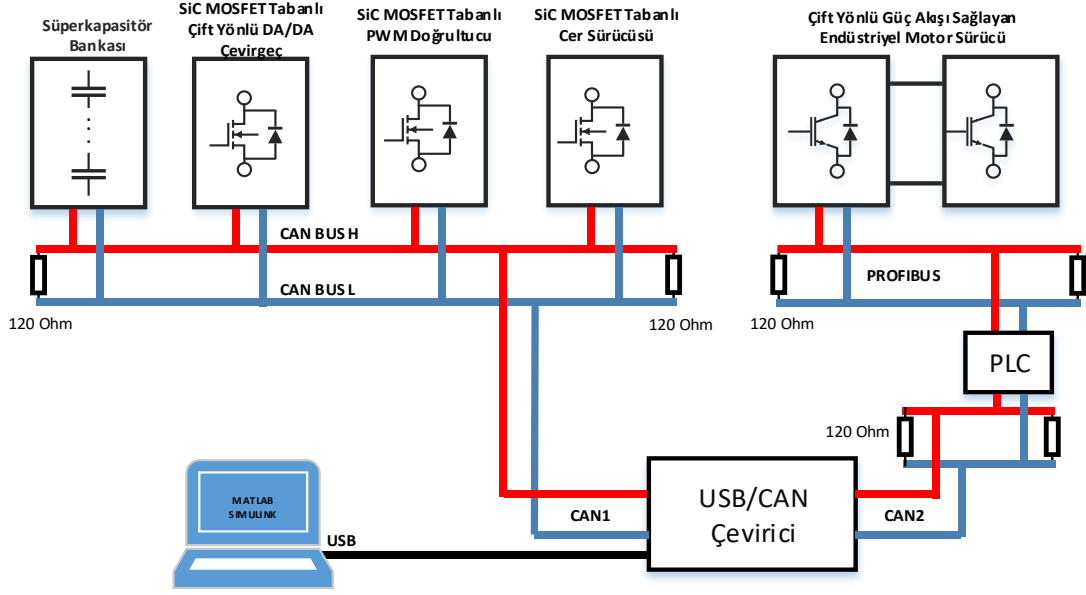


Şekil 4.5. Laboratuvar Ortamında Kurulmuş Olan 4 Adet Süperkapasitör Bankası Raf Yerleşimi

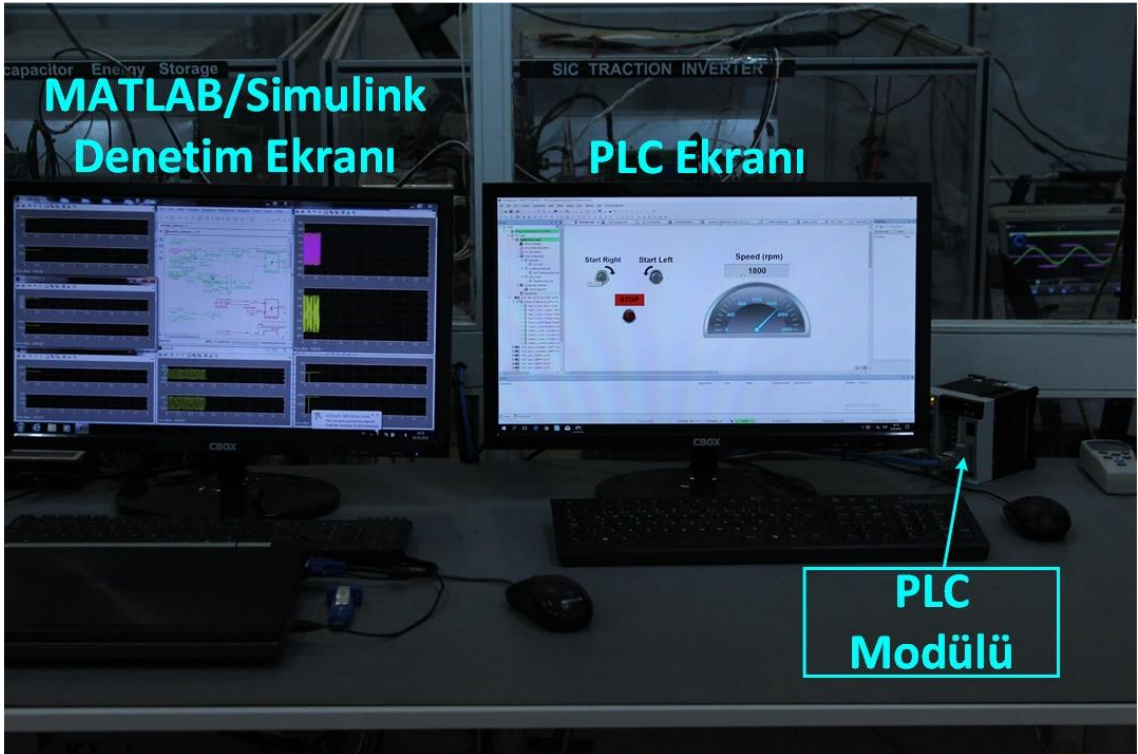
## 4.2 Sistem Denetimi ve Haberleşmesi

Birden fazla sistemin düzgün çalışması için düzgün bir denetleme altyapısı ve düzgün iletişim protokolleri grubuna ihtiyaç duyulmuştur. Bunu sağlayabilmek adına Şekil 4.6'da gösterilen iletişim protokolü altyapısı oluşturulmuştur. Bu altyapıyla aynı zamanda sistemden veri toplanıp ölçümler de yapılabilmektedir.

Bu şemaya göre tasarlanan tüm sistemlerde CANBUS arayüzü mevcut olup, Süperkapasitör Bankası da hem kendi aralarında hem de USB/CAN arayüzüyle CANBUS aracılığıyla iletişim kurabilmektedir. EMOTRON aktif doğrultucu ve endüstriyel sürücüsünün CANBUS arayüzü bulunmamaktadır, bu sebeple mevcuttaki PROFIBUS arayüzüyle PLC aracılığıyla iletişim kurulmuştur. Sistemin PLC arayüzü CODESYS programıyla programlanmıştır. MATLAB/Simulink ile USB/CAN çevirici aracılığıyla PLC'ye aktarılan komutlar PROFIBUS arayüzüyle EMOTRON motor sürücüyeye aktarılmıştır. Bu çalışmaların yürütüldüğü laboratuvar ortamındaki bilgisayar ve PLC altyapısı Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.6 Bilgisayar Üzerinde Koşan MATLAB/Simulink Programı Aracılığıyla, CANBUS İletişim Arayüzüyle, Tasarlanan Sistemlerin ve PLC'nin Haberleşme Şeması / PROFIBUS İletişim Arayüzüyle PLC ve Endüstriyel Motor Sürücünün Haberleşme Şeması



Şekil 4.7. Denetim Ekranları ve PLC Modülün Bağlantısı ve Genel Çalışma Düzeni

Sistemlerin haberleşmesi dışında tüm sistemlerin yüksek ve düşük gerilim, yüksek akım ve yüksek sıcaklık için ve ayrıca SiC MOSFET'in veya sürücüsünün bozulmasına ve hatalarına karşı aşağıda sıralanan önlemler alınmıştır:

- DA-Bağ Aşırı Gerilim Koruma Seviyesi:  $1050 V_{DC}$
- DA-Bağ Düşük Gerilim Çalışmama Seviyesi:  $550 V_{DC}$
- DA-Bağ Yüksek Akım Koruma Seviyesi: 300 A
- Evirici AA Hat Yüksek Akım Koruma Seviyesi:  $395A_{peak}$
- Süperkapasitör Aşırı Gerilim Koruma Seviyesi (İndirici Kipte):  $510 V_{DC}$
- Süperkapasitör Düşük Gerilim Koruma Seviyesi (Yükseltici Kipte):  $250 V_{DC}$
- Süperkapasitör Yüksek Akım Koruma Seviyesi: 250 A
- Süperkapasitör Aşırı Akım Koruma Seviyesi: 300 A
- Fin Sıcaklığı Yüksek Sıcaklık Koruması:  $70^{\circ}C$
- SiC MOSFET ve Sürücü Bozulma Hatası Koruması
- Sistem başlangıcında, SiC MOSFET ve Sürücü Bozulma Hatası Tespiti
- Akım ve Gerilim Algılayıcı Bozulma Hatası Koruması

### 4.3 Sistemden Alınan Ölçümler ve Yol Senaryoları

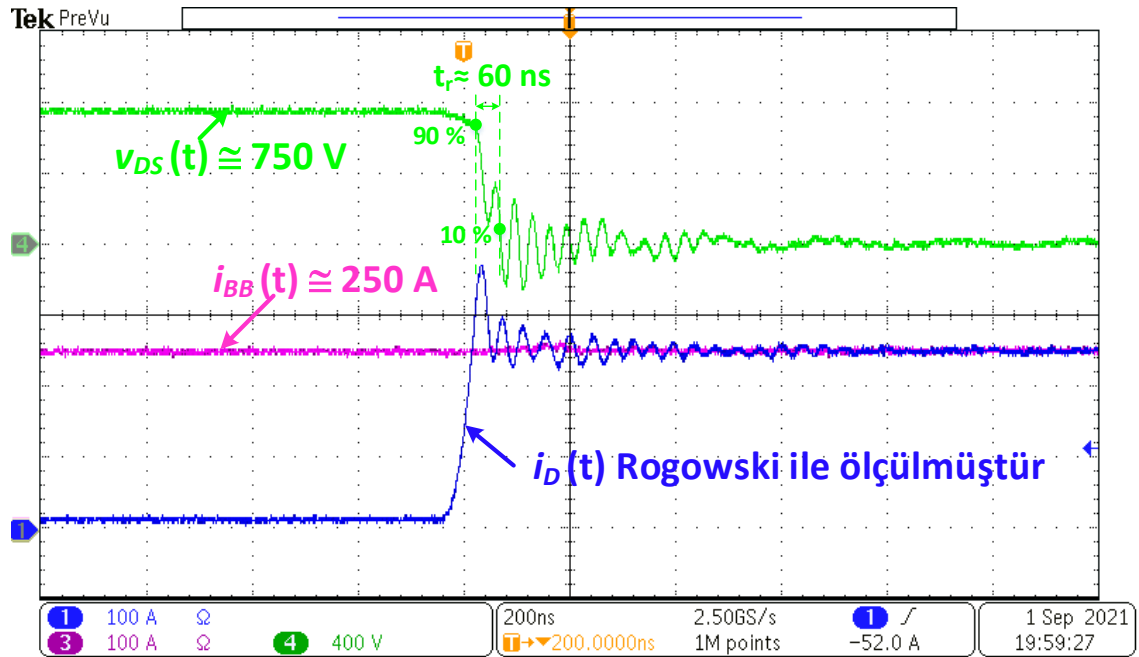
Çift yönlü DA/DA çevirgecinin ilk çalışmalarında süperkapasitör kontrollü güç kaynağı kullanılarak çevirgecin indirici kipi çalıştırılarak doldurulmuş ve yine çevirgecin yükseltici kipi kullanılarak depoladığı enerji 100 kW'lık dirençler üzerinde boşaltılmıştır. Bu aşamalarda benzetimlerde kullanılan denetim sistemi doğrulanmıştır ve iyileştirilmiştir. Sonrasında, sistem DGK doğrultucu üzerinden beslenmiş ve indirici kip kullanılarak doldurulmuştur. Depolanan enerji yine çevirgecin yükseltici kipi kullanılarak DGK üzerinden 3 faz şebekeye geri verilmiştir. DGK doğrultucu çift yönlü çalışabilmesi çift yönlü DA/DA çevirgecin denetim döngülerini ayarlamak ve tam yükte sürebilmek için kullanılmıştır. Ayrıca doğrultucunu  $600 V_{DC} - 900 V_{DC}$  gerilim aralığında rahatlıkla ayarlanabilmesi Süperkapasitör Enerji Depolama Sisteminin tüm koşullarını test edebilecek bir altyapı oluşturmuştur.

İndirici ve Yükseltici tipte çift yönlü güç akışı sağlayan çevirgeç tasarımı yapılırken Bölüm 2.5 ve 3.2.1'de anlatıldığı üzere sürekli olarak kapalı döngü denetim algoritmaları kullanılmıştır. Hem gerilimin, hem de gerilime bağlı akımın denetlendiği çift katmanlı PI denetleyici ile denetim tasarımı yapılmıştır.

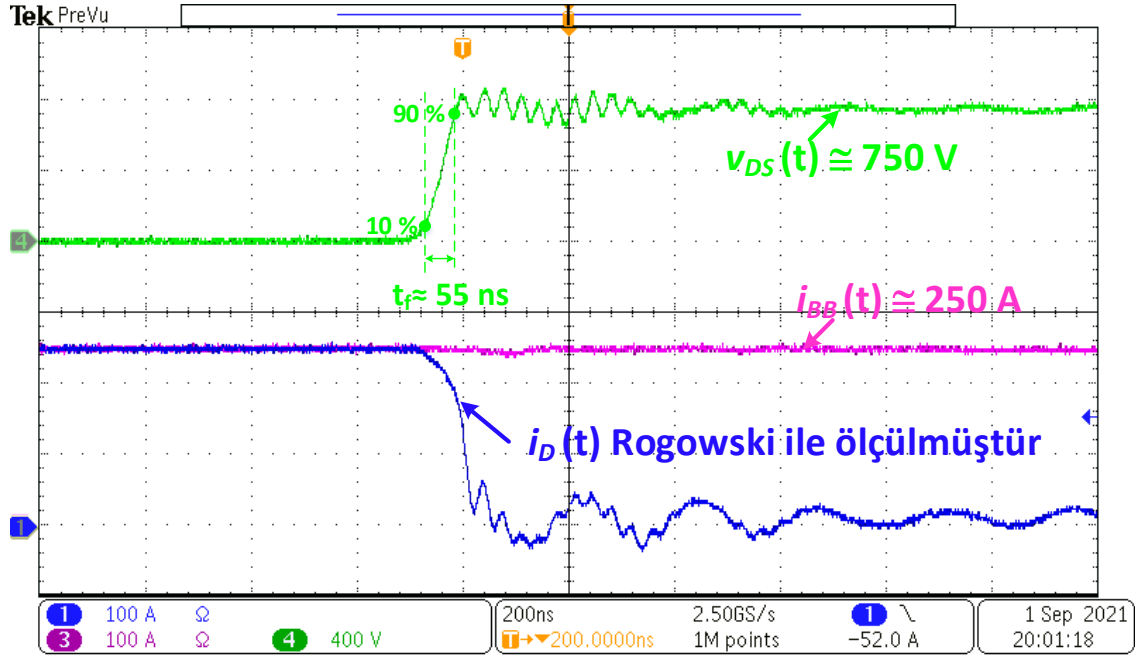
İndirici veya yükseltici kipte çalıştığında çevirgeç reaktörü üzerinde oluşan gerilim dalga şekline karşılık nasıl bir akım dalga şekli olacağı Şekil 2.13'te verilmiştir.

#### 4.3.1.1 SiC MOSFET Anahtarlama Ölçümleri

Bölüm 3.1.1'de LTSpice modeli kullanılarak benzetim çalışmaları üzerinden incelenen anahtarlama grafikleri, bu bölümde SiC MOSFET modülün savak tarafından Rogowski yüksek frekans akım ölçüm probu ve savak-akaç arasına yüksek frekans gerilim probu bağlanarak ölçülmüştür. SiC MOSFET'in açılış ve kapanış süreleri Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere SiC MOSFET'in açılış süresi yaklaşık 36 ns, kapanış süresi ise yaklaşık 66 ns olarak ölçülmüştür. Buradaki değerler LTSpice modelindeki değerlere çok yakın değerler olarak ölçülmüş ve benzetimle ölçüm birbirini doğrulamıştır.



