

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**HİBRİT VE ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA VOLAN VE
ULTRAKAPASİTÖR TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMININ
İNCELENMESİ VE VOLAN ENERJİ DEPOLAMA ÜNİTESİNİN
PROTOTİP ÜRETİMİ**

KORAY ERHAN

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

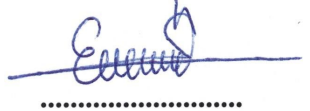
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

HİBRİT VE ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA VOLAN VE
ULTRAKAPASİTÖR TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMININ
İNCELENMESİ VE VOLAN ENERJİ DEPOLAMA
ÜNİTESİNİN PROTOTİP ÜRETİMİ

KORAY ERHAN

Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR
Danışman, Kocaeli Üniv.
Prof. Dr. Ercüment KARAKAŞ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.
Doç. Dr. Murat KALE
Jüri Üyesi, Düzce Üniv.
Dr. Öğr. Üyesi Murat AYAZ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.
Prof. Dr. Mehmet BAYRAK
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.


.....

.....

.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 07.06.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar günümüzde giderek yaygınlaşan ve tercih edilen ulaşım araçları olmaktadır. Bu gelişim ve değişim süreci de her alanda olduğu gibi zorlu ve maliyetli olmaktadır. Her yeni teknolojinin olumlu ve olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, elektrikli ve hibrit elektrikli araçların yaygınlaşmasının önündeki en önemli problemlerden biri olan enerji verimliliği ve menzil artırımı üzerine çözüm olabilecek bir enerji depolama teknolojisinin prototiplenmesine çalışılmaktadır. Ülkemizde henüz üzerinde çok fazla deneysel çalışma yapılmamış olan Volan Enerji Depolama Sistemi, başta A.B.D. olmak üzere, gelişmiş ülkelerde seri üretim olarak birçok alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmayla, gelecekte daha sık biçimde karşılaşılabilecek olan Volan Enerji Depolama Sistemi ile ilgili uygulamalı tecrübe sahibi olunması, ulusal ve uluslararası literatüre katkı sağlanması hedeflenmektedir. Ayrıca Ultra-kapasitör Enerji Depolama Sistemi gibi farklı teknolojiler ile karşılaştırma yapılarak, bu sistemlerin avantaj ve dezavantajları göz önüne konmaktadır. Böylece farklı amaçlar için hangi teknolojinin kullanımının yerinde olacağına karar vermek daha kolay olacaktır.

Bu tez çalışması, 113E143 no'lu proje kapsamında TÜBİTAK ve “Türk Akademisyenler İçin Yurt İçi Doktora Burs Programı” kapsamında ASELSAN A.Ş. tarafından desteklenmektedir.

Tez çalışmalarım süresince, çalışmalarına yön veren ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sn. Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR'e ve tez izleme komitesinde yer alarak değerli fikirlerini paylaşan Sn. Prof. Dr. Ercüment KARAKAŞ ve Sn. Doç. Dr. Murat KALE'ye teşekkür ederim. Akademik gelişimimde bana katkı sağlayan tüm hocalarım ve Dr. Öğr. Üy. Murat AYAZ'a da ayrıca teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımda maddi manevi desteğini benden esirgemeyen babam Fahri ERHAN'a, çalışmalarım süresince bana her zaman destek olan eşim Işık Tuğçe ERHAN'a ve biricik kızım Işık Ela ERHAN'a şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmayı aileme atfediyorum.

Haziran – 2018

Koray ERHAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLOLAR DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR VE TEZİN AMACI.....	3
2. ELEKTRİKLİ VE HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLAR.....	11
3. VOLAN ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ.....	17
3.1. EA ve HEA'lar İçin Önerilen VEDS Topolojileri	19
3.2. Volan Enerji Depolama Sistemi Simülasyon Çalışmaları.....	22
3.3. Prototip Üretimi Gerçekleştirilecek VEDS Ünitelerine Ait Boyutsal Hesaplamalar	27
3.4. Volan Enerji Depolama Sistemi Mekanik Tasarımı, Prototip Üretimi ve Ön Test Çalışmaları	32
3.5. Performans Testlerinde Kullanılan Ekipmanlar ve Bağlantı Şeması	40
3.6. Volan Enerji Depolama Sistemi Deneysel Çalışmaları.....	47
3.6.1. Küçük boyutlu dar volanlı VEDS performans çalışmaları	48
3.6.2. Küçük boyutlu geniş volanlı VEDS performans çalışmaları	55
3.6.3. Büyük boyutlu dar volanlı VEDS performans çalışmaları	58
3.6.4. Büyük boyutlu geniş volanlı VEDS performans çalışmaları	63
4. ULTRA-KAPASİTÖR ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ.....	67
4.1. EA ve HEA'lar İçin Önerilen UEDS Topolojisi	68
4.2. VEDS Ünitesine Eşdeğer UEDS Ünitesi İçin Boyutsal Hesaplamalar.....	70
4.3. Ultra-kapasitör Enerji Depolama Sistemi Simülasyon Çalışmaları	72
4.4. DA/DA Dönüştürücü Tasarımı ve Üretimi	73
4.5. Ultra-kapasitör Enerji Depolama Sistemi Performans Çalışmaları.....	81
5. VEDS VE UEDS ÜNİTELERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ	86
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	90
KAYNAKLAR	94
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	100
ÖZGEÇMİŞ	103