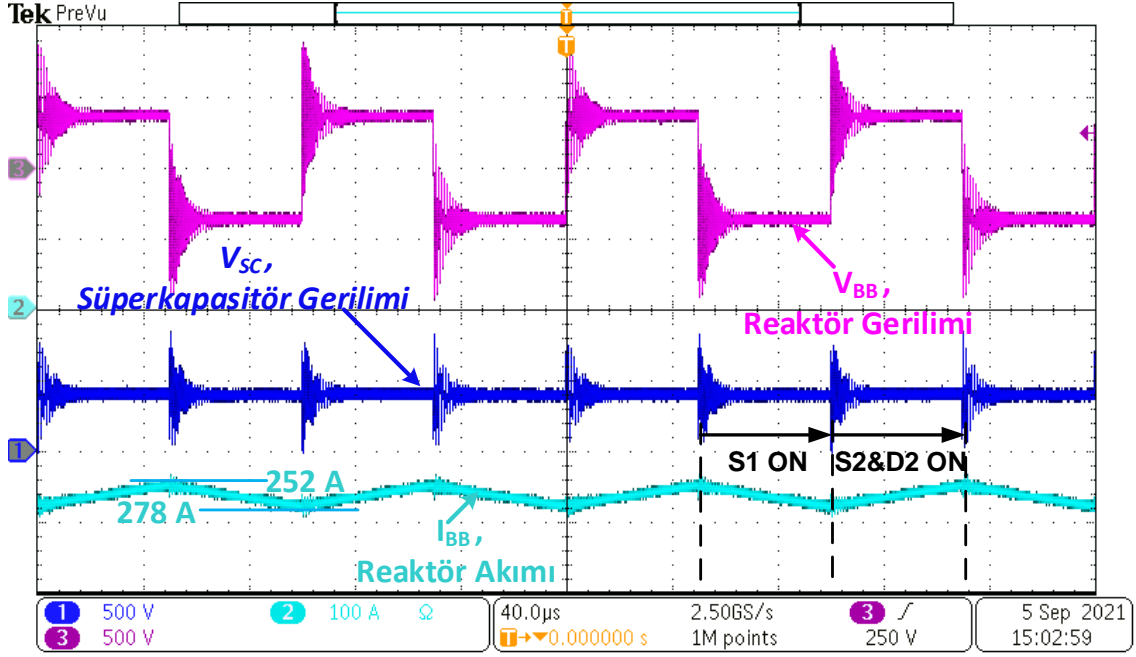
Şekil 4.8. SiC MOSFET'in Açılış Anındaki Akım ve Gerilim Grafikleri



Şekil 4.9. SiC MOSFET'in Kapanış Anındaki Akım ve Gerilim Grafikleri

#### 4.3.2 Süperkapasitör Şarj ve Deşarj Ölçümleri

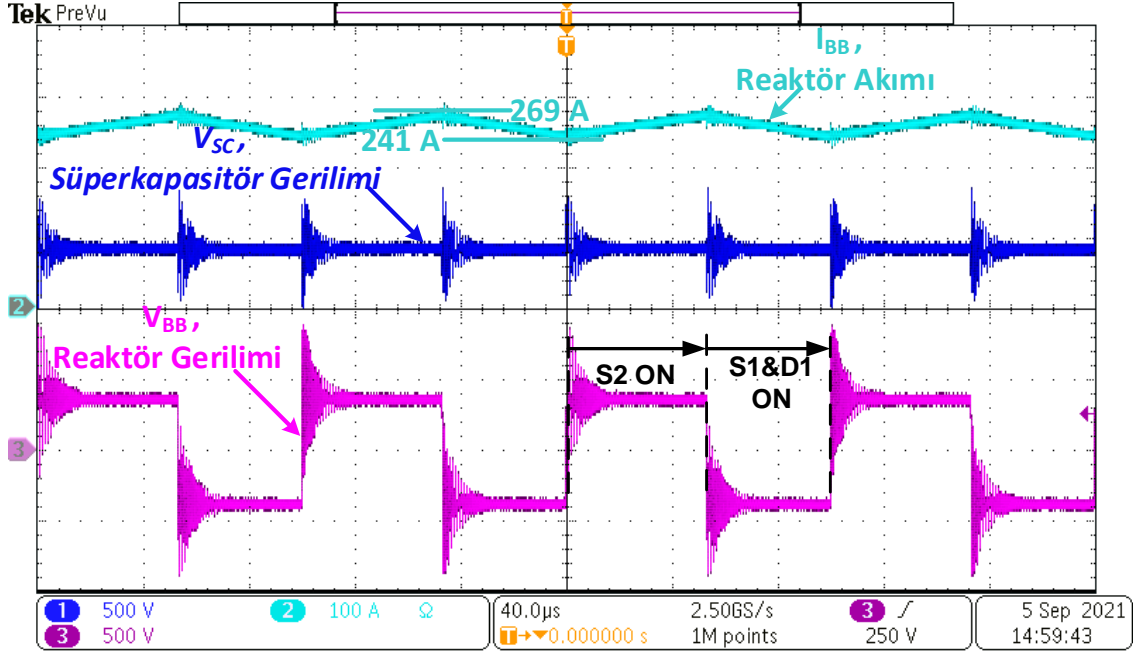
Süperkapasitörün şarj edildiği durumda çevirgeç indirici kipte çalışmakta ve Şekil 2.20'de gösterilen S1 MOSFET'i 10 kHz ile anahtarlanmaktadır. S1 iletimde iken reaktöre yüksek gerilim uygulanmakta ve reaktör üzerindeki akım lineer olarak artırılmaktadır, anahtarlanmanın sustuğu durumda S2 MOSFET'i ve D2 diyotu iletime geçerek reaktör üzerinde depoladığı enerjiyi süperkapasitöre aktarmaktadır. Bu durum ve bu duruma bağlı reaktör gerilim ve akımı detaylı olarak Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Süperkapasitör Şarj Olurken, (1) Süperkapasitör Gerilimi, (2) Reaktör Üzerinde Anahtarlama Esnasında Oluşan Akım, (3) Reaktör Üzerinde Anahtarlama Esnasında Oluşan Gerilim

Şekil 4.10'da görüldüğü üzere, reaktör S1 MOSFET'i iletimdeyken şarj olmaktadır ve akımı artmaktadır, S1 MOSFET'i kapalı, S2 MOSFET'i ve D2 diyotu iletimdeyken enerjisini süperkapasitöre aktarmaktadır ve bir miktar deşarj olmaktadır. Reaktörün tepe akımlarına bakıldığında tepeden tepeye akım dalgalanması 26 A olarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarının Bölüm 2.4.5'te hesaplanan endüktans değeriyle uyduğu görülmektedir.

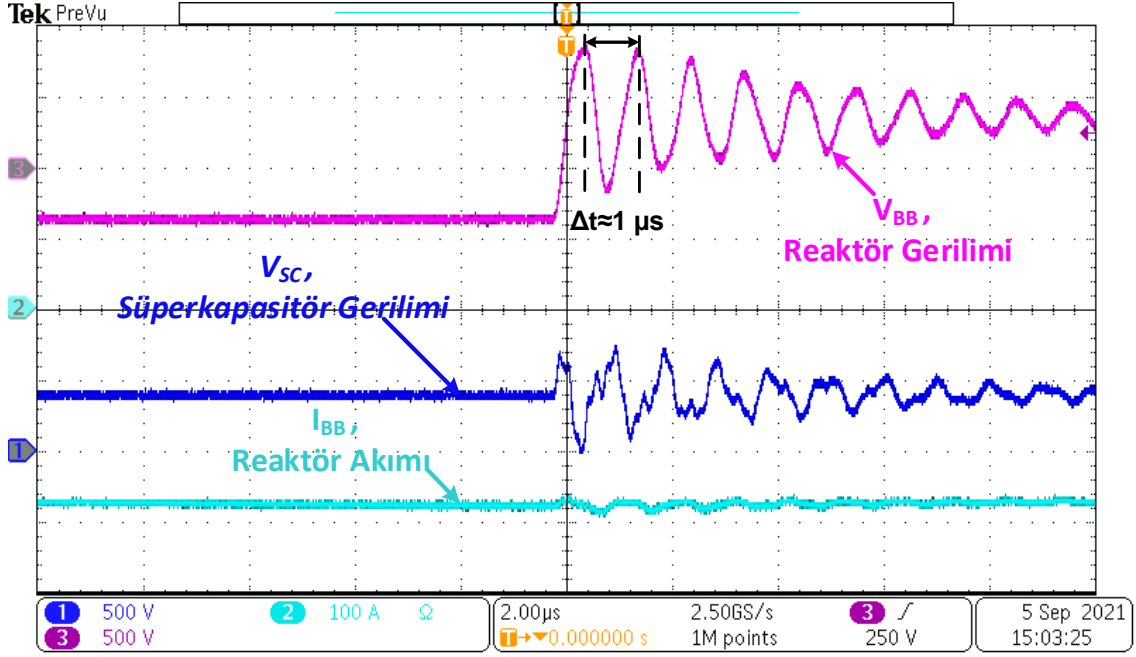
Süperkapasitörün deşarj edildiği durumda ise çevirgeç yükseltici kipte çalışmakta ve bu durumda ise yine Şekil 2.20'de gösterilen S2 MOSFET'i 10 kHz ile anahtarlansmaktadır. S2 MOSFET'i iletimde iken reaktörün üzerine süperkapasitörün gerilimi uygulanmakta ve reaktör üzerindeki akım lineer olarak yükselmektedir, S2 MOSFET'i kapalı, S1 MOSFET'i ve D1 diyotu iletime geçtiğinde ise reaktör üzerinde biriken enerjiyi DA hatta aktarmaktadır. Bu durumdaki reaktör gerilim ve akımı detaylı olarak Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Süperkapasitör Deşarj Olurken, (1) Süperkapasitör Gerilimi, (2) Reaktör Üzerinde Anahtarlama Esnasında Oluşan Akım, (3) Reaktör Üzerinde Anahtarlama Esnasında Oluşan Gerilim

Şekil 4.11’de görüldüğü üzere, reaktör S2 MOSFET’i iletimdeyken şarj olmakta ve akımı artmaktadır, S2 MOSFET’i kapalı, S1 MOSFET’i ve D1 diyotu iletimdeyken enerjisini DA hatta aktarmaktadır ve bir miktar deşarj olmaktadır. Reaktörün tepe akımlarına bakıldığında tepeden tepeye akım dalgalanması 28 A olarak ölçülmüş, sonuçların Bölüm 2.4.5’te hesaplanan endüktans değeriyle uyduğu görülmüştür.

Süperkapasitör şarj ve deşarj edilirken anahtarlama esnasında reaktör ve süperkapasitör üzerinde oluşan yüksek frekans dalgalanmaların sebebi sorgulanmış ve osiloskop görüntüleri yakınlaştırılarak daha detaylı ölçümler alınmıştır. Şekil 4.12’de görüldüğü üzere dalgalanmanın iki tepe arası yaklaşık 1  $\mu$ s olarak ölçülmüştür. Bu durumda dalgalanma frekansı yaklaşık 1 MHz olarak hesaplanmaktadır.



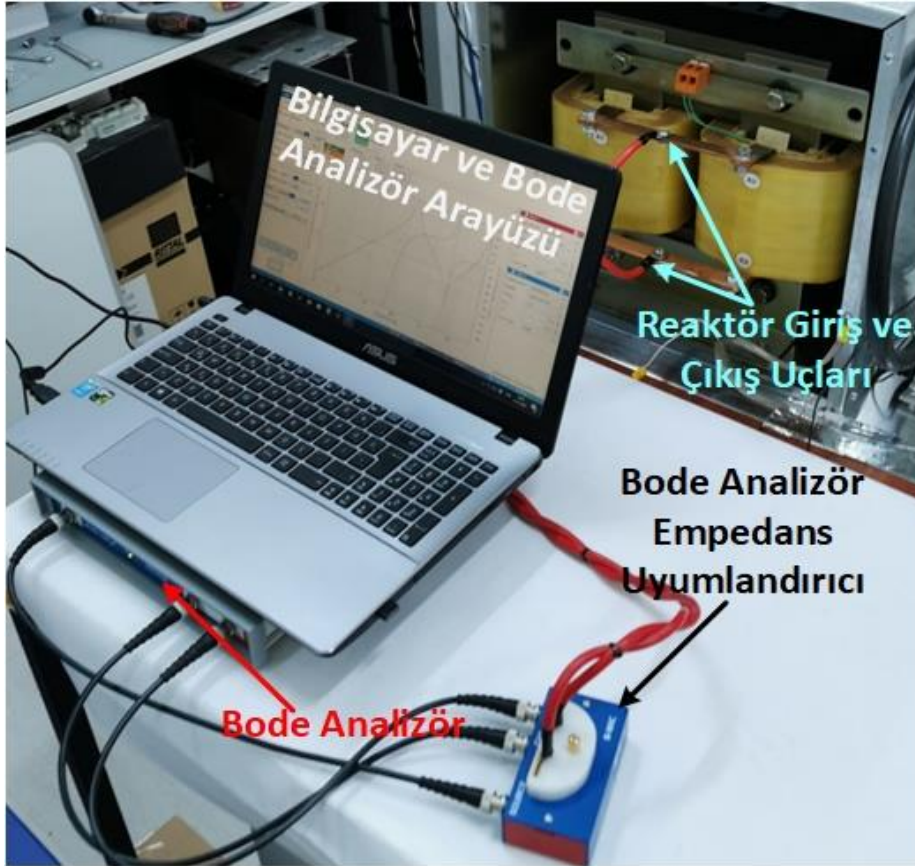
Şekil 4.12 Anahtarlama Esnasında S1 MOSFET'inin İletime Geçtiğinde Oluşan (1) Süperkapasitör Gerilimi, (2) Reaktör Gerilimi ve (3) Reaktör Akımının Yakınlaştırılmış Dalgalandırma Grafikleri

Bu dalgalanma durumu indirici-yükseltici reaktörün yüksek frekans dalgalanmalarda endüktif etkinliğini yitirmesi ve sarımdan kaynaklı parazitik kapasitif etkisinin artışı olarak görülmektedir. Şekil 2.15'te verilen reaktör görüntüsünden reaktörün şerit bakır kullanılarak sarıldığı görülebilmektedir. Şerit bakırların üstüste sarımları yapılırken birbirleri arasında parazitik olarak kapasitans oluşturmakta, bu etki yüksek frekanslarda daha çok ortaya çıkabilmektedir. Bu sebeple reaktör yüksek frekans sinyallerde düşük empedans gösterip geçirmek durumunda kalmıştır.

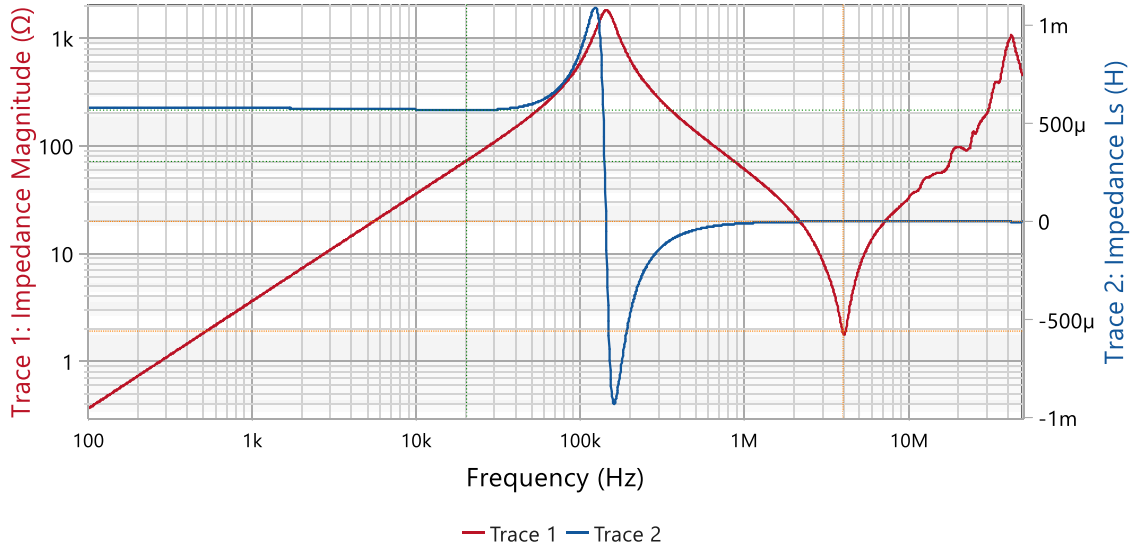
Bu durumu daha detaylı incelemek için reaktör bode analizör ile detaylı olarak ölçülmüştür, bu ölçümün nasıl yapıldığı Şekil 4.13'de, ölçüm sonuçları ise Şekil 4.14'te verilmiştir. Bu ölçümden anlaşılacağı gibi reaktörün endüktansı 100 kHz'ten itibaren hızla düşüyor ve reaktörün bu frekansın ötesinde endüktif etkisi kaybolup endüktans değeri eksi değerler almaya başlıyor. Bu durum, reaktörün manyetik nüvesinin bu frekanslarda etkinliğini yitirdiğini, sarımlar arası kapasitansların etkin olmaya başladığına işaret etmektedir. Buradaki salınım ise anahtarların hızlı olmasından kaynaklı salınımın 1 MHz civarında bir rezonans ile yükseltildiğini göstermektedir. Bu gerilim salınımının süperkapasitörün üzerinde



olması mümkün değildir, bu salınım reaktör üzerinde olup süperkapasitörün eş değer direncinden dolayı böyle ölçülmektedir. Bu salınım uzun ömür açısından süperkapasitöre zarar verebileceğinden reaktörün sadece anahtarlama frekansı değil, SiC MOSFET'lerin açılma-kapanma sürelerine de uygun şekilde tasarlanması gerektiği sonucu çıkmaktadır.