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Flybrid firmasının ürettiği volan ünitesi	5
Şekil 1.2.	CVT kullanan (elektriksel bir yapı barındırmayan) VEDS teknolojisinin bir otobüse uygulanması ve kullanım senaryosu	6
Şekil 2.1.	Elektrikli aracın yapısı	11
Şekil 2.2.	Paralel hibrit araç yapısı	14
Şekil 2.3.	Seri hibrit araç yapısı	15
Şekil 2.4.	Seri-paralel kombine hibrit araç yapısı	15
Şekil 3.1.	Volan enerji depolama sistemi temel yapısı	17
Şekil 3.2.	VEDS ünitesinin EA ve HEA entegrasyonu.....	19
Şekil 3.3.	VEDS ünitesinin bir otobüse uygulanması	20
Şekil 3.4.	EA ve HES'lar için tasarlanan VEDS ünitesinin çift yönlü enerji akış diyagramı.....	21
Şekil 3.5.	VEDS entegre edilmiş araç devre şeması	22
Şekil 3.6.	Volan üzerinde depolanan enerjinin, volan devir sayısına göre değişimi.....	23
Şekil 3.7.	Zamana göre volan enerjisinin değişimi	23
Şekil 3.8.	Zamana göre volan devir sayısının değişimi	24
Şekil 3.9.	VEDS'in genel MATLAB/Simulink modeli	25
Şekil 3.10.	Volan deşarj bloğunun modeli	26
Şekil 3.11.	Geri beslemeli DA-DA dönüştürücü modeli	26
Şekil 3.12.	DA-DA dönüştürücü giriş ve çıkış gerilim grafikleri	27
Şekil 3.13.	Farklı geometriye sahip rotorların atalet momenti çarpanları	28
Şekil 3.14.	Ön testlerde kullanılan M/G ünitesi.....	32
Şekil 3.15.	Ön testlerde kullanılan M/G sürücü ünitesi	33
Şekil 3.16.	VEDS'in Autocad programında tasarım çizimleri (perspektif).....	34
Şekil 3.17.	VEDS'in Autocad programında tasarım çizimleri (ön taraftan bakış).....	34
Şekil 3.18.	VEDS'in Autocad programında tasarım çizimleri (kesit görünüş)	35
Şekil 3.19.	Volanın koruma kılıfı ve flanş kapakları	36
Şekil 3.20.	VEDS'in mil ve rulman montajları yapılmış olan rotor kısmı	37
Şekil 3.21.	Volan ve M/G ünitesi arasında kullanılan farklı tipte kaplin çeşitleri.....	38
Şekil 3.22.	Küçük sistemin üretim aşamaları ve genel resmi	38
Şekil 3.23.	Büyük ve küçük sisteme ait eş genişlikteki (60 mm) rotorlar	39
Şekil 3.24.	Büyük ve küçük sistemin tamamlanmış hali	39
Şekil 3.25.	Volan enerji depolama sistemi.....	40
Şekil 3.26.	VEDS'e enerji sağlamada kullanılan lityum-polimer batarya.....	41
Şekil 3.27.	7,2 kW gücünde fırçasız doğru akım motoru	42
Şekil 3.28.	Montajı bitmiş büyük VEDS ünitesi.....	42
Şekil 3.29.	4,8 kW gücünde Fırçasız doğru akım motoru.....	43
Şekil 3.30.	Montajı bitmiş küçük VEDS ünitesi	43
Şekil 3.31.	200 A fırçasız doğru akım motor sürücüsü.....	45

Şekil 3.32.	Akım, gerilim, güç ve devir sayısı bilgilerini kaydeden veri toplama kartı	45
Şekil 3.33.	Data logger kartı arayüz programı ekran görüntüsü	46
Şekil 3.34.	Chroma Programlanabilir Yük Grubu	46
Şekil 3.35.	VEDS testlerinde kullanılan deneysel düzenek	48
Şekil 3.36.	Deneysel sistem bağlantı şeması ve osiloskop ölçüm uçları	48
Şekil 3.37.	Sistemden 200 W'lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri	49
Şekil 3.38.	VEDS'in şarjı ve 200 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği.....	50
Şekil 3.39.	Sistemden 300 W'lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri	50
Şekil 3.40.	VEDS'in şarjı ve 300 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği.....	51
Şekil 3.41.	Sistemden 500 W'lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri	52
Şekil 3.42.	VEDS'in şarjı ve 500 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği.....	53
Şekil 3.43.	Sistemden 600 W'lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri	53
Şekil 3.44.	VEDS'in şarjı ve 600 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği.....	54
Şekil 3.45.	Sistem 24000 d/d hıza çıkarken (enerji depolanırken) elde edilen akım gerilim ve güç grafikleri.....	55
Şekil 3.46.	Sistemden 600 W'lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri	56
Şekil 3.47.	VEDS'in şarjı ve 600 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği.....	57
Şekil 3.48.	Sistem 24000 d/d hıza çıkarken (enerji depolanırken) elde edilen akım gerilim ve güç grafikleri.....	57
Şekil 3.49.	Sistemden 300 W'lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri	59
Şekil 3.50.	VEDS'in şarjı ve 300 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği.....	60
Şekil 3.51.	Sistemden 500 W'lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri	60
Şekil 3.52.	VEDS'in şarjı ve 500 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği.....	61
Şekil 3.53.	Sistemden 600 W'lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri	61
Şekil 3.54.	VEDS'in şarjı ve 600 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği.....	62
Şekil 3.55.	Sistem 13000 d/d hıza çıkarken (enerji depolanırken) elde edilen akım gerilim ve güç grafikleri.....	63
Şekil 3.56.	Sistemden 600 W'lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri	65
Şekil 3.57.	VEDS'in şarjı ve 600 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği.....	65

Şekil 4.1.	Geliştirilen topoloji ile EA ile UEDS arasındaki çift yönlü enerji akış diyagramı.....	69
Şekil 4.2.	UEDS entegre edilmiş araç devre şeması	69
Şekil 4.3.	UEDS’de kullanılan ultrakapasitörler	71
Şekil 4.4.	UEDS genel MATLAB modeli	73
Şekil 4.5.	DA/DA dönüştürücü giriş ve çıkış gerilim grafikleri	73
Şekil 4.6.	Yükseltici tip DA/DA dönüştürücü güç devresi	74
Şekil 4.7.	DA/DA dönüştürücünün kontrol blok şeması	77
Şekil 4.8.	Üretilen DA/DA dönüştürücü devresi	78
Şekil 4.9.	DA/DA çeviriciye 17 V giriş gerilimi uygulanarak yapılan ölçüm sonucu	79
Şekil 4.10.	DA/DA dönüştürücüye 12 V giriş gerilimi uygulanarak yapılan ölçüm sonucu	79
Şekil 4.11.	DA/DA dönüştürücüye 7 V giriş gerilimi uygulanarak yapılan ölçüm sonucu	80
Şekil 4.12.	DA/DA dönüştürücüye 19 V giriş gerilimi uygulanarak yapılan ölçüm sonucu	80
Şekil 4.13.	DA/DA dönüştürücüye 9 V giriş gerilimi uygulanarak yapılan ölçüm sonucu	81
Şekil 4.14.	UEDS için elektrikli araç M/G ünitesi (DA kaynak) gibi davranan programlanabilir güç kaynaklı devre şeması.....	82
Şekil 4.15.	UEDS ünitesi devre şeması ve ölçüm uçları.....	83
Şekil 4.16.	DA/DA dönüştürücü giriş ve çıkış akım-gerilim grafikleri.....	84
Şekil 4.17.	DA/DA dönüştürücü çıkış akım, gerilim ve güç grafikleri	84
Şekil 4.18.	DA/DA dönüştürücü giriş akım, gerilim ve güç grafikleri.....	85

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Farklı tipteki hibrit elektrikli araçların özellikleri	13
Tablo 3.1.	Farklı rotor malzemelerinin enerji yoğunlukları ve mekanik dayanımları	18
Tablo 3.2.	Kinetik enerji formülündeki değişkenler	29
Tablo 3.3.	Büyük sisteme ait fiziksel ölçüler	30
Tablo 3.4.	Küçük sisteme ait fiziksel ölçüler	30
Tablo 3.5.	VEDS'lerin maksimum ve kesim devir sayıları	31
Tablo 3.6.	Ön testlerde kullanılan M/G ünitesinin özellikleri	33
Tablo 3.7.	Ön testlerde kullanılan M/G sürücüsünün özellikleri	33
Tablo 3.8.	Büyük sisteme ait rulmanların teknik özellikleri	36
Tablo 3.9.	Küçük sisteme ait rulmanların teknik özellikleri	36
Tablo 3.10.	VEDS'e enerji sağlamada kullanılan batarya teknik özellikleri	41
Tablo 3.11.	7,2 kW gücündeki motorun teknik özellikleri	43
Tablo 3.12.	4,8 kW gücündeki motorun teknik özellikleri	44
Tablo 3.13.	Motor sürücü ünitesi teknik özellikleri	44
Tablo 3.14.	Chroma Programlanabilir yük modülünün teknik özellikleri	47
Tablo 3.15.	VEDS ünitelerine ait performans değerleri	66
Tablo 3.16.	VEDS ünitelerinin yüke bağlı şarj ve deşarj süreleri	66
Tablo 4.1.	Devir sayılarına göre VEDS'lerde depolanan enerji değerleri	70
Tablo 4.2.	VEDS ile denk enerji depolama kapasitesine sahip UEDS büyüklüğü	71
Tablo 4.3.	Deneyisel çalışmalarda kullanılacak olan ultrakapasitörün teknik özellikleri	71
Tablo 4.4.	Yükseltici tip DA/DA dönüştürücü parametreleri	75
Tablo 4.5.	Yükseltici tip DA/DA dönüştürücü parametreleri	76
Tablo 4.6.	M/G ünitesi yerine kullanılan "Chroma 62050H-600S" programlanabilir DA güç kaynağı teknik özellikleri	81
Tablo 4.7.	UEDS ünitesi performans değerleri	85
Tablo 5.1.	Enerji depolama sistemlerinin enerji yoğunlukları	86
Tablo 5.2.	Farklı tipte VEDS ünitelerinin karşılaştırması	87
Tablo 5.3.	Enerji depolama teknolojilerinin birim cinsinden karşılaştırılması	89

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

E	: Enerji, (J, kWs)
I	: Eylemsizlik Momenti, (kg.m ²)
ω	: Açısal Hız, (Rad/s)
m	: Kütle, (kg)
r	: Yarıçap, (m)
f	: Frekans, (Hz)
μ	: Verim, (%)
λ	: Doluluk Oranı, (Sbt)
f_p	: Anahtarlama frekansı, (Hz)
T_d	: S anahtar iletim süresi, (μ s)
T_b	: S anahtar kesim süresi, (μ s)
T_p	: Çalışma periyodu, (μ s)
V_g	: DA giriş gerilimi, (V)
V_{DA}	: DA çıkış gerilimi, (V)
I_g	: DA giriş akımı, (A)
$I_{\text{ç}}$	: DA çıkış akımı, (A)
ΔI_L	: Endüktans akım dalgalanması, (A)

Kısaltmalar

AA	: Alternatif Akım
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
Ar-Ge	: Araştırma Geliştirme
CVT	: Continuous Variable Transmission (Sürekli Değişken Transmisyon)
DA	: Doğru Akım
EA	: Elektrikli Araç
FDAM	: Fırçasız Doğru Akım Makinası
HEA	: Hibrit Elektrikli Araç
İYM	: İçten Yanmalı Motor
M/G	: Motor/Generatör
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
SSR	: Solid State Relay (Yarı-iletken/Elektronik Röle)
UEDS	: Ultra-kapasitör Enerji Depolama Sistemi
UPS	: Uninterrupted Power Supply (Kesintisiz Güç Kaynağı)
VEDS	: Volan Enerji Depolama Sistemi

HİBRİT VE ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA VOLAN VE ULTRAKAPASİTÖR TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMININ İNCELENMESİ VE VOLAN ENERJİ DEPOLAMA ÜNİTESİNİN PROTOTİP ÜRETİMİ

ÖZET

Elektrikli ve hibrit elektrikli araç teknolojileri günümüzde artan bir ivme ile gelişmektedir. Düşük karbon salınımı ile çevreci, düşük enerji tüketimiyle ise verimli olan bu araçların yaygınlaşmasının önündeki en önemli engel menzil problemi olmaktadır. Araç üreticileri yüksek menzile sahip araçları üretme ve üretilen bu araçları geleneksel araçlara yakın fiyatlara mal etmekte zorlanmaktadırlar. Bir diğer husus araçlarda kullanılan bataryaların şarj işleminin yakıt dolm süresinden çok daha uzun sürmesidir ve bu durumun uzun menzilli yolculuklarda özellikle elektrikli araçlar için büyük sorun teşkil etmektedir. Bu doğrultuda, mevcut enerji kapasitesiyle araçlara daha uzun menzil kat ettirmek üzerine çok sayıda verimlilik artırıcı uygulama ve geliştirme çalışması mevcuttur. EA ve HEA’larda verimlilik artırmaya yönelik çalışmaların başında geri kazanımlı frenleme gelmektedir. Enerji kaybı en çok araçların hızlanması ve yavaşlaması sırasında yaşanmaktadır. Geri kazanımlı frenleme ile aracın sahip olduğu kinetik enerji yavaşlama sırasında depolanmakta ve hızlanma sırasında tekrar kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, geri kazanımlı frenleme enerjisinin depolanması için geleneksel yöntemlerden (bataryaya depolama) farklı olarak Volan Enerji Depolama Sistemi önerilmektedir. Literatürde yer alan mekanik enerji aktarımı ile enerji depolayan sistemlere alternatif olarak, elektriksiz enerji aktarımı prensibiyle çalışan VEDS ünitesi önerilmektedir. Çalışma kapsamında farklı hızlarda, kütlelerde ve enerji depolama kapasitelerine sahip 4 adet VEDS üretimi gerçekleştirilmekte ve bu sistemlerin performans analizleri yapılmaktadır.