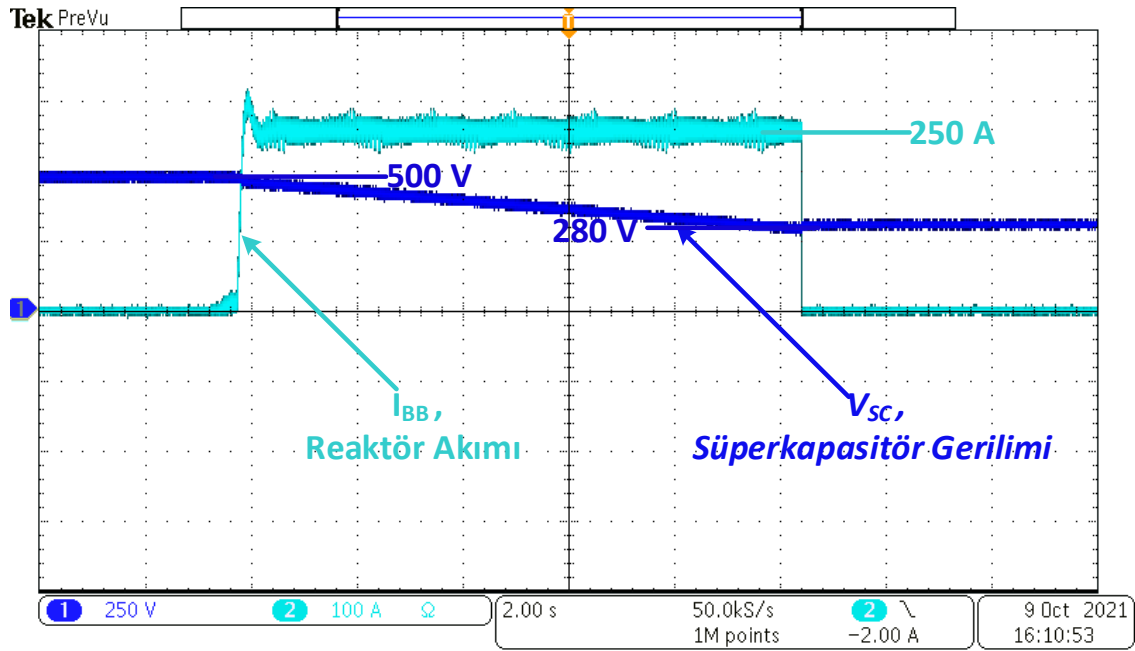
Şekil 4.13 İndirici-Yükseltici Reaktörün Bode Analizör ile Ölçüm Altyapısı



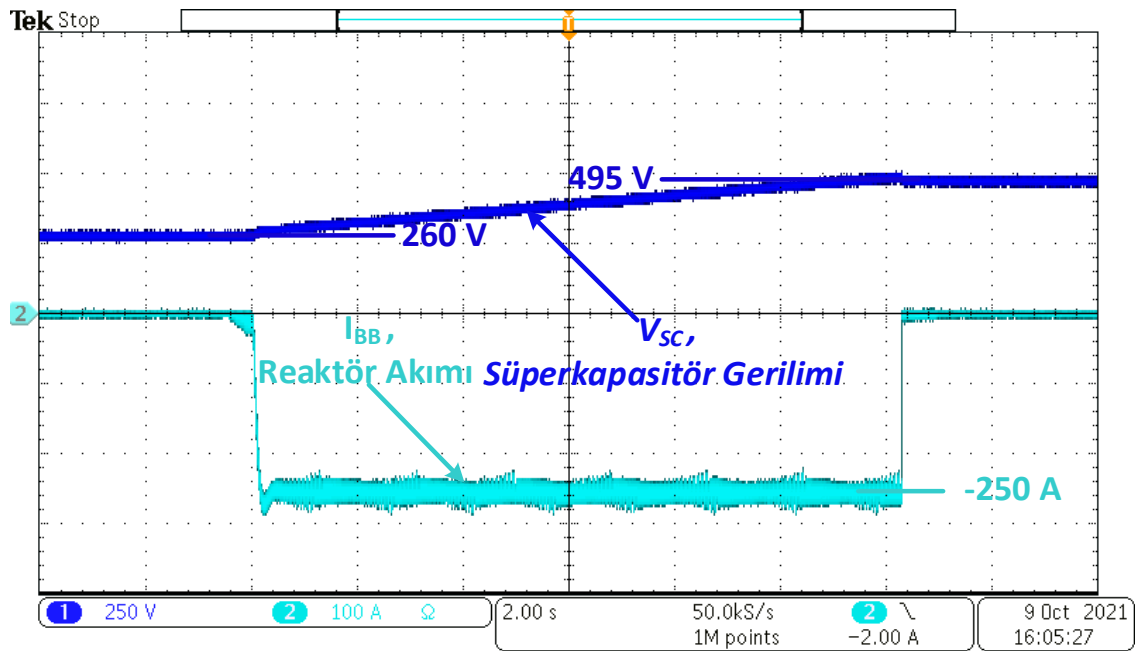
Şekil 4.14. İndirici-Yükseltici Reaktörün Bode Analizör Ölçüm Sonucu, (1) Empedans, (2) Endüktans

Daha uzun süreli ölçümlerde bu salınım osiloskop üzerinde örtüşme (aliasing) hatasına yol açmaktadır. Bunu aşabilmek için süperkapasitör üzerinden gerilim ölçerken yüksek frekans salınımları filtreleyebileceğimiz yüksek frekansta kesimi olan bir 100  $\mu$ F değerinde bir kapasitör süperkapasitör girişlerine bağlanmış ve bu kapasitör üzerinden ölçümler alınmaya devam edilmiştir.

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilen süperkapasitör ölçümleri limit akımla şarj ve deşarj esnasında ortaya çıkan anahtarlama gerilim ve akımlarını anlayabilmek için alınmış bir kaç anahtarlama periyodu uzunluğundaki ölçümlerdir. Bu ölçümlerin daha uzun kayıtlarını alabilmek amacıyla osiloskop bir şarj veya deşarj periyodunu ölçecek şekilde ayarlanmıştır. Süperkapasitörün limit akımıyla deşarj ve şarj ölçüm grafikleri Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da sırasıyla verilmiştir. Bu ölçümler sistemin limit akımda başarılı bir şekilde çalıştığını anlayabilmek amacıyla yapılmıştır.



Şekil 4.15. Süperkapasitörün Limit Akımla Deşarj Edilişi, (1) Süperkapasitör Gerilim ve (2) Süperkapasitör Akım Grafikleri



Şekil 4.16. Süperkapasitörün Limit Akımla Şarj Edilişi, (1) Süperkapasitör Gerilim ve (2) Süperkapasitör Akım Grafikleri

Grafiklerden anlaşılacağı üzere, süperkapasitörün limit akımla bir deşarj veya şarj periyodu 16 ile 18 s civarında süreler almaktadır. Sonraki bölümde bu bölümde alınan ölçümlerin ciddi etkisi olmuştur. Şarj ve deşarj akımı 250 A'den hızlı bir şekilde başladığı ve kesildiği için süperkapasitörün eş değer seri direncinin

üzerindeki gerilim düşümünü akım başladığında ve kesildiğinde belirgin şekilde gerilim farkları ile görüyoruz. Burada Şekil 4.15'te gösterilen yükseltici kip ölçümünde deşarjın 280 V'a kadar olması bu güç seviyesinde Bölüm 2.1.3'te basedilen  $D_{max}$  değerinin yüksek güç altında 0.636 değerine kadar düştüğünü göstermektedir. Ayrıca yine indirici kiplemede süperkapasitörün şarj edildiği gerilimin 495 V olması ise süperkapasitör gerilimi 505 V'u gördüğünde akımın direkt olarak kesilip eş değer seri direnç üzerine düşen gerilimin akım kesildiğinde ortadan kalkması sonucudur.

### **4.3.3 Süperkapasitör Enerji Depolamalı Sistemle Yol Senaryoları Ölçümleri**

Bölüm 3.2'de yapılan süperkapasitörle ilgili yapılan yol senaryosu benzetimleri fiziksel simülatör sistemindeki kısıtlar gözönüne alınarak yapılmıştır. Tüm ölçümlerde motor çıkış tepe gücü 125 kW olarak alınmıştır. Bu kısıtların büyük bir kısmının gerçek olduğu fiziksel simülatörden alınan yol senaryosu sonuçları ile gösterilmiştir.

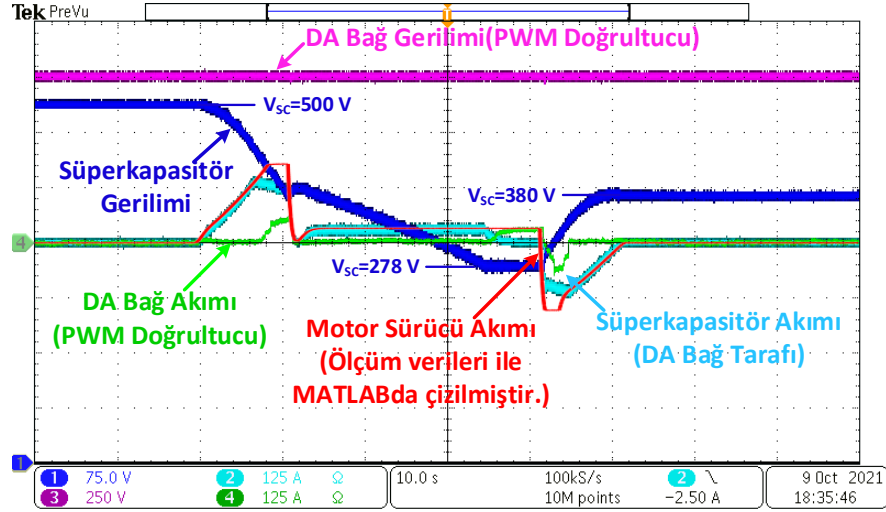
Farklı yol senaryoları için gerçeğe çok yakın sonuçların alındığı, eğimin, ve yaklaşık olarak aynı sürtünme ve yüklerin oluşturulabildiği fiziksel simülatör üzerinden 4 farklı koşul için ölçüm alınmıştır.

Birincil olarak süperkapasitörün geriliminin imkan verilen en düşük seviyesine kadar deşarj edildiği 550 m'lik eğimsiz yol koşulları oluşturularak sistem çalıştırılmış; çalışma esnasında osiloskop üzerinden süperkapasitöre dair ölçümler alınmıştır. Mekanik ve diğer elektriksel ölçümler ise MATLAB/Simulink aracılığıyla oluşturulan denetim ve kayıt arayüzü ile uzun süreli kayıtlardan çeşitli hesaplama ve düzenlemeler yapılarak MATLAB'da çizdirilmiştir.

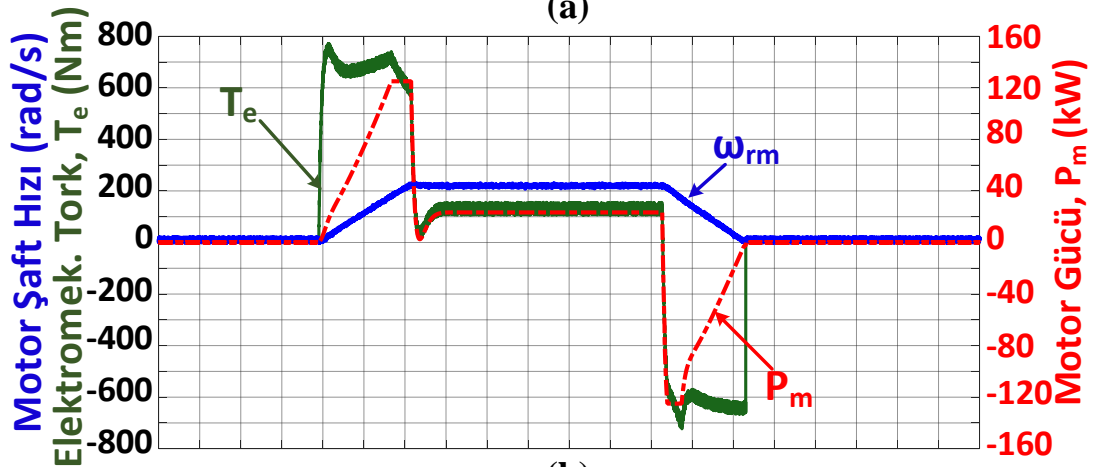
Şekil 4.17 (a)'da verilen osiloskop ölçümlerinden görüleceği üzere süperkapasitör 278 V'a kadar deşarj edilebilmiştir. Bu senaryoda süperkapasitörü 250 V'a kadar deşarj etmek için birden fazla deneme yapılmış ancak benzetimlerde hesaba katılamayan reaktörün manyetik kayıpları, kablaj ve kontaktörlerden kaynaklı dirençler yükseltici çevirgeç kipinde ulaşabileceğimiz çevrim oranının değişmesine sebep olmaktadır; bunun yanında ölçüm aldığımız sensörlerin ve denetim platformumuzdan kaynaklı ölçüm farklılıkları da bu durumun

sebeplerinden biri olmuştur. Şekil 4.17'de verilen ölçümlerden anlaşılacağı üzere süperkapasitör deşarj olana kadar motorun gücünü sağlamış, girişten çekilen güç miktarı sınırlı kalmıştır. Ancak burada frenleme başlangıcında süperkapasitör akım sınırına dayandığı için motorun ürettiği frenleme enerjisi ciddi bir oranda hatta geri basılmış, süperkapasitör tamamını üzerinde depolayamamıştır.

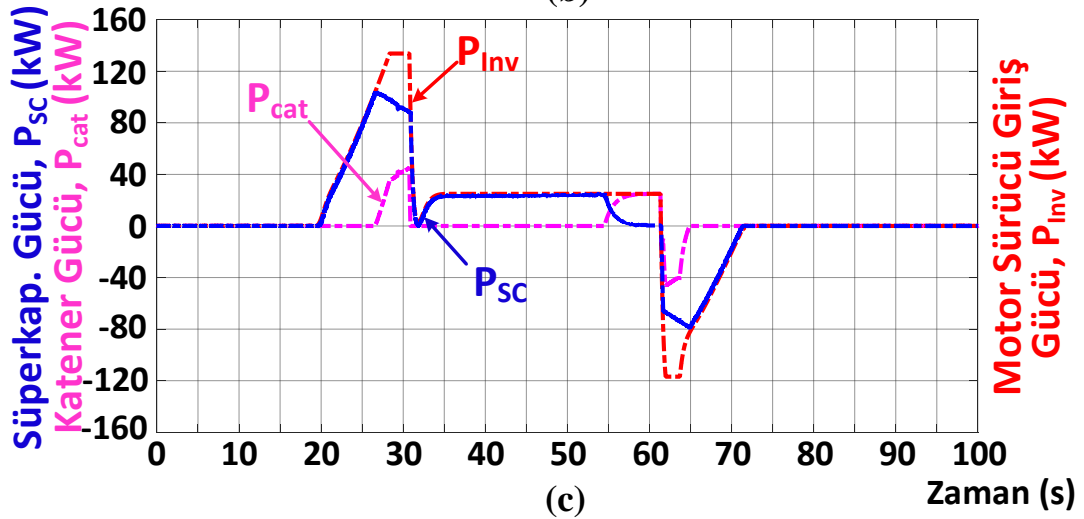
İkinci olarak süperkapasitörün yine aynı şekilde deşarj edildiği, ve bu yolun gerçekteki eğim koşullarının olduğu senaryosu çalıştırılmıştır. Bu koşul altında alınan sonuçlar ise Şekil 4.18'de verilmiştir. Eğimin negatif olduğu durumda frenleme yapıldığı için süperkapasitör üzerinde depolanan ve geriye basılan enerjinin daha fazla olduğu osiloskop ölçümlerinden de görülmektedir. Eğimden kaynaklı tork değişimleri ve bunlara bağlı hız değişimleri de dikkatli incelendiğinde bu grafiklerden anlaşılmaktadır.



(a)

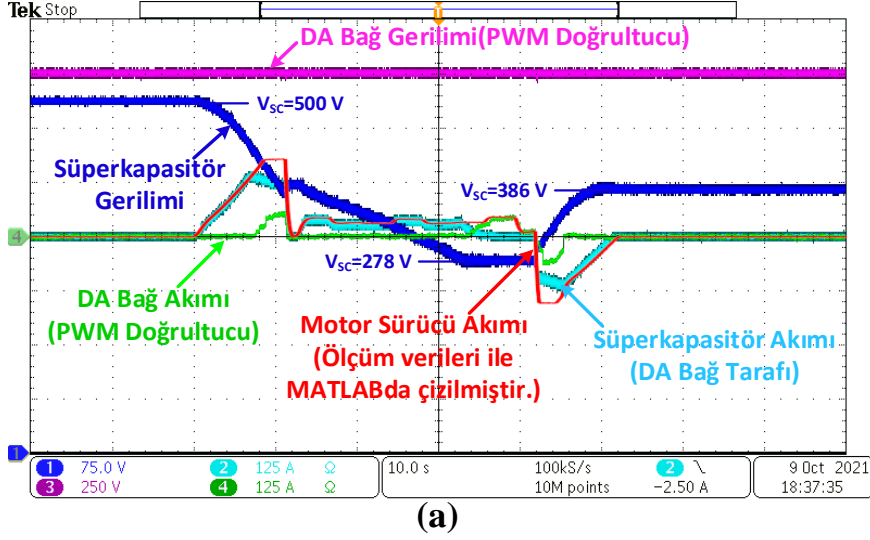


(b)

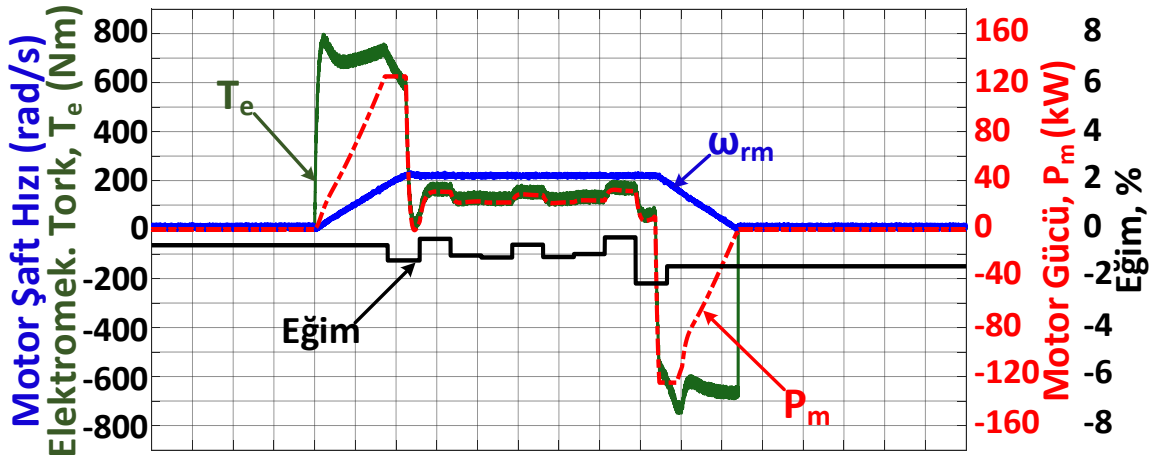


(c)

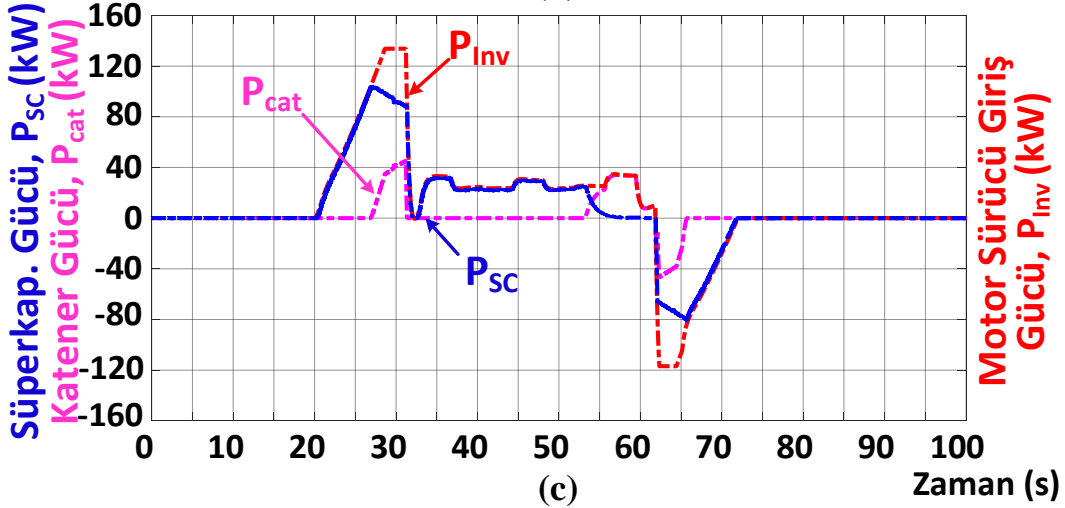
Şekil 4.17 Süperkapasitörün En Düşük Olabileceği Değere Kadar Deşarj Edildiği Düz Yolda Çalıştırılan Enerji Geri Kazanımı Senaryosunda (a) Osiloskop ile Ölçülen (1) Süperkapasitör Gerilimi, (2) Çift Yönlü Çevirgeç Giriş Akımı, (3) DA Bağ Gerilimi, (4) DA Bağ Akımı, ve MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen Motor Sürücü Giriş Akımı (b) MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen Motor Torku, Hızı ve Gücü, (c) MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen ve Hesaplanan Katener Gücü, Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü



(a)



(b)



(c)

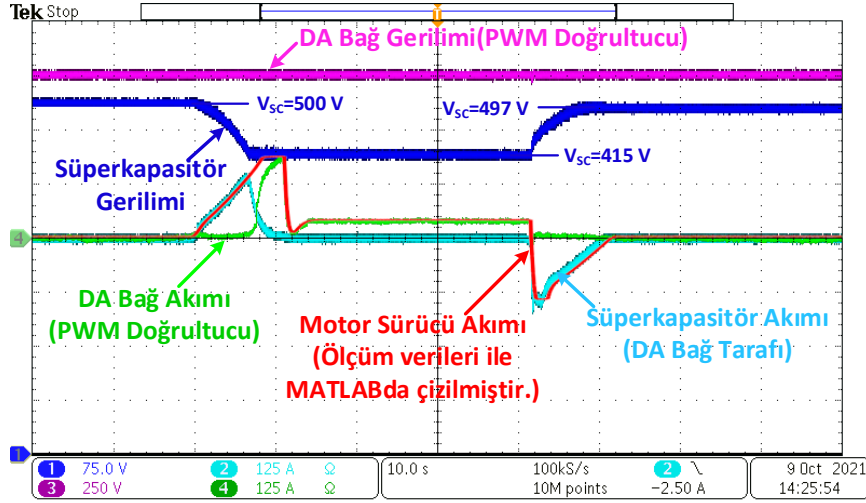
Şekil 4.18. Süperkapasitörün En Düşük Olabileceği Değere Kadar Deşarj Edildiği Eğimli Yolda Çalıştırılan Enerji Geri Kazanımı Senaryosunda (a) Osiloskop ile Ölçülen (1) Süperkapasitör Gerilimi, (2) Çift Yönlü Çevirgeç Giriş Akımı, (3) DA Bağ Gerilimi, (4) DA Bağ Akımı, ve MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen Motor Sürücü Giriş Akımı (b) MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen Motor Torku, Hızı ve Gücü, (c) MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen ve Hesaplanan Katener Gücü, Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü

Üçüncü olarak Bölüm 3.2.5'te belirtilen algoritma çalıştırıldıktan sonra bu veriler ile fiziksel simulatör üzerinde çalıştırılmıştır. Süperkapasitörün azami enerji depolayabileceği gerilime kadar deşarj edilmiş ve frenleme torkunun süperkapasitörün enerjinin tamamına yakınına depolayabileceği şekilde oluşturulduğu durumun ölçümleri alınmıştır. Süperkapasitör gerilim ve akımlarının osiloskop ile, güç ve mekanik verilerin ise MATLAB/Simulink aracılığıyla alındığı ölçüm çıktıları Şekil 4.19'da verilmiştir. Burada, 278 V'a kadar deşarj edilen duruma göre katener hattından daha fazla enerji çekilmektedir ancak frenleme esnasında süperkapasitörün üzerine aldığı enerji daha fazla olduğundan süperkapasitör daha etkin kullanılmış olmaktadır.

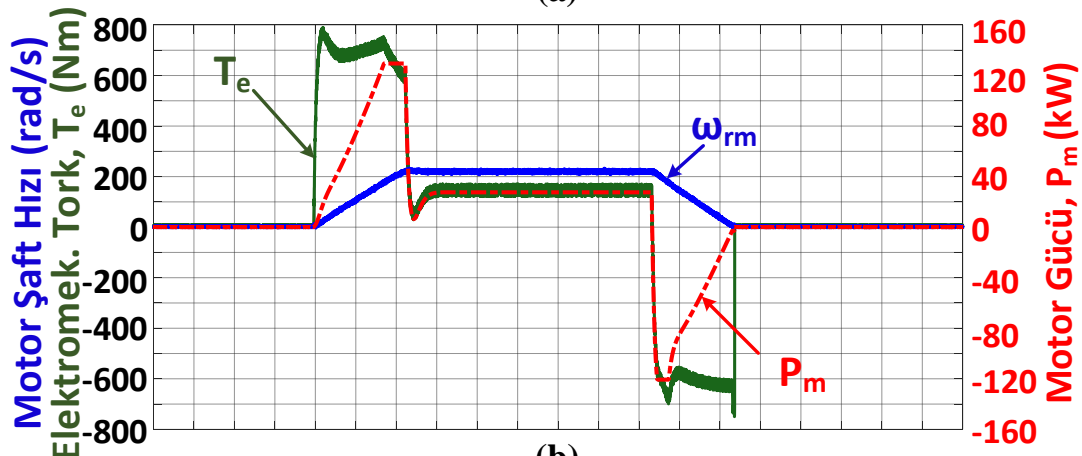
Son olarak süperkapasitörün azami enerji depolayabileceği gerilime deşarj edildiği durum negatif eğimli gerçek yol üzerinde denenmiş ve sonuçları Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Buradaki grafikler incelendiğinde benzetimlerde çıkan sonuçlara paralel negatif eğimli yolda süperkapasitör kullanımının etkinliğinin daha öne çıktığı görülmektedir. Bunun yanında Şekil 4.20 (c)'de gözlenebilen azami enerji depolama için frenleme torku profili uygulanmış ve enerji depolama esnasında katener hattı modeline geri verilen enerji asgari düzeyde kalmıştır.

Burada alınan ölçümler yapılan benzetim çalışmalarıyla benzer sonuçlar vermiş ve depolanan enerjiler çok yakın çıkmıştır. Mekanik ölçümler benzetimlerden bir miktar farklılık gösterse de sonuç olarak ortalama olarak elektriksel ölçümlere yansımaları çok sınırlı kalmış, süperkapasitör enerji depolama sisteminde esas ölçümlerin ve süperkapasitör gerilimlerinin çok farklılık göstermediği ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan ufak farkların süperkapasitörlerin üretiminde ortaya çıkan ve zamanla belirli sınırlar dahilinde değişebilen kapasitans farklılıklarından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

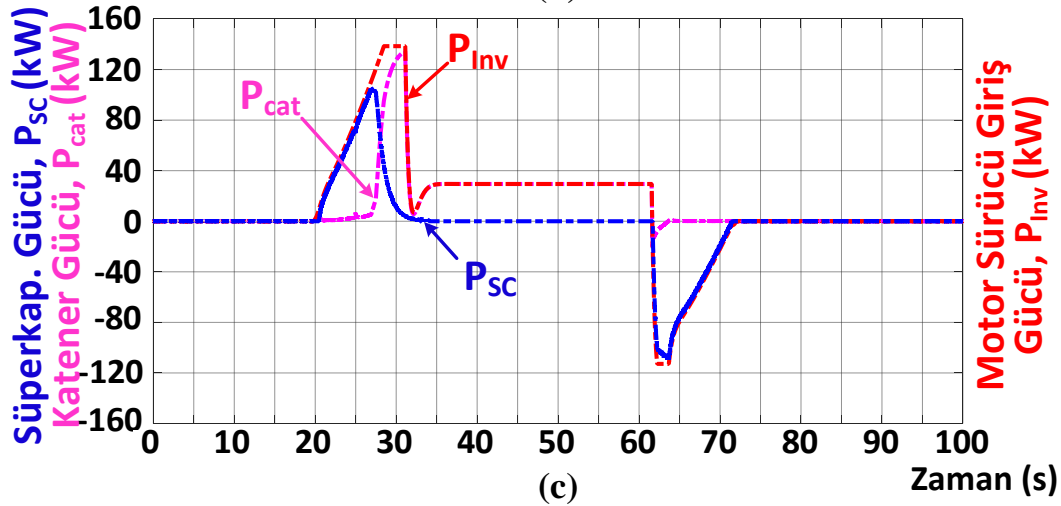




(a)

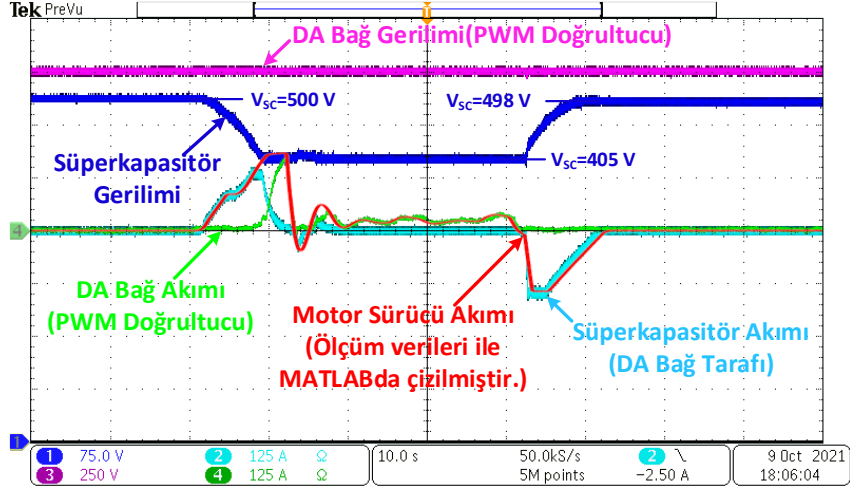


(b)

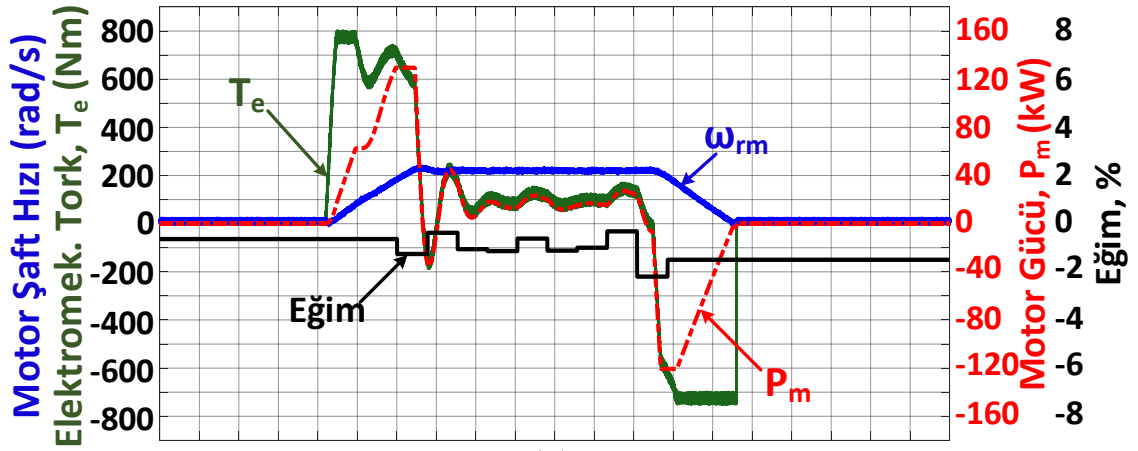


(c)

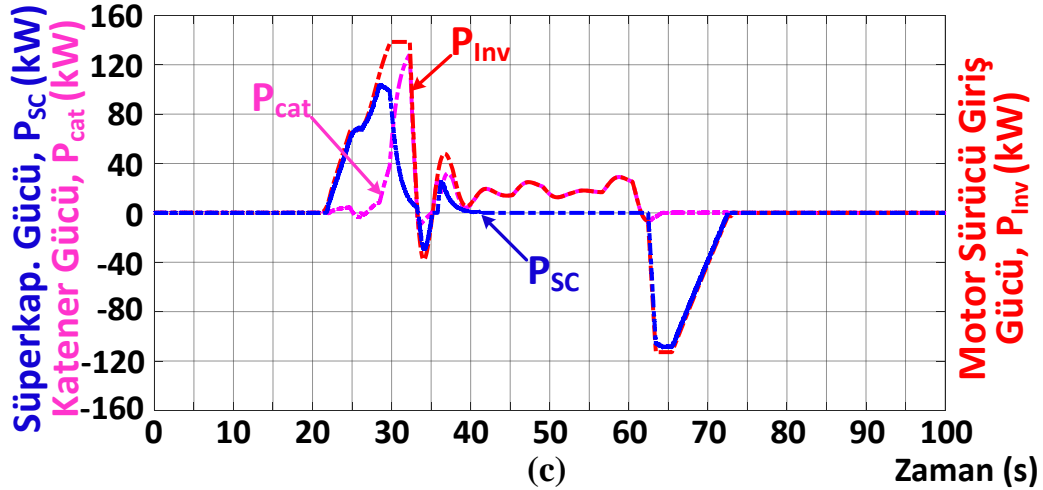
Şekil 4.19. Süperkapasitörün Azami Enerji Depolayabileceği Değere Kadar Deşarj Edildiği Düz Yolda, Frenleme Tork Profili ile Çalıştırılan Enerji Geri Kazanımı Senaryosunda (a) Osiloskop ile Ölçülen (1) Süperkapasitör Gerilimi, (2) Çift Yönlü Çevirgeç Giriş Akımı, (3) DA Bağ Gerilimi, (4) DA Bağ Akımı, ve MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen Motor Sürücü Giriş Akımı (b) MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen Motor Torku, Hızı ve Gücü, (c) MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen ve Hesaplanan Katener Gücü, Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.20. Süperkapasitörün Azami Enerji Depolayabileceği Değere Kadar Deşarj Edildiği Eğimli Yolda, Frenleme Tork Profili ile Çalıştırılan Enerji Geri Kazanımı Senaryosunda (a) Osiloskop ile Ölçülen (1) Süperkapasitör Gerilimi, (2) Çift Yönlü Çevirgeç Giriş Akımı, (3) DA Bağ Gerilimi, (4) DA Bağ Akımı, ve MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen Motor Sürücü Giriş Akımı (b) MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen Motor Torku, Hızı ve Gücü, (c) MATLAB/Simulink Arayüzünden Ölçülen ve Hesaplanan Katener Gücü, Süperkapasitör Gücü ve Motor Giriş Gücü

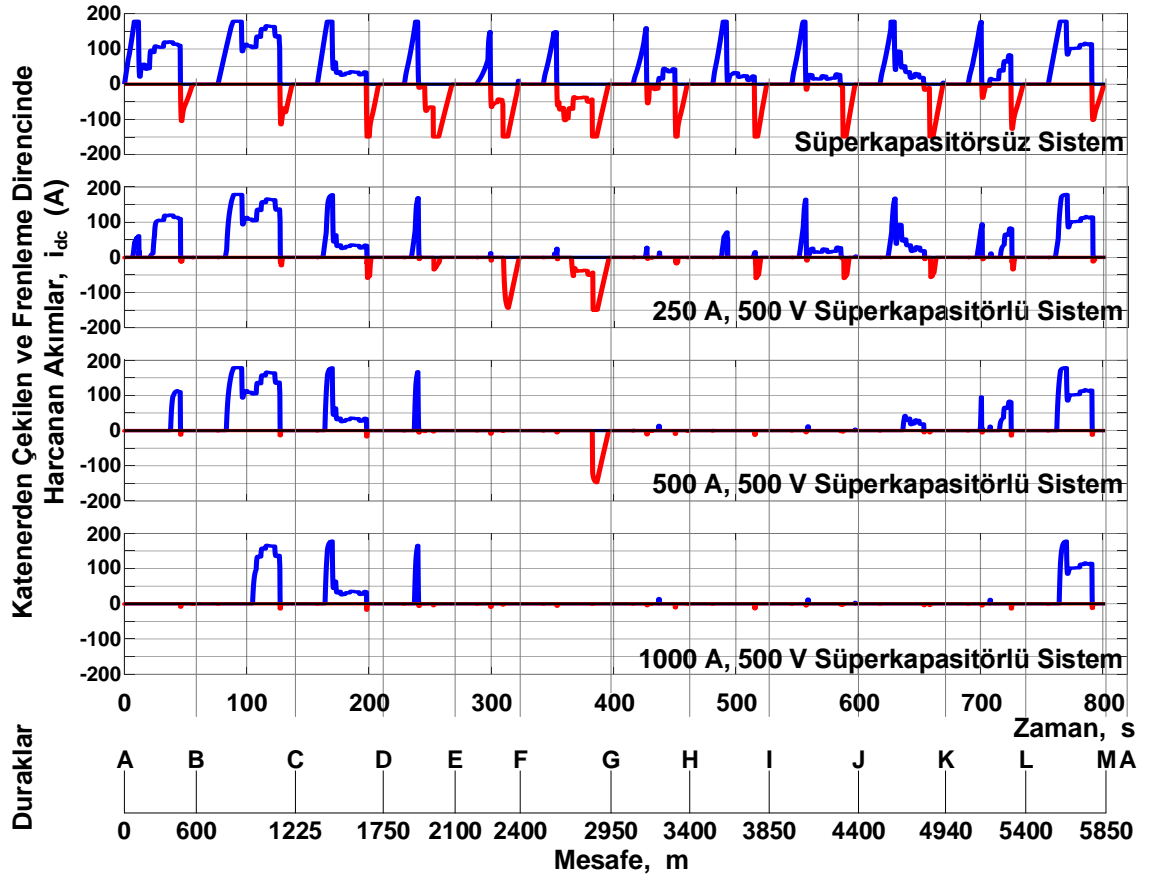
## 5. ELDE EDİLEN SONUÇLARI KARŞILAŞTIRMA VE TARTIŞMA

Bu bölümde doktora çalışmaları boyunca yapılan çalışmalarda gerçek parkur koşullarında alınan benzetim ve ölçüm sonuçları hem birbirleriyle hem de kendi içinde karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar üzerine çıkarımlar ve yorumlar yapılmıştır. Benzetim yaparken altyapı ihtiyacı olmadığı için laboratuvar koşullarında yapılamayacak benzetimler de yapılabilmektedir. Laboratuvarda kurulmuş olan düzeneğe ile düzeneğe aynı özelliklere sahip benzetim çalışmalarının sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçların tutarlı olduğu gösterilmiştir.