Geri kazanımlı frenleme enerjisinin depolanması için kullanılan bir diğer yöntem ise Ultra-kapasitör Enerji Depolama Sistemidir (UEDS). UEDS teknolojisinin araçlarda kullanımına yönelik performans testleri de yine çalışma kapsamında gerçekleştirilmektedir.

Sonuç olarak ise VEDS ile UEDS teknolojilerinin EA ve HEA’larda kullanımının avantaj ve dezavantajları deneysel olarak ortaya konmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araç, Hibrit Elektrikli Araç, Ultra-kapasitör Enerji Depolama Sistemi, Volan Enerji Depolama Sistemi.

INVESTIGATION OF FLYWHEEL AND ULTRACAPACITOR TECHNOLOGIES USED IN ELECTRIC AND HYBRID ELECTRIC VEHICLES AND PROTOTYPE PRODUCTION OF FLYWHEEL ENERGY STORAGE UNIT

ABSTRACT

Electric and hybrid electric vehicle technologies are environmentally friendly with low carbon emissions and efficient with low energy consumption. The most important obstacle to the widespread usage of these vehicles is the short range problem. Vehicle manufacturers are forced to produce long range vehicles with low costs. Another point is that the batteries used in vehicles need a much longer charge time than the fill up the fuel, which is a big problem especially for electric vehicles on long-haul journeys. To overcome these problems, the most useful and preferred technology is regenerative braking systems. The highest energy loss occurs during acceleration and deceleration. With the regenerative braking system, the kinetic energy of the vehicle is stored during deceleration and reused during acceleration.

In this thesis study, the Flywheel Energy Storage System (FESS) is proposed to store the regenerative braking energy instead of conventional storage system like battery. The FESS unit, which operates on the principle of electrical energy transfer is proposed as an alternative to the mechanical energy transferred FESS. Within the scope of the study, four FESS production are realized with different speeds, masses and energy storage capacities and performance analyzes of these systems are performed.

Another method for storing the regenerative braking energy is the Ultra-Capacitor Energy Storage System (UESS). Performance tests of the UESS technology are also performed in this study.

As a result, the advantages and disadvantages of using VEDS and UEDS technologies in EA and HEA are empirically performed.

Keywords: Electric Vehicle, Hybrid Electric Vehicle, Ultra-capacitor Energy Storage System, Flywheel Energy Storage System.

GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte enerjiye olan ihtiyaç her geçen gün daha da artmaktadır. Enerjimizi sağladığımız kaynaklara baktığımızda fosil yakıtların önemli bir yerinin olduğunu görmekteyiz. Ancak fosil yakıtların sonsuz bir kaynak olmaması, dünyanın rezervleri hakkında kesin bir bilgiye sahip olunamaması ve en önemlisi fosil yakıtların sebep olduğu karbon emisyonunun dünyanın dengesini bozacak kadar tehlikeli boyutlara varması, bilim insanlarını farklı arayışlara itmektedir. Bu arayışlar neticesinde “Elektrikli ve Hibrit Elektrikli Araçlar” (EA, HEA) üzerinde daha fazla çalışılan bir alan haline gelmektedir.

Elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar ile ilgili Ar-Ge çalışmaları hızla devam etmektedir. Her geçen gün yeni bir katkı ile bu gelişim süreci büyük bir ivme kazanmaktadır. Elektrikli araçların yaygınlaşmasının önündeki en önemli problemlerden biri batarya teknolojisidir. Mevcut durumdaki batarya teknolojisi ile elektrikli bir araç içten yanmalı motora sahip bir araçla maliyet, menzil ve ağırlık yönünden rekabet etmekte zorlanmaktadır. Bu bağlamda elektrikli araçların verimliliğini artırmak adına birtakım gelişmeler sağlamak zorunluluk haline gelmiştir.

Elektrikli ve hibrit elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar maliyet yönünden geleneksel içten yanmalı motora sahip araçlarla rekabet etmekte zorlanmaktadır. Elektrikli bir araçta kullanılan batarya ünitesi, araç maliyetinin yaklaşık 1/2-1/3’ünü oluşturmaktadır.

Yine elektrikli araçların yaygınlaşması için aşılması gereken bir diğer husus da menzil problemidir. İçten yanmalı motora (İYM) sahip bir araç, bir depo yakıtla ortalama 500 – 1300 km arasında yol katedebilmektedir. Ancak ortalama bir elektrikli araç günümüzde 1 dolum ile 100 – 250 km arası yol katedebilmektedir. Çok yüksek fiyatlı, performans sınıfında araçlarda ise bu rakam ancak 400 – 500 km’leri bulmaktadır. Bu da sıradan bir İYM’ye sahip aracın katettiği yola denktir.

Elektrikli araçların önündeki tek engel kısa menzil sorunu da değildir. Buna ek olarak elektrikli araç bataryalarının çok uzun sürelerde (6 – 8 saat gibi) şarj olması da uzun mesafeli yolculukları imkânsız kılmaktadır. Her ne kadar günümüzde bazı üreticiler 30 dakikada % 80 oranında şarj olabilen bataryalar geliştirmiş olsa da, şarj istasyonlarının sayısının yetersiz olması, uzun menzilli yolculuklara engel teşkil etmektedir.

Ancak sayılan bu olumsuzluklara rağmen, EA ve HEA'lar ciddi bir hızla gelişmekte ve yaygınlaşmaktadır. Günümüzde hemen her markanın hibrit ve elektrikli modelleri bulunmaktadır. Markaların bu alana yatırımları ve Ar-Ge çalışmaları her geçen gün artmaktadır. Geliştirilen yeni batarya teknolojileri ve yaygınlaşan şarj istasyonları ile yakın gelecekte geleneksel İYM'li araçlar yerini HEA'lara ve sonrasında da EA'lara bırakacaktır.

EA ve HEA'ların menzilini artırmak ve enerji tüketimlerini azaltmak için çok çeşitli yöntemler geliştirilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında da EA ve HEA'lara uygulanabilecek ve aracın menzilini artırmaya yönelik bir teknoloji önerilmektedir.

Geleneksel araçlarda frenleme sırasında aracın sahip olduğu kinetik enerjinin ısı enerjisi olarak balata ve disklerde harcanması, ciddi oranda enerji kaybına neden olmaktadır.