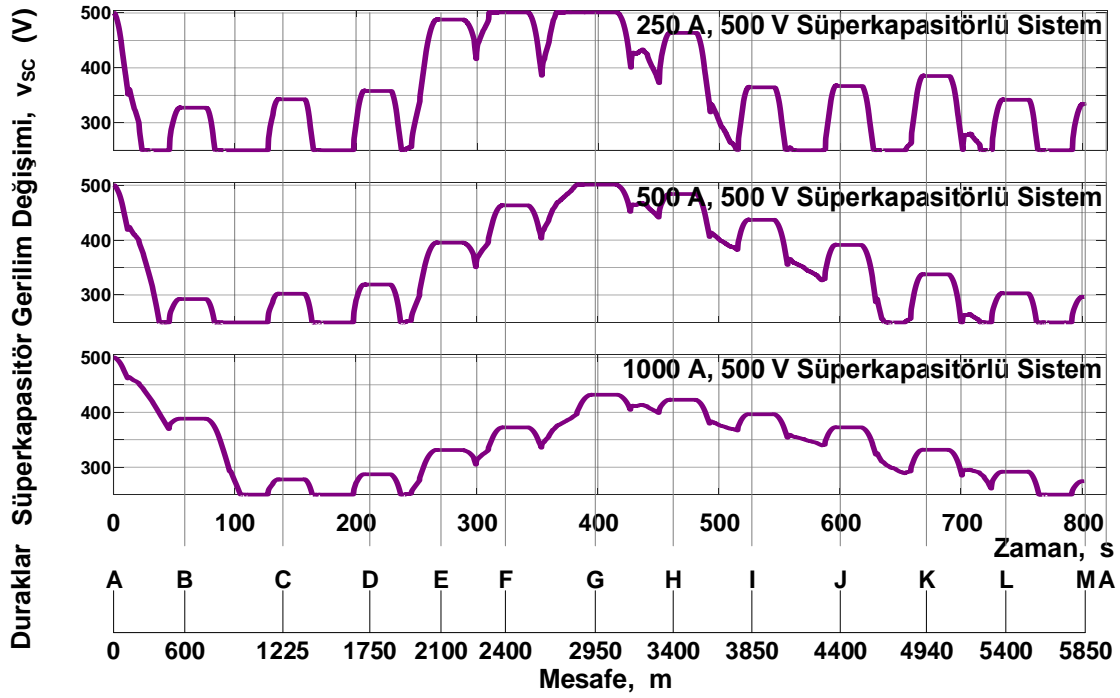
### 5.1 Benzetim Çalışmalarıyla Farklı Boyuttaki Süperkapasitörlerin Karşılaştırılması

Bu kısımda benzetim çalışmalarıyla sistem tasarımında kullandığımız ve laboratuvarda kurulumunu yapılan motor başına (4 seri) 250 A, 500 V, 15.75 F'lık süperkapasitör bankasıyla yaptığımız benzetimler, süperkapasitör bankası kullanılmayan durum ve (4 seri, 2 paralel) 500 A, 500 V, 31.5 F'lık ve (4 seri, 4 paralel) 1000 A, 500 V, 63 F'lık süperkapasitör bankasına sahip benzetimler ile karşılaştırılmıştır. Bu benzetimlerde süperkapasitörün 250 V değerine kadar her koşulda deşarj edilmesine izin verilmiştir. Ayrıca bununla birlikte süperkapasitör bankaları ilk durakta tam dolu olarak (500 V) başlatılmış, son durakta ise hangi seviyeye geldiyse o seviyede bırakılmıştır.

Burada yapılan çalışmalarda en önemli bulgu katener hattından motor başına çekilen akım grafiklerindeki değişikliklerdir. Buna göre Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'te sırasıyla süperkapasitör bankası boyutuna göre katenerden çekilen akım ve süperkapasitör gerilim değişimleri verilmiştir.



Şekil 5.1 Gerçek Yol Koşullarında Katenerden Akım Değerleri (Mavi Çizgiler Katenerden Çekilen Akım, Kırmızı Çizgiler Frenleme Direncinden Harcanan Akım)



Şekil 5.2 Gerçek Yol Koşullarında Katenerden Akım Değerleri (Mavi Çizgiler Katenerden Çekilen Akım, Kırmızı Çizgiler Frenleme Direncinden Harcanan Akım)

Grafiklerden anlaşıldığı ve beklenildiği üzere süperkapasitörün olduğu durumda tüm kapasite miktarlarında frenleme direncine yönlendirilen akım miktarı azalmaktadır. Bu da, süperkapasitör kullanımında kapasite ne olursa olsun enerji tasarrufu elde edileceği anlamına gelmektedir. Motor başına süperkapasitör sayısını arttırdığımız her durumda ise frenleme direncine giden akım azalmaktadır; bunun yanında katenerden çekilen ortalama akım miktarı da azalmaktadır.

Çizelge 5.1’de görüldüğü üzere katenerden çekilen ortalama akım değeri Süperkapasitör boyutu büyüdükçe ciddi anlamda küçülmektedir. Burada çekilen akımın azalması iki olumlu sonuç getirmektedir. Birincisi katener hattında kaybedilen güç miktarı çekilen akımın karesi ile doğru orantılıdır. Katener hattından çekilen akım azaldıkça hat üzerinde kaybedilen güç de ciddi oranda azalacaktır. İkincisi ise katenerden çekilen akım azaldıkça hat gerilimindeki regülasyon da artacaktır. Ayrıca yine frenleme direncinde yönlendirilen akımın süperkapasitör boyutu büyüdükçe azaldığı açıkça görülebilmektedir. Bu sayede frenleme direncinin boyutu da küçültülebilecektir.

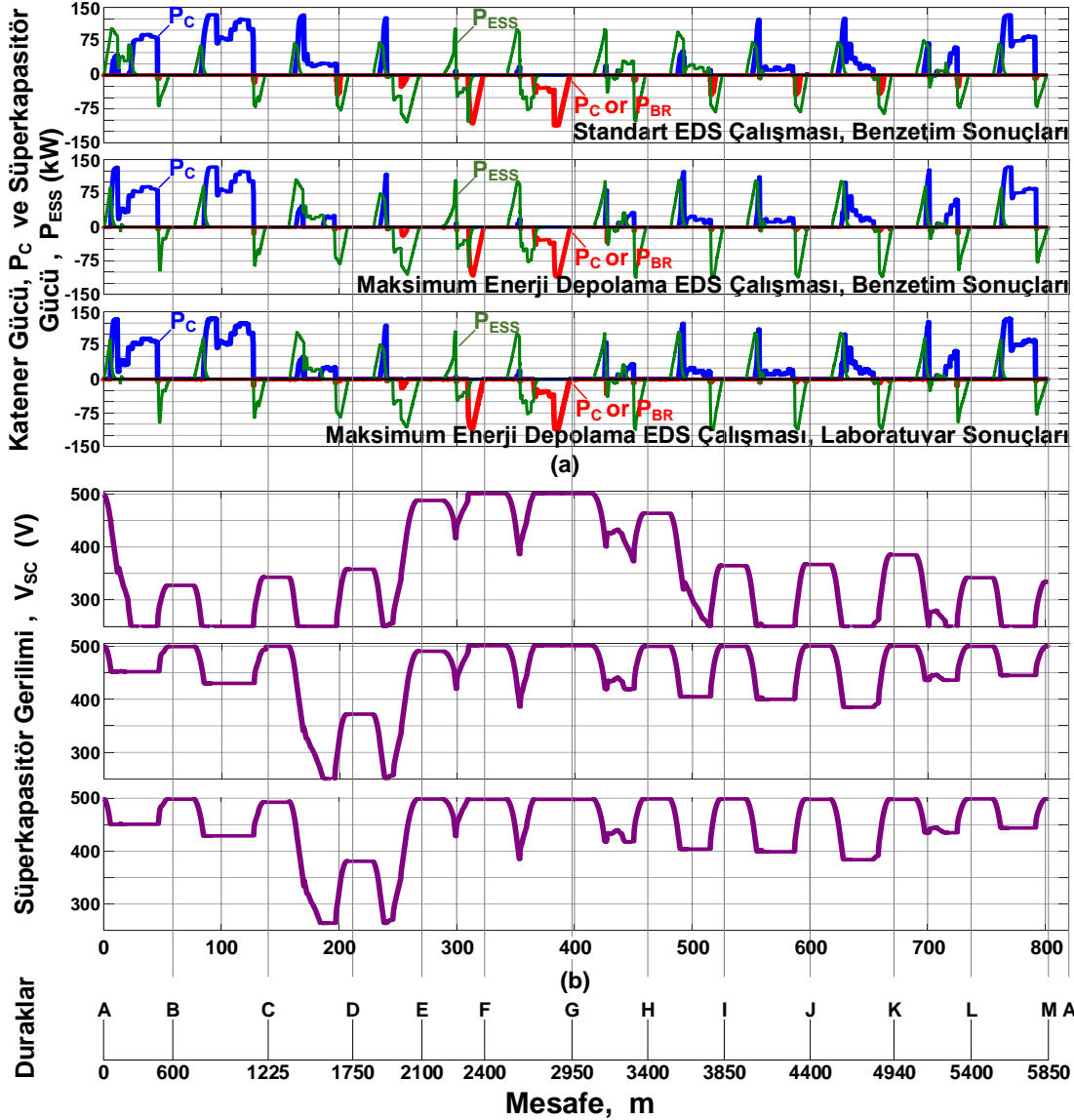
Çizelge 5.1 Süperkapasitör Kapasitesine Göre Katenerden Çekilen ve Frenleme Direncine Verilen Ortalama Akım Değerleri

Süperkapasitör Kapasitesi	Katenerden Çekilen Ortalama Akım (A)	Ortalama Frenleme Direnci Akımı (A)
Süperkapasitör Yok	35.63	17.08
250 A, 500 V, 15.75 F	22.68	4.91
500 A, 500 V, 31.5 F	16.97	1.57
1000 A, 500 V, 63 F	10.53	0.07

## 5.2 Enerji Geri Kazanımı Maksimizasyonu Algoritmasının Standart Kullanım ile Kıyaslanması ve Benzetim ve Laboratuvar Çalışmalarının Karşılaştırılması

Bu kısımda üç durum ikili olarak birbirileri içerisinde kıyaslanmaktadır. Birinci kıyaslama 250 A, 500 V, 15.75 F'lık Süperkapasitör EDS sisteminin tüm yol boyunca standart kullanımı ile enerji geri kazanımı maksimizasyonu algoritması uygulanarak kullanımı arasındaki enerji geri kazanımı arasındaki fark; ikinci kıyaslama ise enerji geri kazanımı maksimizasyonu uygulanan benzetim ile laboratuvar çalışmaları arasındaki farklılıklardır.

Şekil 5.3'te gerçek parkur koşullarında 250 A, 500 V, 15.75 F'lık Süperkapasitör EDS ile 2 farklı kullanım için kıyaslama yapılmıştır. Standart kullanım ile enerji geri kazanımı maksimizasyonu algoritması ile kullanım arasında özellikle frenleme direncinde harcanan gücün azaldığı gözükmemektedir. Daha önce Bölüm 3.2.3 ve 3.2.5'te anlatıldığı üzere frenleme direncinde harcanan gücün enerji geri kazanımı maksimizasyonu ile azalması esasen frenleme başladığında süperkapasitörün gerilimi ile doğrudan ilişkilidir. Ayrıca burada frenleme torkunu da belirli bir profil ile uyguladığımız için motorda üretilen tüm güç kayıplar hariç Süperkapasitör EDS'ye aktarılabilir.



Şekil 5.3 Gerçek Parkurda 250 A, 500 V, 15.75 F'lık Süperkapasitör Bankası ile Standart EDS Çalışması ile Maksimum Enerji Depolama Algoritması Kullanılan EDS Çalışmasının Karşılaştırılması; Maksimum Enerji Depolama Algoritması Kullanılan Benzetim ile Laboratuvar Çalışmasının Karşılaştırılması, a) Katener Hattından Çekilen Güç (Mavi) ve Frenleme Direncine Verilen Güç (Kırmızı) ve Süperkapasitörün Sisteme Aktardığı ve Sistemden Aldığı Güç (Yeşil), b) Süperkapasitör Gerilim Değişimi.

Grafiklerde gösterildiği üzere Süperkapasitör gerilimi frenleme bittiğinde enerji maksimizasyonu algoritması uygulandığı durumda 500 V olurken, standart kullanım durumunda ise yokuş aşağı sürüş yok ise 500 V'un altında seyir izlemiştir. Ayrıca parkur başlangıcındaki gerilim 500 V olduğu düşünüldüğünde parkur başlangıcından tekrar çalışmaya başladığında yine katener üzerinden şarj edilmesi gerekliliği doğmaktadır. Bu durum enerji maksimizasyonu algoritması

uygulandığında yaşanmamakta, hemen hemen her durumda Süperkapasitör gerilimi 500 V ile bitmekte ve başlangıçta 500 V ile başlayarak daha çok güç verebilmektedir.

Çizelge 5.2 incelendiğinde enerji tüketimi ve enerji tasarruf miktarları üzerinden durum daha net anlaşılabilir. Bu çizelgede Bölüm 5.1’de bahsedilen Süperkapasitör miktarları ve farklı kütleli yüklerde nasıl bir durum ortaya çıktığı gösterilmektedir.

Çizelge 5.2 Süperkapasitör Kapasitesi, Araç Yüğü ve Operasyon Türüne Göre Enerji Tüketimleri, Rejenerasyon Yapılan, Depolanan ve Harcanan Enerji ve Enerji Tasarrufu

Süperkapasitör Kapasitesi	Araç Yüğü	Operasyon Türü	Katenerden Çekilen Enerji $E_{in}$	EDSde Depolanan Enerji $E_{sc}$	Frenleme Direncinde Harcanan Enerji $E_{br}$	Enerji Tasarrufu
EDS Yok	AW3	U/D	21868 kJ	U/D	10487 kJ	0
250 A, 500 V, 15.75 F	AW3	Standart	15009 kJ	7074 kJ	3009 kJ	31.37%
500 A, 500 V, 31.5 F	AW3	Standart	12967 kJ	9030 kJ	967 kJ	40.70%
1000 A, 500 V, 63 F	AW3	Standart	11960 kJ	9915 kJ	41 kJ	45.31%
250 A, 500 V, 15.75 F	AW3	Optimize	13373 kJ	8059 kJ	2336 kJ	38.85%
500 A, 500 V, 31.5 F	AW3	Optimize	11891 kJ	9595 kJ	912 kJ	45.62%
250 A, 500 V, 15.75 F	AW3	Optimize, Laboratuvar	13992 kJ	7455 kJ	2952 kJ	36.02%
EDS Yok	AW1	U/D	19793 kJ	U/D	8103 kJ	0
250 A, 500 V, 15.75 F	AW1	Optimize	13725 kJ	6272 kJ	774 kJ	30.66%

Bu çizelgede anlatılan enerji tasarrufu hesabı şu şekilde yapılmıştır:

$$\text{Enerji Tasarrufu} = \frac{E_{in}(\text{EDS Yok}) - E_{in}(\text{EDS Var})}{E_{in}(\text{EDS Yok})} \times 100\% \quad (5-1)$$

Bu denklem esasen Süperkapasitör EDS üzerinde depolanan enerji miktarını üzerinden de yapılabilir ancak çevirgeçlerin, pasif elemanların ve



Süperkapasitörün kendi üzerindeki kayıplar açısından doğru bir kıyaslama olmazdı. Bu sebeple katener hattındaki net enerji tüketimi bize enerji tasarrufunu en doğru şekilde vereceğini düşünülmüştür; bu durum literatürde de benzer şekilde kıyas yapılmıştır.

Bu tablodaki yüzde (%) kıyaslama esasen tüm benzetim ve laboratuvar çalışmalarını tek bir motor sürücü üzerinden yaptığımızı düşündüğümüzde tüm sistemin de yüzde (%) olarak tasarrufunun çıkarılmasını sağlamaktadır.

Tüm durumları ikili olarak kıyasladığımızda:

- Süperkapasitör EDS'nin olmadığı durum ile Süperkapasitör EDS'nin olduğu tüm durumlar arasında ciddi bir enerji tasarrufu oluşmaktadır.
- Süperkapasitör kapasitesini arttırdığımız durumda enerji tasarrufu artmaktadır.
- Süperkapasitör kapasitesi aynı olan iki durum için optimize algoritmayı kullandığımız senaryoda standart kullanım senaryosuna göre ciddi bir enerji tasarrufu elde edilmektedir. Optimize senaryo kullanıldığında standart senaryonun bir üst kapasitesine yakın bir tasarruf elde edilmektedir.
- Labortuvar sonuçlarıyla benzetim sonuçlarının arasındaki fark Şekil 5.3b'de görüldüğü üzere süperkapasitör gerilimini gerçek senaryoda 268 V'un altına indirememizden ve bunun dışında ölçüm kalibrasyonumuzun eksik olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Süperkapasitör gerilim ölçümünde kullanılan sensörün 500 V seviyesinde yaklaşık 2 V eksik ölçmesi ve normalde olan 500 V süperkapasitör üst sınırının 498 V'ta kalmasına sebep olmaktadır.
- Bunun yanında laboratuvarında test edemediğimiz yük koşulumuz olan AW1 için de optimize senaryo ile bir benzetim koşturulmuş ve bu parkurda normal koşullarda AW1 yük ile de %30'un üzerinde enerji tasarrufu yapılacağı gösterilmiştir.

### 5.3 İlk Kurulum Maliyeti ve Enerji Fiyatlarına Göre Maliyet Çıkarım Süresi

Bu bölümde sistemin malzeme maliyeti üzerinden sistemin ilk yatırım maliyetini kaç senede çıkaracağı üzerine bir tartışma yapılmıştır.

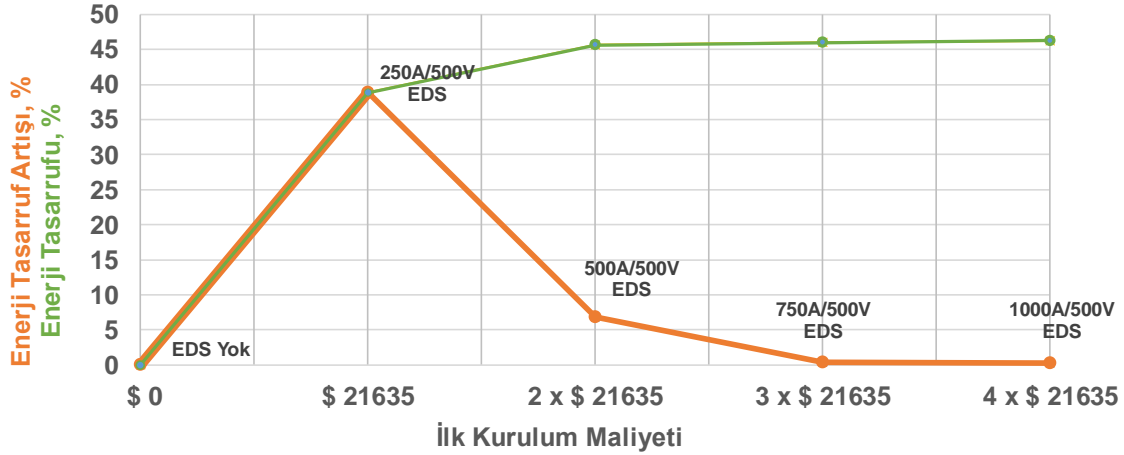
Bilindiği üzere kurulu veya kurulacak olan raylı araç sistemlerinde Süperkapasitör EDS kurulumu sistemin tamamı üzerine ciddi bir maliyet getirecek ve bu maliyet karşılığında sistemin bu yatırım maliyetini müşterisi olacak işletme belirli bir sürede çıkarmak isteyecektir. Bu analiz özellikle çoğu müşteri kuruluş için ciddi bir öngörü sunacaktır.

Çizelge 5.3'te verilen malzeme maliyetleri yaklaşık malzeme maliyetleri olup bir adet sistem kurulumu üzerinde verilmiştir. Bu zamana kadar faturaları proje bütçesinde kesilen tüm ürünlerin fiyatları faturalar üzerinden verilmiş, bazı malzemeler için fiyat güncellemesi yapmak amacıyla internet fiyat araştırması yapılmıştır. Bu sonuca göre mekanik kutu ve bazı mekanik parçalar hariç toplam malzeme maliyeti \$21635 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.3 Sistem Malzeme Maliyeti

Ürün	Adet	Fiyat	Toplam Maliyet
Süperkapasitör	4	\$4500	\$18000
Anahtarlama Elemanı (SiC MOSFET)	1	\$700	\$700
SiC MOSFET Sürücüsü	1	\$110	\$110
Lamine Bara	2	\$100	\$200
Filtre Reaktörü	1	\$575	\$575
Giriş Kapasitörü	1	\$505	\$505
Kontaktör (Yumuşak Açış)	1	\$175	\$175
Kontaktör (Anahat)	1	\$385	\$385
Direnç (Yumuşak Açış)	1	\$120	\$120
Direnç (Ana Hat)	1	\$115	\$115
Akım Algılayıcı	2	\$60	\$120
Gerilim Algılayıcı	2	\$115	\$230
Soğutucu Fin	1	\$400	\$400
<b>TOPLAM</b>			<b>\$21635</b>

İlk kurulum maliyetine göre Çizelge 5.2’te verilen tasarruf yüzdelerinin artışı Şekil 5.4’te grafik olarak verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde kurulum maliyeti artışı motor başına kullanılacak Süperkapasitör EDS miktarıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu grafikten anlaşılacağı üzere tasarruf yüzdesindeki artış kurulum maliyetinin artışıyla orantılı şekilde artmamaktadır. Frenleme optimizasyonu ile elde edilen maksimum enerji kazanımı 250 A / 500 V’luk bir süperkapasitör EDS kurulumu ile %38.8 gibi yüksek bir artış sağlamaktadır. Ancak EDS boyutunu iki katına ve dolayısıyla maliyeti de iki katına çıkarıp 500 A / 500 V’luk bir kurulum yapıldığında tasarruf yüzdesi 250 A / 500 V’luk duruma göre sadece %6.7’lik bir artış sağlamaktadır. Bundan daha fazla bir EDS kurulumu ilk maliyeti doğrusal olarak arttırmakta ancak enerji tasarruf yüzdesini arttırmamaktadır. Buradan anlaşılacağı üzere 250 A / 500 V’luk bir kurulum ilk kurulum maliyetini karşılama süresi X birim iken, 500 A / 500 V’luk bir kurulumun ilk kurulum maliyetini karşılama süresi 2X birimden biraz az olacaktır. Yine buradan anlaşılacağı üzere ilk kurulum maliyeti açısından incelendiğinde optimum boyutlandırma 250 A / 500 V’luk sistem kurulumu ile gerçekleşecektir.



Şekil 5.4 İlk Kurulum Maliyetine Göre Enerji Maksimizasyonu Yöntemiyle Tasarruf Artış Grafiği

İlk yatırım maliyetini çıkarma hesabı yapmak için bu fiyatların yanında tasarruf edilen enerji miktarının mali hesabının da yapılması gerekmektedir. Buna göre ülkemiz için 01.01.2022 tarihi itibariyle sanayi tüketici fiyatı kWh başına \$0.136 civarında seyretmektedir. Kuzey Avrupa ülkelerindeki kWh başına ücretlendirme ise 2021 sonu fiyatlandırmasına göre \$0.1 ile \$0.35 arası değişmekte olup

ortalama fiyat \$0.2 civarında çıkmaktadır. Yine Kuzey Amerika için 2021 sonu elektrik fiyatlar çok değişken olup kWh başına \$0.11 ile \$0.65 arasında değişmektedir.

Çizelge 5.2'de belirtilen değerler üzerinden hesaplama yapıldığında araç AW3 yükünde çalıştırıldığında, 12 duraklık seferinde standart kullanım için 6859 kJ, optimize kullanım için çalıştırıldığında simülasyon sonucunda 8459 kJ, laboratuvar ölçümü sonucunda 7876 kJ, ve AW1 yük altında çalıştırıldığında 6068 kJ enerji tasarrufu yapmaktadır. Araç 12 duraklık seferini Şekil 5.3'ten görüleceği üzere 15 dk civarında yapmaktadır. Buna 5 dakikalık ek süre koyduğumuz zaman saatte yaklaşık 3 kere parkur bitirilmektedir. Yine ilk seferin sabah 06.00'dan akşam 22.00'a kadar sürdüğü düşünüldüğünde günde 48 kere parkur dönülmektedir.

Bahsedilen süreler ve sefer sayıları dikkate alındığında AW3 yük altında standart kullanımda bir günde 91.5 kWh, optimize kullanımda simülasyona göre 112.7 kWh, laboratuvar ölçümüne göre 105 kWh, ve AW1 yük altında 81 kWh enerji tasarrufu yapılmaktadır.

Buradan çıkarımla günlük tasarruf miktarları Türkiye koşullarında:

- AW3 yük ile Standart kullanımda :  $91.5 \text{ kWh} \times 0.136 \text{ \$/kWh} = 12.44 \text{ \$}$
- AW3 yük ile Optimize kullanımda simülasyonda :  $112.7 \text{ kWh} \times 0.136 \text{ \$/kWh} = 15.32 \text{ \$}$
- AW3 yük ile Optimize kullanımda laboratuvar ölçümünde :  $105 \text{ kWh} \times 0.136 \text{ \$/kWh} = 14.28 \text{ \$}$
- AW1 yük ile Optimize kullanımda simülasyonda :  $81 \text{ kWh} \times 0.136 \text{ \$/kWh} = 11.02 \text{ \$}$  olarak hesaplanmaktadır.

Bu hesaplamalara göre sistem ilk kurulum maliyetini en iyi durumda 1412 günde (3.86 yıl), en kötü durumda ise 1963 günde (5.37 yıl) sürede çıkarmaktadır. Bu süreden sonra edilen tasarrufun tamamı işletmeye kâr olarak dönmektedir. Bu

sürelerin, elektriğin daha pahalı olduğu Kuzey Avrupa ve/veya Kuzey Amerika gibi bölgelerde çok daha kısa olacağı elektrik fiyatlarına bakıldığında anlaşılmaktadır. Süperkapasitörlerin şarj-deşarj çevrimleri 1,000,000'un ve ömürleri 10 yıldan fazla olduğundan ve sonrasında da kullanımı biraz düşük bir performansla devam ettiğinden kısa sürede işletmeyi kâra geçirebilmektedir.

## 6. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda şehir içi raylı sistemlerde kullanılabilen yeni nesil yarı-iletken kullanılan çift yönlü güç aktarabilen süperkapasitör tabanlı bir enerji depolama sistemi geliştirilmiş, doğrulanmış, farklı gerilim, akım ve güç seviyelerinde çalıştırılmıştır. Tez çalışmasının başlangıcında tüm enerji depolama sistemleri incelenmiştir. Şehir içi raylı sistemler için güç değişkenliğinin çok olduğu ve güç seviyelerinin yüksek olduğu göz önüne alınmış, süperkapasitörlerin enerji tasarrufunu azami miktarda sağlayabileceği sonucuna varılmış ve kullanımına karar verilmiştir.

Daha sonra, yarı-iletken teknolojilerindeki gelişmeleri uygulamak ve bunun avantajlarını ortaya çıkarmak amaçlanmıştır. Hali hazırda kullanılan IGBTler ile yeni nesil SiC güç MOSFET'leri el hesaplamaları ve ısı benzetimleri kullanılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Süperkapasitörün sürekli olarak 250 A akımda tam şarj veya deşarj durumu için IGBT ve SiC güç MOSFET için benzetim çalışmaları koşturulmuştur. Bu çalışmalar neticesinde 40 °C ortam sıcaklığında IGBT'nin eklem sıcaklığının 5 kHz anahtarlama frekansında 143 °C'yi gördüğü SiC güç MOSFET'in eklem sıcaklığının 10 kHz anahtarlama frekansında 125 °C'yle daha başarılı olduğu gösterilmiştir. Yine EDS'nin yarattığı tasarrufun yanında çok önemsenmese de IGBT tarafında 19 kJ kayıp oluşurken, SiC güç MOSFET'i tarafında 12 kJ ısı kayıp ile 7 kJ'lük bir enerji kaybı azalması görülmektedir. Ayrıca bu incelemelerde SiC güç MOSFET'lerinin kullanımının 10 kHz anahtarlama ile pasif elemanları küçülterek sistem boyutunu ve ağırlığını düşüreceği, ısı kayıpları azaltacağı, sistem verimini arttıracığı ve kullanılan aygıtların (SiC MOSFET, Süperkapasitör) ömrünü uzatacağı referanslar ile ortaya konmuştur.

Fiziksel simülasyon tasarımı ve laboratuvar kurulumu sonrasında çift yönlü güç aktarımı yapabilen çevirgeç ile Süperkapasitör tek başına çalıştırılmış, motor sürücü sistemine entegrasyonu için tüm doğrulamaları başarı ile geçmiştir. Daha sonrasında ise tüm sistemler birbirine bağlanmış ve motorun hızlanma, sabit hız sürüş ve yavaşlama evrelerinde süperkapasitörün denetimi için denemeler yapılmıştır.

Sistem alışmaları ile paralelde benzetim çalışmaları da devam etmiş ve bu çalışmalarda süperkapasitörün yarı gerilimine kadar boşaltıldığında elde edilen tasarrufun çok yüksek olmadığı, şebekeye veya frenleme direncine çok fazla frenleme enerjisinin aktarıldığı görülmüştür. Bu durumun, hali hazırda kullanılan şehiri raylı sistemlerde frenleme direncinde enerjiyi ısıya dönüştürmek olacağı bilinmektedir. Isıya dönüşen bu enerjiyi asgari düzeye, depolanan enerjiyi azami düzeye çıkartacak yöntemler araştırılmıştır. Literatürde enerji tasarrufunu, gerek araç kullanımını optimize ederek, gerekse denetlenecek girdileri (hız, araç sayısı, motor tarafından üretilen rejeneratif g vb.) değiştirerek, arttırmaya yönelik yöntemlere rastlanmış ancak süperkapasitörün frenleme başlangıcındaki gerilim seviyesinin üzerine alabileceği güç seviyesine etkisini inceleyen bir araştırmaya rastlanmamıştır. Süperkapasitör üzerinde depolanacak enerjiyi arttırmak adına bazı denemeler yapılmış ve aslında basitçe işlenebilen bir yöntem ile süperkapasitörün frenleme başladığında olması gereken gerilim seviyesinin bir optimum noktası olması gerektiği kanısına varılmıştır. Bu durumu uygulamak için bir çalışma yapılmış ve frenleme gücü ile süperkapasitörün gücünün denk olduğu yer analitik yöntemlerle çıkarılmıştır. Bu yöntem, başka ek bir yük getirmeden süperkapasitörün acil bir durum olmadığı durumlarda haricinde boşaltılması gerektiği (frenleme başlangıcındaki) gerilim seviyesini belirlemektedir.

Daha sonra, bu yöntemin eksik olan yönleri olduğunun farkına varılmış, eğimin değiştiği ve motor gücünün arttığı durumlarda eksiklerinin olduğu görülmüştür. Bu sebeple başka bir yöntem üzerinde daha çalışılmıştır. Bu yöntemde ise sistemin tüm elektriksel ve mekanik parametreleri rneklemeye zamanı üzerinden anlık olarak hesaplanmış ve adım adım giderek en fazla enerji depolamanın yapılabileceği bir frenleme tork profili çıkarılmıştır. Buna göre eğim derecesi, süperkapasitörün başlangıç gerilimi, motorun hızı, azami frenleme ivmesi gibi değerlerin hesaba katılarak bir önceki ve bir sonraki adımdaki değerler hesaba katılarak bir algoritma koşturulmuştur. Bu algoritma gerçek sisteme uygulandığında her durakta kalkış öncesi aracın kütlesini ölçüp koşturularak hem frenleme torkunu ayarlayabilme, hem de Süperkapasitörün frenleme başlangıcında olması gereken değeri bulabilmektedir. Özellikle negatif eğimin olduğu yollarda süperkapasitörü enerji depolamada daha etkin kullanmayı

sağlanmış, algoritmanın çıktıları önce benzetimlerde, sonrasında ise ölçümlerde kullanılarak yaklaşımın doğruluğu ve enerji tasarrufunu arttırdığı gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasındaki esas amaç olan enerji tasarrufu miktarı iki durak arası düz yolda süperkapasitör standart operasyon ile kullanıldığında % 30.7 olurken, bu oran tez içerisinde anlatılan enerji geri kazanımı maksimizasyonu algoritması ile koşturulduğunda % 37.8 olmuştur. Aynı şekilde hafif negatif eğimli (% -1'i aşmayan) bir yolda sırasıyla % 32.8 ve % 43.4 olmuştur. Buradan enerji geri kazanımı maksimizasyonu uygulandığında düz yolda % 7.1'lik bir enerji tasarruf artışı sağlanırken, hafif negatif eğimli yolda ise % 10.6'lık kayda değer bir enerji tasarrufu artışı olduğu görülmektedir. Yine bu algoritma tüm parkur boyunca yapılan çalışmada standart operasyonda % 31.4 olan enerji tasarrufu algoritmanın kullanımıyla % 38.9 olmuştur. Burada da yaklaşık % 7.5'luk bir enerji tasarrufu artışı görülmektedir. Bu artış karşılaştırma tablosundan görüleceği gibi Süperkapasitör boyutunu iki katına (500 A, 500 V, 31.5 F' ta enerji tasarrufu % 40.7'dir) çıkarmaya yakın bir artıştır. Bu algoritma kullanımı ile hem ilk yatırım maliyetini arttırmadan, hem de yerleşim sorununu arttırmadan yapılan enerji tasarrufu artışının dikkat çekici düzeyde olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak benzetim ortamlarında ve laboratuvarında geliştirilen ve gerçekleştirilen bu sistem yeni tasarlanacak araçlarda kullanılabileceği gibi uygun mekanik paketleme ile aktif olarak kullanılan raylı araçlara da uygulanabilir. Süperkapasitör EDS'nin ciddi bir başarımlı gösterdiği hem bilimsel yayınlarda, hem de aktif olarak uygulanan araçlarda bir çok yerde gösterilmiş ve başarı sağlamıştır. Tez boyunca bahsedildiği üzere tasarlanan sisteme anlatılan algoritma uygulanmasıyla birlikte süperkapasitörün kullanımı daha etkin olacak ve enerji tasarrufu ciddi miktarda artacaktır. Bu tez çalışmasının en önemli çıktısı ise enerji geri kazanımının etkinliği ile raylı ulaşım araçlarının hem ekonomik açıdan, hem de çevresel etkiler açısından daha da tercih edilir hale gelmesi amaçlanmıştır.