Yapılan çalışmalarda geri kazanımlı frenlemenin, enerji sarfiyatını ciddi oranlarda azalttığı görülmektedir. Enerjinin geri kazanımı farklı sistemlerle sağlanabilmektedir. Bu tez çalışmasında, geleneksel olarak frenleme enerjisi geri kazanımı için batarya yerine Ultra-kapasitör Enerji Depolama Sistemi (UEDS) ve Volan Enerji Depolama Sistemi (VEDS) teknolojilerinin kullanımı üzerinde durulmaktadır. VEDS ünitesinin simülasyon çalışmaları yapılarak prototip üretimi gerçekleştirilmektedir. Benzer şekilde UEDS ünitesinin simülasyon çalışmaları yapılarak deneysel ölçüm sonuçları alınmaktadır. Son olarak ise VEDS ve UEDS teknolojilerinin EA ve HEA'lara uygulanabilirliği maliyet, boyutsal analiz, kullanım ömrü, güvenilirlik bakımından karşılaştırılarak yorumlanmaktadır. İlave olarak literatürde geliştirme çalışmaları devam eden mekanik enerji aktarımlı VEDS ünitesi ile tez kapsamında önerilen elektriksel enerji aktarımlı VEDS ünitesi karşılaştırmalı olarak incelenmektedir.

1. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR VE TEZİN AMACI

Günümüzde elektrikli ve hibrit elektrikli araçlarda geri kazanımlı frenleme teknolojisi, minimal boyutlarda da olsa kullanılmaktadır. Genellikle aracın starter alternatörü kullanılarak alçak gerilim bataryasına enerji depolanmaktadır. Frenleme yapıldığında starter alternatör devreye girerek aracın 12 V bataryasını doldurmaya başlamaktadır. Bu da çok küçük de olsa bir enerji kazanımı sağlamaktadır.

Diğer bir yöntem ise “tek pedal ile kullanım” olarak adlandırılabilen bir teknolojidir. Bu yöntem genellikle elektrikli araçlarda kullanılmaktadır. Aracı hareket ettirmek için gaz pedalına sürekli olarak basmak gerekmektedir. Ayak gaz pedalından çekildiğinde ise araç otomatik olarak motor freni yapmakta ve aracın hızı azalmaktadır. Motor freni, Motor/Generatör (M/G) ünitesinden faydalanılarak aracın sahip olduğu kinetik enerjinin yüksek gerilim bataryasına depolanması prensibiyle çalışmaktadır. Bu yapıda aracın hareketini sağlayan elektrik motoru frenleme veya yavaşlama sırasında generatör olarak çalıştırılmakta ve elde edilen enerji, yüksek gerilim bataryasına aktarılmaktadır. Ancak bu yapının en önemli dezavantajı, bataryaların yapıları itibarıyla yüksek miktarda enerjiyi kısa zamanda üzerine alamamalarıdır [1, 2]. Generatörden bataryaya bir enerji akışı olsa bile, batarya bu enerjinin ancak çok küçük bir kısmını depolayabilmektedir.

Geri kazanımlı frenlemenin maksimum birkaç 10 saniye sürdüğü düşünülürse, 8 saatte tam şarj olabilen bir bataryanın, 15 – 20 saniyelik şarj sonrasında doluluk oranının ihmal edilebilecek kadar az bir miktar artacağı görülmektedir [3]. Bu nedenle aracın sahip olduğu kinetik enerjiyi depolayabilmek için ultra-kapasitör ve volan gibi enerjiyi bataryaya göre oldukça hızlı biçimde üzerine alabilen alternatif enerji depolama teknolojileri kullanılmaktadır [4]. Ultra-kapasitör ve volan enerji depolama sistemleri kısa zamanda büyük miktarda enerji depolayabilmektedir [5].

VEDS teknolojisi, enerjinin kısa sürede depolanması ve depolanan bu enerjinin kısa sürede yüke aktarılmasını sağlayabilecek bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır.

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında frenleme sırasında çok yüksek oranda enerji kaybı meydana geldiği görülmektedir [6]. Aracı durdurmak veya yavaşlatmak istediğimizde geleneksel sistemlerde mekanik frenleme yapılmaktadır. Bu durumda aracın sahip olduğu kinetik enerji, mekanik frenlerde ısı enerjisi olarak kaybolmaktadır. Aracı durgun halden hareketli hale geçirmek istediğimizde ise frenlerde ısı olarak kaybedilen enerjiyi araca tekrar kazandırmak için ya yakıt harcanmakta ya da bataryalardan enerji çekilmektedir. VEDS bulunan araçlarda ise frenleme esnasında ortaya çıkan enerji, döner bir kütleyi harekete geçirip yüksek devirlere çıkarmakta kullanılmaktadır. Aracın harekete geçirilmesi istendiğinde ise VEDS’de depolanan enerji, aracın hız kazanması için kullanılmaktadır. Bu sayede aracın sahip olduğu kinetik enerji ısı enerjisine dönüştürülmez ve kinetik enerji olarak VEDS’de depolanır.