Bu sistemin gerçek araç üzerinde kullanılması için labortuvarındaki yapının paketlenmesi ve uygulanacak araca uygun hale getirilmesi, çevre koşulları ve EMI/EMC testlerinin yapılarak standartlara uygunluğunun sağlanması bir



zorunluluktur. Yakın gelecekte yerli araçlar üzerine uygulama yapılması için bu endüstriyel çalışmaların gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Ayrıca labortuvarda kurulan bu sistem ile süperkapasitörün raylı çekiş sistemlerinden başka kullanım alanlarında çalışmaların yapılabilmesi de kolaylaştırılmıştır. Geliştirilen ve kurulan sistem ile bu çalışmaları yapmak akademi bünyesinde daha kolay hale getirilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] A. A. S. Açıkbaz, RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ VERİMLİ SÜRÜŞ ve FRENLEME ENERJİSİNİN GERİ KAZANILMASI, *TÜRKİYE 10 . Enerj. KONGRESİ*, pp. 237–245, **2006**.
- [2] M. Steiner, M. Klohr, and S. Pagiela, Energy storage system with Ultracaps on board of railway vehicles, 2007. doi: 10.1109/EPE.2007.4417400.
- [3] D. R. Martinelli and H. Teng, Optimization of Railway Operations Using Neural Networks, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 33–49, **1996**.
- [4] H. R. Flier, Optimization of Railway Operations: Algorithms, Complexity, and Models, 2011.
- [5] R. Borndörfer, T. Klug, L. Lamorgese, C. Mannino, M. Reuther, and T. Schlechte, Recent success stories on integrated optimization of railway, *Transp. Res. Part C*, vol. 74, pp. 196–211, **2017**, doi: 10.1016/j.trc.2016.11.015.
- [6] J. P. Moskowitz and J. L. Cohuau, STEEM: ALSTOM and RATP experience of supercapacitors in tramway operation, *2010 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2010*, **2010**, doi: 10.1109/VPPC.2010.5729152.
- [7] M. Ogasa, Application of energy storage technologies for electric railway vehicles-examples with hybrid electric railway vehicles, *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 304–311, **2010**, doi: 10.1002/tee.20534.
- [8] LFX-300 Ameritram hybrid streetcar unveiled in Charlotte, *RailwayGazette*, **01.2011**. <https://www.railwaygazette.com/lfx-300-ameritram-hybrid-streetcar-unveiled-in-charlotte/35646.article> (Erişim Tarihi: **31.08.2021**).
- [9] M. Meinert, New mobile energy storage system for rolling stock, *2009 13th Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE '09*, no. D1c, **2009**.
- [10] F. Lacôte, Alstom-Future trends in railway transportation, *Japan Railw. Transp. Rev.*, no. December, pp. 4–9, **2005**.
- [11] J. J. Mwambeleko and T. Kulworawanichpong, Battery and Accelerating-Catenary Hybrid System for Light Rail Vehicles and Trams, vol. 150, no. March, pp. 8–10, **2017**.

- [12] Siemens installing Sitras supercap-based stationary energy storage unit for TriMet light rail substation, *Green Car Congress*, **2013**. <https://www.greencarcongress.com/2013/06/sitras-20130603.html> (Erişim Tarihi: **31.08.2021**).
- [13] Bombardier selects Maxwell Technologies ultracapacitors for EnerGstor rail transit braking energy recuperation system, *Green Car Congress*, **2012**. <https://www.greencarcongress.com/2012/01/energstor-20120119.html> (Erişim Tarihi: **01.09.2021**).
- [14] K. Ogura *et al.*, Test results of a high capacity wayside energy storage system using Ni-MH batteries for DC electric railway at New York City Transit, *2011 IEEE Green Technol. Conf. Green 2011*, pp. 6–11, **2011**, doi: 10.1109/GREEN.2011.5754859.
- [15] M. Shimada, R. Oishi, D. Araki, and Y. Nakamura, Energy storage system for effective use of regenerative energy in electrified railways, *Hitachi Rev.*, vol. 59, no. 1, pp. 33–38, **2010**.
- [16] A. Castaings, H. Caron, H. Kharrat, A. Ovalle, and B. Vulturescu, Energy Storage System based on Supercapacitors for a 750 V DC railway power supply, in *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, Nov. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607725.
- [17] K. Ogura, *5 - Next-generation battery-driven light rail vehicles and trains*. Elsevier Inc., 2017. doi: 10.1016/B978-0-12-803021-9.00005-7.
- [18] A. M. Gee and R. W. Dunn, Analysis of Trackside Flywheel Energy Storage in Light Rail Systems, vol. 64, no. 9, pp. 3858–3869, **2015**.
- [19] Enviline™ ERS Energy Recuperation System for DC rail transportation, *ABB*, **2019**.
- [20] D. Cornic, Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation, *Int. Conf. Electr. Syst. Aircraft, Railw. Sh. Propulsion, ESARS 2010*, **2010**, doi: 10.1109/ESARS.2010.5665264.
- [21] H. Ibaiondo and A. Romo, Kinetic energy recovery on railway systems with feedback to the grid, *Proc. EPE-PEMC 2010 - 14th Int. Power Electron. Motion Control Conf.*, pp. 94–97, **2010**, doi: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606545.

- [22] M. Khodaparastan, A. A. Mohamed, and W. Brandauer, Recuperation of Regenerative Braking Energy in Electric Rail Transit Systems, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 20, no. 8, pp. 2831–2847, **2019**, doi: 10.1109/TITS.2018.2886809.
- [23] N. Ghaviha, J. Campillo, M. Bohlin, and E. Dahlquist, Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation, *8th Int. Conf. Appl. Energy – ICAE2016*, vol. 105, pp. 4561–4568, **2017**, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.980.
- [24] M. Popescu and A. Bitoleanu, A Review of the Energy Efficiency Improvement in DC Railway Systems, *Energies, MDPI*, vol. 1092, **2019**, doi: 10.3390/en12061092.
- [25] A. González-Gil, R. Palacin, and P. Batty, Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy, *Energy Convers. Manag.*, vol. 75, no. 0, pp. 374–388, **2013**, doi: 10.1016/j.enconman.2013.06.039.
- [26] A. Gonzalez-Gil, R. Palacin, P. Batty, and J. P. Powell, Energy-efficient urban rail systems: strategies for an optimal management of regenerative braking energy, **2014**.
- [27] M. Fröhlich, M. Klohr, and P. S. Pagiela, Energy Storage with UltraCaps on Board of Railway Vehicles, no. September, **2003**.
- [28] H. Li, J. Peng, J. He, R. Zhou, Z. Huang, and J. Pan, A Cooperative Charging Protocol for Onboard Supercapacitors of Catenary-Free Trams, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 26, no. 4, pp. 1219–1232, **07.2018**, doi: 10.1109/TCST.2017.2717382.
- [29] L. Mir, I. Etxeberria-Otadui, I. P. De Arenaza, I. Sarasola, and T. Nieva, A supercapacitor based light rail vehicle: System design and operations modes, *2009 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2009*, vol. 146, pp. 1632–1639, **2009**, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316073.
- [30] P. G. Hiray and B. E. Kushare, Design a Controller for Discharging and Charging of Supercapacitor as Energy Storage in Medium Voltage AC System Head of Electrical Engg, *Int. J. Res. Stud. Sci. Eng. Technol.*, vol. 1, no. 4, pp. 49–56, **2014**, [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/cc21/d0bdd9da8c10530ecafb2cddd35f707b111a.pdf>

- [31] W. Lhomme, P. Delarue, P. Barrade, A. Bouscayrol, and A. Rufer, Design and control of a supercapacitor storage system for traction applications, *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.*, vol. 3, pp. 2013–2020, **2005**, doi: 10.1109/IAS.2005.1518724.
- [32] J. Millan, P. Godignon, X. Perpina, A. Perez-Tomas, and J. Rebollo, A survey of wide bandgap power semiconductor devices, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 5, pp. 2155–2163, **2014**, doi: 10.1109/TPEL.2013.2268900.
- [33] J. Biela, M. Schweizer, S. Waffler, and J. W. Kolar, SiC versus Si - Evaluation of potentials for performance improvement of inverter and DCDC converter systems by SiC power semiconductors, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 7, pp. 2872–2882, **2011**, doi: 10.1109/TIE.2010.2072896.
- [34] Infineon Silicon Carbide CoolSiC MOSFETs, Ürün Portföyü, *Infineon*, **2021**. <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/silicon-carbide/> (Erişim Tarihi: **25.11.2021**).
- [35] Wolfspeed, Cree SiC Power Products, Ürün Portföyü, *Wolfspeed*, **2021**. <https://www.wolfspeed.com/products/power/> (Erişim Tarihi: **25.11.2021**).
- [36] GaN Systems Power Transistors, Ürün Portföyü, *GaN Systems*, **2021**. <https://gansystems.com/gan-transistors/> (Erişim Tarihi: **25.11.2021**).
- [37] Nexperia GaN FETs, Ürün Portföyü., *Nexperia*, **2021**. <https://www.nexperia.com/products/gan-fets/#/> (Erişim Tarihi: **25.11.2021**).
- [38] VYCON Wins \$3.6 Million Contract to Decrease Energy Consumption at Los Angeles Metro Red Line Westlake/MacArthur Park Subway Station., *Globe News Wire*, **2012**. <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2012/11/14/952288/0/en/VYCON-Wins-3-6-Million-Contract-to-Decrease-Energy-Consumption-at-Los-Angeles-Metro-Red-Line-Westlake-MacArthur-Park-Subway-Station.html> (Erişim Tarihi: **10.12.2021**).
- [39] C. Tarrant, Kinetic energy storage wins acceptance, Haber Sayfası, *RailwayGazette*, **2004**. <https://www.railwaygazette.com/kinetic-energy-storage-wins-acceptance/27250.article> (Erişim Tarihi: **10.12.2021**).
- [40] J. L. Sullivan and L. Gaines, A review of battery life-cycle analysis: State of

- knowledge and critical needs, **2011**.
- [41] W. Lu and L. Dai, Carbon Nanotube Supercapacitors, in *Carbon Nanotubes*, 2010, pp. 563–590. doi: 10.5772/39444.
- [42] J. C. Ellenbogen, Supercapacitors : A Brief Overview, no. March, **2006**.
- [43] Supercapacitor: History, *Wikipedia*, **2021**. <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor#History> (Erişim Tarihi: **29.11.2021**).
- [44] T. Christen and M. W. Carlen, Theory of ragone plots, *J. Power Sources*, vol. 91, no. 2, pp. 210–216, **2000**, doi: 10.1016/S0378-7753(00)00474-2.
- [45] S. J. Moura, J. B. Siegel, D. J. Siegel, H. K. Fathy, and A. G. Stefanopoulou, Education on vehicle electrification: Battery systems, fuel cells, and hydrogen, *2010 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2010*, **2010**, doi: 10.1109/VPPC.2010.5729150.
- [46] Lelon Electronics EDLC Product, Ürün Portföyü, *LELON ELECTRONICS*, **2021**. <http://www.lelon.com.tw/en/product.php#14> (Erişim Tarihi: **30.11.2021**).
- [47] 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, **04.2013**, doi: 10.1109/TPEL.2012.2210736.
- [48] L. Qu and W. Qiao, Constant power control of DFIG wind turbines with supercapacitor energy storage, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 1, pp. 359–367, **2011**, doi: 10.1109/TIA.2010.2090932.
- [49] Maxwell Technologies Retrofit Solutions for Emergency Pitch Backup Systems. Ürün Bilgilendirme Sayfası., *Maxwell Technologies*, **2021**. <https://www.maxwell.com/retrofit-solutions-wind-turbine-emergency-pitch-backup-systems> (Erişim Tarihi: **05.12.2021**).
- [50] M. Kermani, E. Shirdare, S. Abbasi, G. Parise, and L. Martirano, Elevator regenerative energy applications with ultracapacitor and battery energy storage systems in complex buildings, *Energies*, vol. 14, no. 11, pp. 1–16, **2021**, doi: 10.3390/en14113259.
- [51] Maxwell's Ultracapacitor-Based Engine Start Module, Ürün Föyü., *Maxwell Technologies*, **2021**. <https://www.maxwell.com/products/esm/> (Erişim Tarihi: **05.12.2021**).

- [52] A. Arefin, Implementation Of Ultracapacitor Based Stop-Start System Using Micro-Hybrid Technology In Three- Wheeler, *Int. J. Adv. Res. Publ.*, vol. 1, no. 4, pp. 68–70, **2017**.
- [53] Lamborghini uses supercapacitors in its most powerful car ever, *Green Car Congress*, **2021**. [https://www.greencarreports.com/news/1124923\\_lamborghini-uses-supercapacitors-in-its-most-powerful-car-ever](https://www.greencarreports.com/news/1124923_lamborghini-uses-supercapacitors-in-its-most-powerful-car-ever) (Erişim Tarihi: **08.12.2021**).
- [54] Y. Liu, Z. Li, Y. Chen, and K. Zhao, A novel fuel-cell electric articulated vehicle and its drop-and-pull transport system, *Energies*, vol. 13, no. 14, **2020**, doi: 10.3390/en13143632.
- [55] F. Cignini *et al.*, Experimental data comparison of an electric minibus equipped with different energy storage systems, *Batteries*, vol. 6, no. 2, **2020**, doi: 10.3390/batteries6020026.
- [56] M. Ortúzar, J. Dixon, and J. Moreno, Design, Construction and Performance of a Buck-Boost Converter for an Ultracapacitor-Based Auxiliary Energy System for Electric Vehicles, *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, vol. 3, pp. 2889–2894, **2003**, doi: 10.1109/iecon.2003.1280706.
- [57] A. Killer, A. Armstorfer, A. E. Díez, and H. Biechl, Ultracapacitor assisted regenerative braking in metropolitan railway systems, *2012 IEEE Colomb. Intell. Transp. Syst. Symp. CITSS 2012 - Conf. Proc.*, **2012**, doi: 10.1109/CITSS.2012.6336687.
- [58] J. Hu, Y. Zhao, and X. Liu, The design of regeneration braking system in light rail vehicle using energy-storage Ultra-capacitor, *2008 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2008*, pp. 1–5, **2008**, doi: 10.1109/VPPC.2008.4677708.
- [59] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, and P. Tricoli, Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 24, pp. 36–49, **2012**, doi: 10.1016/j.trc.2012.02.001.
- [60] Y. C. Zhang, L. L. Wu, X. J. Zhu, and H. Q. Liang, Design of supercapacitor-based energy storage system for metro vehicles and its control rapid implementation, *2008 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2008*, pp. 5–8, **2008**, doi: 10.1109/VPPC.2008.4677432.

- [61] Maxwell Technologies 125V Heavy Transportation Module, Veriföyü, *Maxwell Technologies*, **2021**.  
[https://www.maxwell.com/images/documents/125V\\_Module\\_datasheet.pdf](https://www.maxwell.com/images/documents/125V_Module_datasheet.pdf) (Erişim Tarihi: **08.12.2021**).
- [62] Skeleton Technologies SKELMODE 102V Ultracapacitor Module, Ürün Tanıtım Sayfası, *Skeleton Technologies*, **2021**.  
<https://www.skeletontech.com/skelmod-102v-ultracapacitor-module> (Erişim Tarihi: **08.12.2021**).
- [63] H. Höimoja, D. Vinnikov, M. Lehtla, A. Rosin, and J. Zakis, Survey of loss minimization methods in tram systems, *SPEEDAM 2010 - Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion*, pp. 1356–1361, **2010**, doi: 10.1109/SPEEDAM.2010.5544863.
- [64] M. H. Akşit, S. Öztürk, and I. Çadirci, A study on ultracapacitor-based systems for compensation of power deficiency and saving energy: Design, control and simulation, *2017 IEEE 3rd Int. Futur. Energy Electron. Conf. ECCE Asia, IFEEC - ECCE Asia 2017*, pp. 1008–1013, **2017**, doi: 10.1109/IFEEC.2017.7992179.
- [65] V. Michal, Dynamic duty-cycle limitation of the boost DC/DC converter allowing maximal output power operations, *Int. Conf. Appl. Electron.*, vol. 2016-Sept, no. 2, pp. 177–182, **2016**, doi: 10.1109/AE.2016.7577268.
- [66] S. M. D. Dehnavi, G. Sen, O. C. Thomsen, M. A. E. Andersen, and L. Møller, Isolated bidirectional DC–DC converter for supercapacitor applications, *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, no. 9, pp. 1356–1361, **2011**, doi: 10.24084/repqj09.650.
- [67] D. Vinnikov, I. Roasto, and J. Zakis, New bi-directional DC/DC converter for supercapacitor interfacing in high-power applications, *Proc. EPE-PEMC 2010 - 14th Int. Power Electron. Motion Control Conf.*, pp. 38–43, **2010**, doi: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606899.
- [68] D. Yildirim *et al.*, Full-Scale Physical Simulator of All SiC Traction Motor Drive With Onboard Supercapacitor ESS for Light-Rail Public Transportation, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 8, pp. 6290–6301, **08.2020**, doi: 10.1109/TIE.2019.2934086.
- [69] D. Yıldırım, M. H. Akşit, I. Çadirci, and M. Ermiş, All-SiC Traction Converter for Light Rail Transportation Systems: Design Methodology and

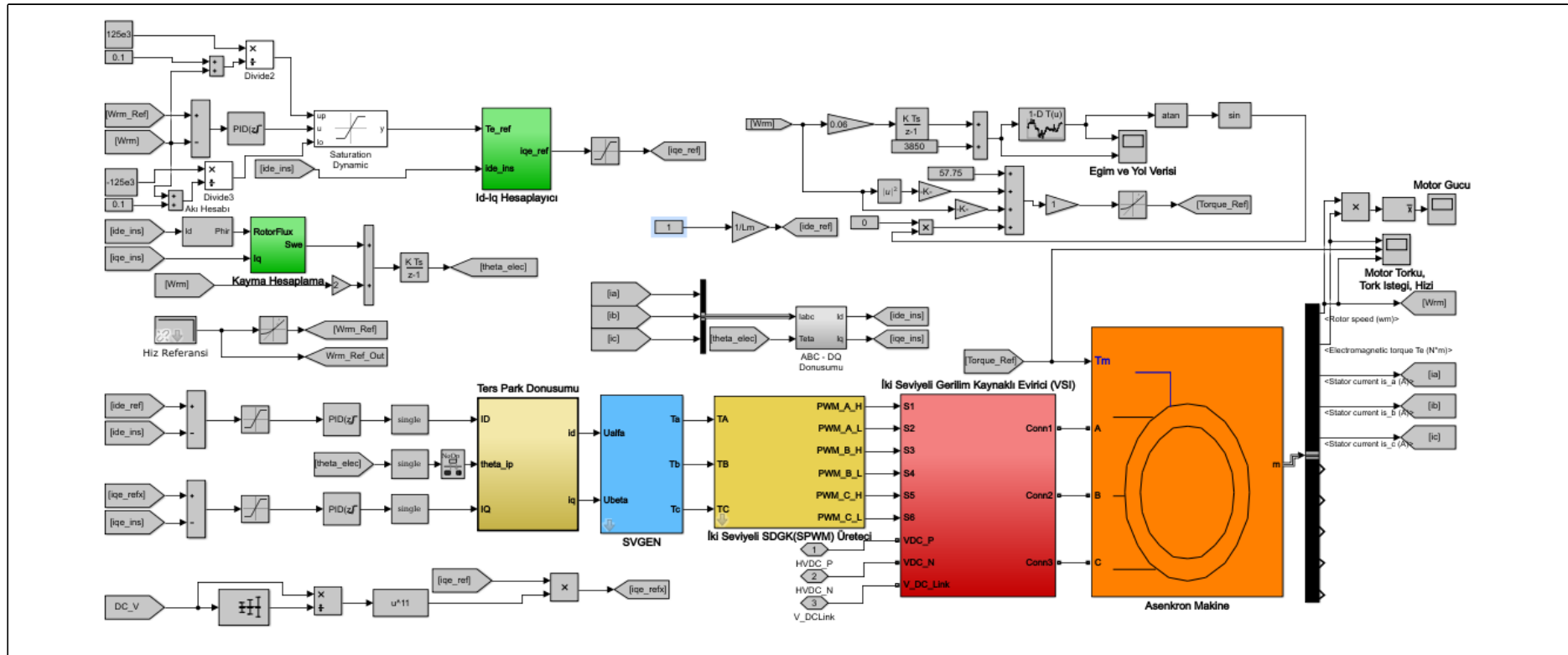


- Development of 165 kVA Prototype, *Electronics*, vol. 11, no. 9, p. 1438, **04.2022**, doi: 10.3390/electronics11091438.
- [70] Maxwell Technologies, Product Guide Maxwell Technologies Boostcap Ultracapacitors, **2009**.  
[https://www.maxwell.com/images/documents/PG\\_boostcap\\_product\\_guide.pdf](https://www.maxwell.com/images/documents/PG_boostcap_product_guide.pdf) (Erişim Tarihi: **20.12.2021**).
- [71] Railway Applications - Supply voltages of traction systems, European Standard BS EN 50163. CENELEC, p. 31, **2004**.
- [72] Infineon FF300R17KEP\_B11 Veriföyü, **2017**.  
[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF300R17KE4P-DS-v03\\_00-EN.pdf?fileId=5546d46259d9a4bf015a8421704560db](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF300R17KE4P-DS-v03_00-EN.pdf?fileId=5546d46259d9a4bf015a8421704560db) (Erişim Tarihi: **25.12.2021**).
- [73] Mitsubishi CM300DY-34T Veriföyü, **2020**.  
[https://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/content/product/power-module/igbt/t\\_series/cm300dy-34t\\_e.pdf](https://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/content/product/power-module/igbt/t_series/cm300dy-34t_e.pdf) (Erişim Tarihi: **25.12.2021**).
- [74] Fuji Electric 2MSI400VE-170-53 Veriföyü, **2015**.  
<https://b7f7f9q6.rocketcdn.me/files/2MSI400VE-170-53.pdf?r=false> (Erişim Tarihi: **25.12.2021**).
- [75] Wolfspeed CAS300M17BM2 Veriföyü, **2018**.  
<https://assets.wolfspeed.com/uploads/2020/12/cas300m17bm2.pdf> (Erişim Tarihi: **25.12.2021**).
- [76] Fischer Elektronik Soğutucu Plaka, Veri Föyü, **2021**.  
[https://www.fischerelektronik.com/web\\_fischer/en\\_GB/\\$catalogue/fischer>Data/PR/SK461\\_/datasheet.xhtml?branch=heatsinks](https://www.fischerelektronik.com/web_fischer/en_GB/$catalogue/fischer>Data/PR/SK461_/datasheet.xhtml?branch=heatsinks) (Erişim Tarihi: **21.09.2021**).
- [77] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics; Converters, Applications and Design*. John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [78] B. J. Lyons, J. G. Hayes, and M. G. Egan, Magnetic Material Comparisons for High-Current Inductors in Low-Medium Frequency DC-DC Converters, in *APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Feb. 2007, pp. 71–77. doi: 10.1109/APEX.2007.357497.
- [79] LEM LV 25-1000 Veriföyü.  
[https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/lv\\_25-](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lv_25-)

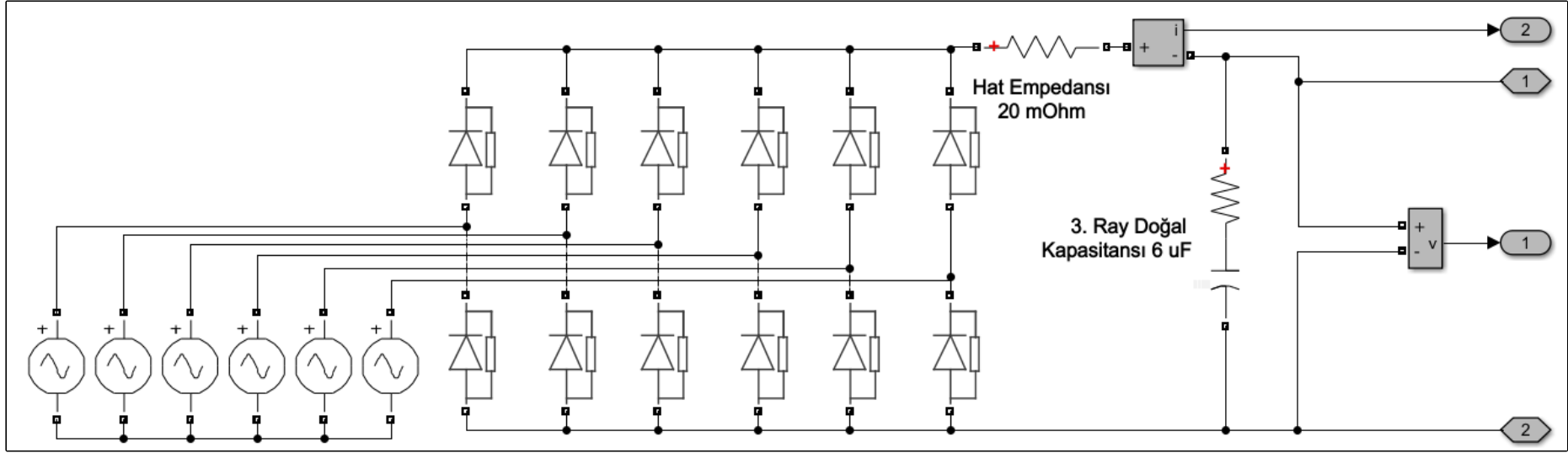
- 1000\_e.pdf (Erişim Tarihi: **22.09.2021**).
- [80] LEM LF 510-S Veriföyü.  
[https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/lf\\_510-s.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lf_510-s.pdf)  
(Erişim Tarihi: **22.09.2021**).
- [81] M. U. Nawaz, Estimation of Running Resistance in Train Tunnels, NTNU-Norwegian University of Science and Technology, 2015. [Online]. Available: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2351208>
- [82] Curve resistance (railroad), **2021**.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Curve\\_resistance\\_\(railroad\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Curve_resistance_(railroad)) (Erişim Tarihi: **25.11.2021**).
- [83] DOWSIL™ TC-5021 Thermally Conductive Compound Veriföyü, **2017**.  
<https://www.dow.com/documents/en-us/productdatasheet/11/11-34/11-3436-01-dowsil-tc-5021-thermally-conductive-compound.pdf> (Erişim Tarihi: **18.04.2022**).
- [84] Semikron, Power Cycle Model for IGBT Product Lines, **2021**. [Online]. Available: <https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-application-note-power-cycle-model-for-igbt-product-lines-en-2021-08-24-rev-01.pdf>
- [85] R. German *et al.*, Impact of high frequency current ripple on supercapacitors ageing through floating ageing tests, *Microelectron. Reliab.*, vol. 53, no. 9–11, pp. 1643–1647, **09.2013**, doi: 10.1016/j.microrel.2013.07.030.

## EKLER

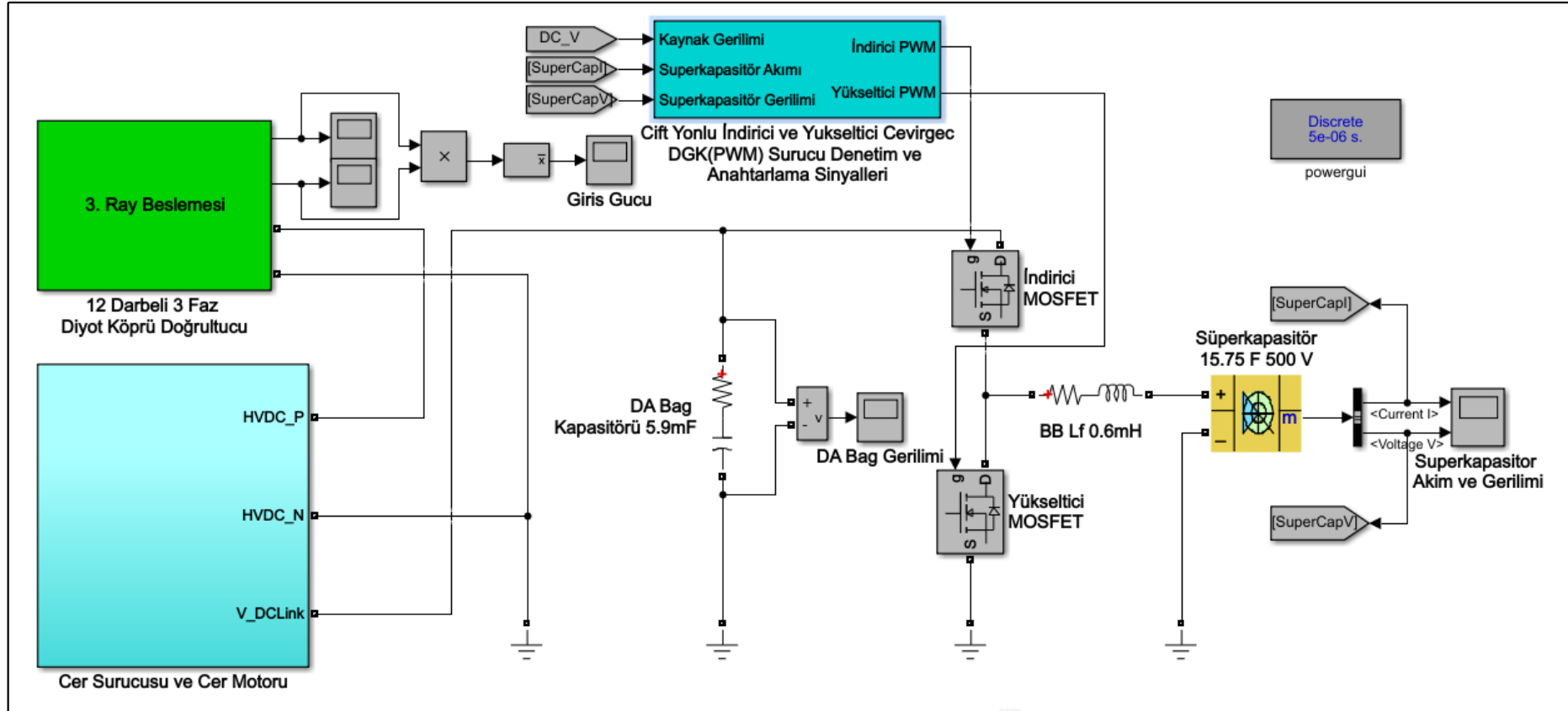
### EK 1 – Simulink Benzetim Blok Şemaları



Şekil 6.1. Cer Sürücüsü ve Cer Motoru Sisteminin Simulink Ortamındaki Güç ve Denetim Şeması

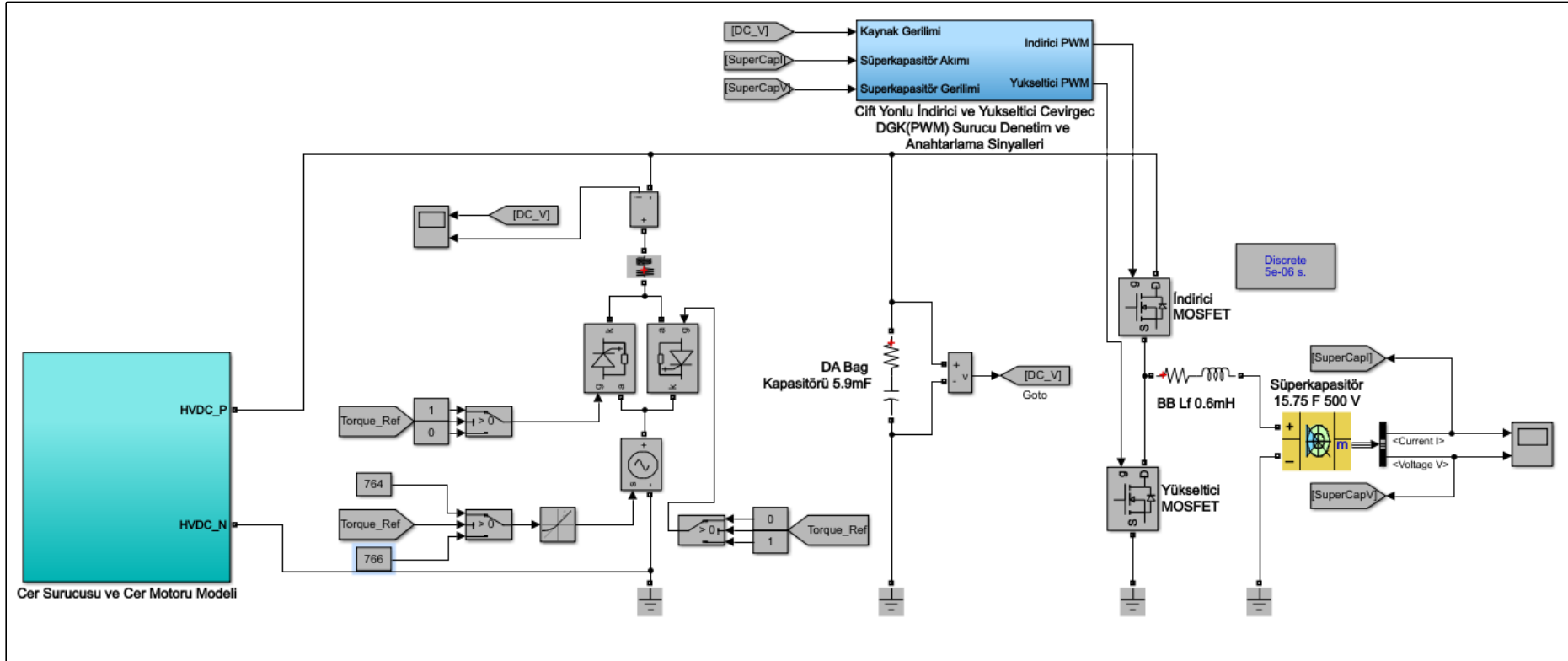


Şekil 6.2. 12 Darbe 3 Faz Diyot Köprü Doğrultucu Simulink Şeması



Şekil 6.3. Çift Yönlü İndirici ve Yükseltici Tipteki Çevirgecin, Cer Sürücüsü ve Diyot Köprü Doğrultucu Blokları ile Paralel Bağlantılı Simulink Şeması





Şekil 6.5. Sadeleştirilmiş Katener Modeli ve Genel Devre Şeması