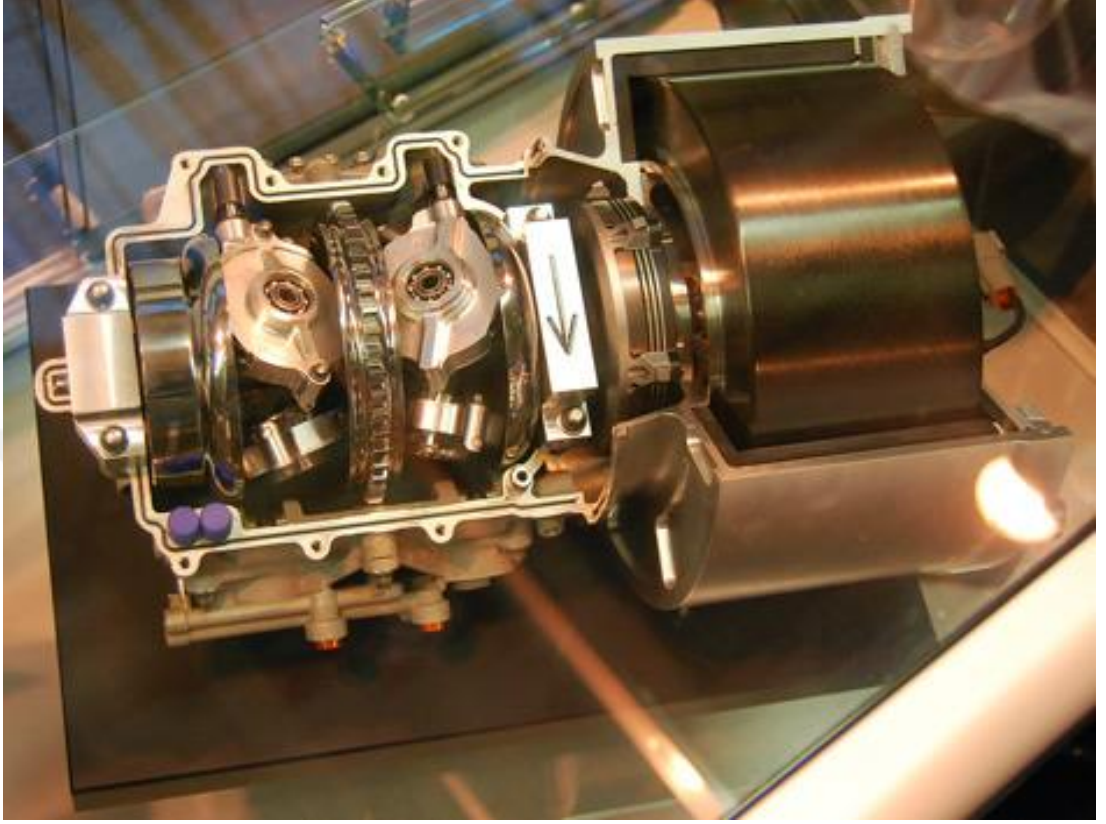
Uygulamalı bir çalışmada, içten yanmalı motora sahip ve VEDS ünitesi entegre edilmiş bir şehir içi otobüsünün yakıt tüketiminin % 18 düştüğü belirtilmektedir. Aynı çalışmada, otobüsün trafiğin sıkışık olduğu Tahran şehrinde kullanılması durumunda yakıt sarfıyatının % 28,4 azaldığı belirtilmektedir [7]. Bu sonuç, geri kazanımlı frenlemenin VEDS kullanılarak bir araca entegre edilmesi durumunda, aracın menzilinın yaklaşık olarak % 28 oranında artabileceği anlamına gelmektedir.

VEDS’in elektrikli araçlarda kullanımı inceleyen bir çalışmada, sistemin verimliliğinin % 90 – 95 civarında olduğu belirtilmektedir. Bu verimlilik değerleri geleneksel içten yanmalı motorlara ve aktarma sistemlerine göre çok daha yüksektir. VEDS üniteleri 0 – 50 MW gibi geniş bir aralıkta üretilip daha çok şebeke bağlantılı uygulamalarda kullanılabilmektedir [8].

VEDS ünitesi bir araca seri veya paralel hibrit olarak entegre edilebilmektedir. Manyetik yataklama yerine döner rulmanların kullanılmasının, hem maliyet hem de güvenilirliği arttırdığı belirtilmektedir. Ayrıca VEDS’in ağır hizmet araçlarında da performans araçlarında da kullanılabilecek bir teknoloji olduğu bildirilmektedir [9].

Dünyada araç uygulamaları için VEDS ünitesi üzerine yapılan Ar-Ge çalışmaları devam etmekte olup, Flybrid firması otomobil üreticisi olan Volvo ve Jaguar firmaları için seri üretim VEDS’leri tasarlamak ve araçlara entegre etmek üzere

prototip ürünler geliştirmektedir. Şekil 1.1’de Flybrid firmasının tasarladığı VEDS ünitesi görülmektedir [10-12].

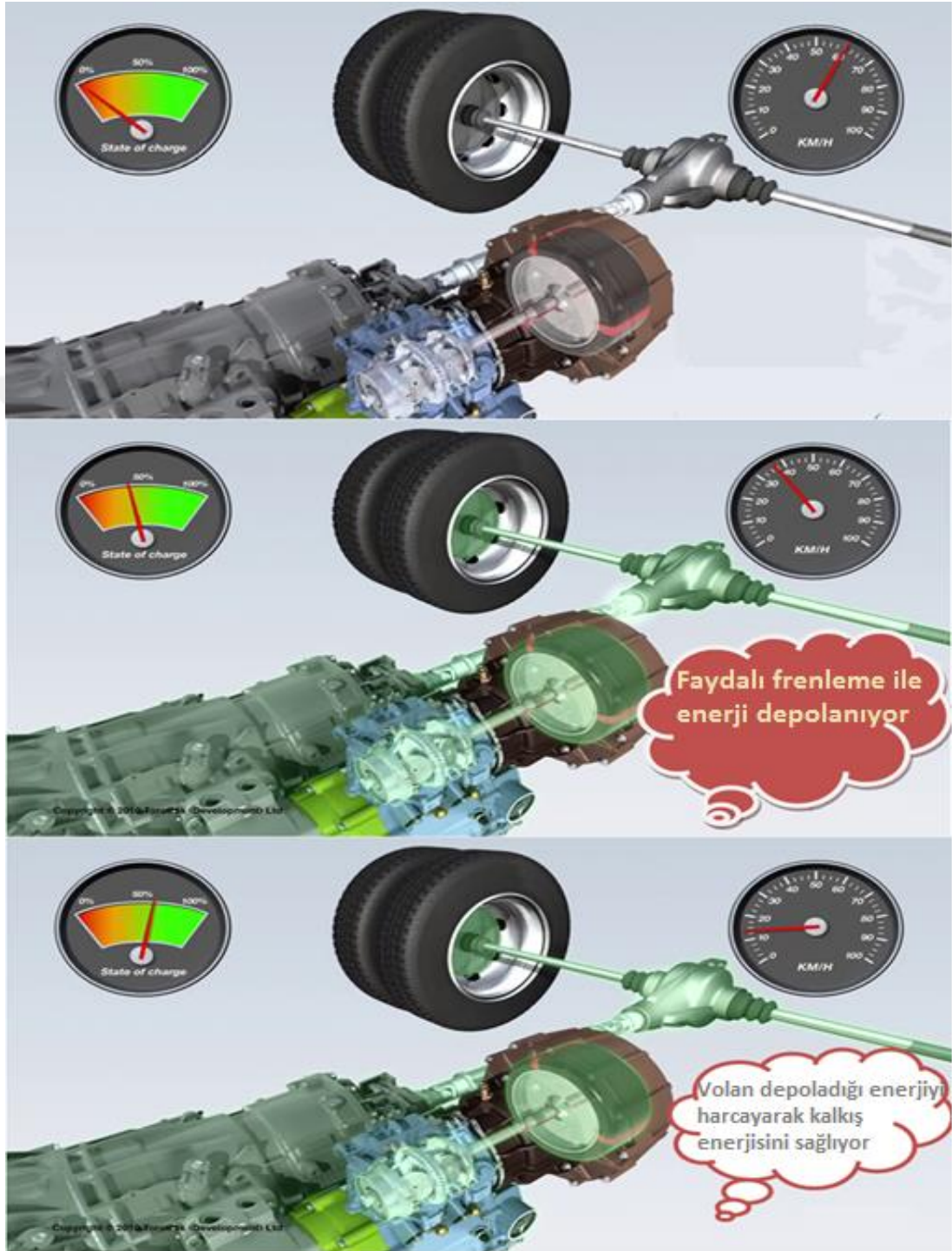


Şekil 1.1. Flybrid firmasının ürettiği volan ünitesi [11]

Flybrid firmasının tasarladığı sistemde kullanılan VEDS’ler enerjiyi, tamamen mekanik olarak “Continuous Variable Transmission (CVT)” yani sürekli ayarlı transmisyon kullanarak depolamakta ve depoladığı enerjiyi sisteme geri aktarmaktadır. Elektriksel herhangi bir enerji dönüşümü bu sistemde yer almamaktadır. Şekil 1.2’de, Flybrid firmasının bir otobüste kullandığı VEDS ünitesinin faydalı frenleme sırasında enerjiyi depolaması ve depoladığı enerjiyi ihtiyaç halinde araca aktarma senaryosu görülmektedir [13]

İlk durumda otobüsün sabit bir hızla hareket ettiği ve VEDS ünitesinde depolanmış enerjinin olmadığı görülmektedir. Ardından otobüsü yavaşlatmak için frene basıldığında, aracın tekerlerinden VEDS ünitesine doğru bir enerji akışı olmaktadır. Bu sırada VEDS’in depoladığı kinetik enerji miktarı hızla doğru orantılı biçimde artarken otobüsün hızı azalmaktadır. Son olarak otobüs hızlanmak istediğinde VEDS’e depolanmış enerji kullanılır. Bu sırada VEDS’in depoladığı kinetik enerji

hızla orantılı biçimde azalırken otobüsün hızı artar. Böylece geri kazanımlı frenleme yapılarak aracın kinetik enerjisi depo edilir ve ihtiyaç halinde tekrar kullanılır.



Şekil 1.2. CVT kullanan (elektiriksel bir yapı barındırmayan) VEDS teknolojisinin bir otobüse uygulanması ve kullanım senaryosu [13]

VEDS ünitesinin kullanımı sadece otomotiv alanı ile sınırlı değildir. Literatürde VEDS ünitesinin rüzgâr türbinlerinde değişken debili ve vuruntulu hava akışının

yumuşatılmasında kullanıldığı görülmektedir[14]. Rüzgar türbinlerinin dönüş sayıları, rüzgarın şiddetine göre anlık olarak değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenlik generatör çıkış geriliminin genliğini ve frekansını değiştirmektedir. Frekansın ve gerilimin genliğinin değişmesi, güç kalitesini olumsuz etkilemektedir. Rüzgâr türbinlerinde öne çıkan en önemli problemlerden birisi bu değişkenliktir. VEDS ünitesinin rüzgar türbinlerine entegre edilmesi ile rüzgar hızı arttığında VEDS devreye girerek enerjiyi üzerine alır. Böylece rüzgârdan sağlanan anlık ve yüksek enerji VEDS'e depolanır. Rüzgâr hızı azaldığında ise VEDS ünitesi depoladığı enerjiyi generatöre aktarır. Böylece azalan rüzgâr enerjisi VEDS'den gelen enerji ile takviye edilmiş olur. Aynı zamanda frekansın ve gerilimin genliğinin sabit kalması da sağlanmış olur [15, 16].

Rüzgâr enerjisi alanında yapılan bir diğer çalışmada ise hibrit bir yapı önerilmektedir. Dizel jeneratör ile rüzgar türbininin hibrit bir şekilde enerji üretim santrali olarak çalıştırılması, VEDS ünitesinin ise bu sisteme entegre edilerek frekans regülasyonu sağlamaya yardımcı olması üzerine simülasyon çalışmalarına yer verilmektedir [17].

Benzer şekilde VEDS'in şebeke bağlantılı olarak kullanılması durumunda, güç kalitesini arttıran bir depolama sistemi olduğuna vurgu yapılmaktadır [18]. Elektrik şebekesinde meydana gelen, güç kalitesini bozan anlık gerilim düşümleri, gerilim yükselmeleri, kısa süreli kesintiler vs. gibi olayların kompanze edilmesinde şebeke bağlantılı VEDS üniteleri, özellikle ABD'de büyük ölçekli istasyonlarda ticari ürün olarak kullanılmaktadır [19-23].

VEDS'in elektrik şebekesindeki kısa süreli kesintileri veya anlık yüksek güç taleplerini karşılaması için kullanılması durumunda, enerji depolama kapasitesi ve sisteme verebileceği güç değeri ile çeşitli batarya teknolojilerine göre daha düşük maliyetli olduğu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca VEDS'in lityum bataryalara göre derin deşarj kapasitesinin daha yüksek olduğu belirtilmektedir [24, 25].

Yapılan çalışmalara bakıldığında özellikle Amerika'da hem büyük güçlü şebekeye entegre sistemlerde hem de otomotiv uygulamalarında VEDS teknolojisine ciddi yatırımlar yapılarak, prototip ürün geliştirme aşaması bir adım ileri taşınmış ve seri üretim VEDS'ler kullanılmaya başlanmıştır. Şebekeye entegre sistemlerde Beacon

Power şirketi Massachusetts, New York ve Pennsylvania da toplam 60 MW'ın üstünde VEDS kurmuştur [26].

Kaliforniya Üniversitesi bünyesinde yapılan bir çalışmada, 2300 kg ağırlığa sahip 32 kWh enerji depolama kapasitesinde bir VEDS ünitesi üretilmiştir. Sistemin tamamı vakumlu tüp içerisinde konumlandırılmış ve rotor yataklaması manyetik olarak yapılmaktadır. Üretilen VEDS ünitesinin şebekedeki anlık yüksek güç taleplerine karşılık vermek üzere, Kaliforniya da 20 MW gücünde bir santral kurulmasında kullanılacağı belirtilmektedir [27].

2020 yılında Avrupa da elektrikli araçların, toplam araç sayısının % 35'i olacağı öngörülmektedir. Bu değerden yola çıkarak şebeke üzerinden şarj olan elektrikli araçların, şebekenin aşırı yüklü olduğu zamanlarda VEDS santrallerinden şarj edilmesini önerilmektedir [28].

Şebekeye entegre VEDS'lerde güç çok büyüktür. Bu nedenle kullanılan ünitelerin boyutları da büyük olmaktadır. Çok büyük kütlelere sahip ve çok yüksek hızlarla dönen depolama ünitelerinin rotor bölümleri mekanik yataklarla sürtünmeli olarak çalıştırılması bazı sorunlara yol açmaktadır [29]. Bu nedenle bu tip ünitelerde genellikle havası alınmış gövde içerisinde manyetik olarak yataklanmış rotorlar kullanılmaktadır. Manyetik yataklama hem sürtünmeden kaynaklı problemleri ortadan kaldırmakta hem de ünitenin ömrünü uzatmaktadır [21, 30]. Tasarlanan manyetik rulmanlar sayesinde 4 ton ağırlığa sahip volanın 6000 d/d hızla döndürülmesi mümkün olabilmektedir [31]. Ancak elektrikli araçlarda kullanılan VEDS'lerde rotor yataklaması, aracın sürekli hareket halinde olmasından dolayı manyetik olarak yapılamamaktadır. Bunun yerine yüksek devirlere çıkabilen ve sürtünme değerleri düşük olan seramik rulmanlar kullanılmaktadır. Ayrıca rotor kısmında kullanılan malzemelerin cinsine göre, volanların çıkabilecekleri hız değerleri ve depolayabilecekleri enerji değerleri de farklılık göstermektedir [32].

Literatür taraması yapan bir çalışmada, VEDS'in ultra küçük uydu sistemlerinin beslenmesinden, çok büyük boyutlu ağların beslenmesine kadar geniş aralıkta destek sağlayabilen bir depolama teknolojisi olduğu belirtilmektedir. Ayrıca hibrit araçlarda, raylı sistem taşımacılığında, rüzgâr türbinlerinde, şebeke bağlantılı hibrit

güç sistemlerinde, denizcilikte ve uzay uygulamalarında kullanıldığı belirtilmektedir [33].

VEDS ve ultrakapasitörün kullanıldığı bir hibrit elektrikli araçta maliyet analizi yapılmakta ve ultrakapasitör grubunun VEDS'den 2,5 kat daha pahalıya mal olduğu belirtilmektedir [34, 35].

VEDS ünitesinin hafif raylı sistem taşımacılığında kullanılmasına ilişkin simülasyon çalışmalarına bakıldığında, 725 kW güce ve 2,9 kWh enerji depolama kapasitesine sahip VEDS bulunduran sistemin veriminin % 31 arttığı gösterilmektedir. Aynı çalışmada VEDS kapasitesi 1,2 kWh ve gücü 360 kW olduğunda toplam kazancın % 11 olduğu belirtilmektedir [36].

VEDS ile ilgili yapılan geniş kapsamlı literatür taraması içeren bir çalışmada, VEDS'in otomotiv alanında gelecek vadeden, "yeşil enerji" depolama teknolojisi olduğu belirtilmektedir. Bataryalar ve ultra-kapasitörler gibi kimyasal içerikli bazı depolama teknolojileri, ilk üretimleri sırasında ve ekonomik ömürlerini doldurduklarında, çevre için zararlı atıklar ortaya çıkmaktadır. Ancak VEDS ünitesi kolaylıkla geri dönüştürülebilecek demir, çelik, karbon, cam elyaf gibi çevreye zarar vermeyen temel materyallerden üretilmektedir [37, 38].

VEDS üniteleri taşınabilir kesintisiz güç kaynağı (UPS) olarak da kullanılabilir. VEDS ünitesinin kamyonete monte edilmesiyle, ihtiyaç duyulan yere taşınabilmesi ve orada kesintisiz güç kaynağı olarak enerji sağlayabilmesi mümkün olmaktadır [39].

VEDS ünitesi ayrıca uzay uygulamalarında da tercih edilen ve hâlihazırda NASA tarafından uydu uygulamalarında kullanılan bir teknolojidir [40]. Bu bağlamda Gazi Üniversitesi'nde yapılan deneysel bir çalışmada, VEDS ünitesinin uzay uygulamalarında da kullanılabileceği gösterilmektedir. VEDS'e depolanan enerji uzun süreli ve düşük enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında kullanılabilmektedir [41, 42].

Sandia Lab.'ın yayımladığı bir raporda da VEDS'in gelecek vadeden bir depolama teknolojisi olduğu, çok çeşitli alanlarda kullanılabileceği (araçlar, havacılık, uzay

uygulamaları vs.) örnekler üzerinden ifade edilmektedir. Ayrıca bu raporda, VEDS’de kullanılabilecek materyallerin çeşitleri ve bu materyallerin sağladığı avantajlar, güç ve enerji yoğunluğu olarak hesaplamalı şekilde verilmektedir [43].

Bu tez çalışması kapsamında, EA ve HEA’larda kullanılmak üzere prototip VEDS üniteleri üretilmektedir. EA ve HEA’ların verimlerini artırmak ve aynı enerji ile daha uzak menzile ulaşabilmek adına farklı boyutlarda ve enerji depolama kapasitelerine sahip VEDS üniteleri üretilmektedir. Ayrıca kinetik enerji depolama sistemi ile enerjiyi statik olarak depolayan UEDS ünitesi performans, maliyet, ağırlık ve boyut yönünden karşılaştırılmaktadır. İlave olarak, mekanik enerji aktarımlı (CVT) VEDS ile elektriksel enerji aktarımlı (M/G) VEDS teknolojileri maliyet, boyut, ağırlık ve güvenilirlik yönünden karşılaştırılmaktadır.

Çalışma kapsamında iki farklı boyutta VEDS ünitesi üretilerek, büyük kütle düşük devir ve küçük kütle yüksek devir kombinasyonları oluşturulmaktadır. Böylece devir sayısının ve kütlenin VEDS ünitesinin enerji depolama dinamiğine etkisi tespit edilmektedir. Ayrıca her iki VEDS ünitesi için dar ve geniş olmak üzere 4 farklı rotor ile performans analizleri yapılmaktadır.

VEDS’de depolanan enerji, VEDS’in kütlesine, rotor çapına ve rotor devrine bağlıdır. Ancak kütle arttıkça, rotor çapı büyüdükçe ve devir sayısı arttıkça sistemin kararlı ve titreşimsiz çalışması ile güvenlik konusu önem kazanmaktadır. Bu nedenle sistemin tasarım ve üretim aşaması büyük önem arz etmektedir. Yapılan çalışmada, VEDS’in üretilmesinin ardından, enerjiyi kinetik olarak depolamak ve depolanan bu kinetik enerjiyi tekrar elektrik enerjisine çevirmek için, sisteme bir Fırçasız Doğru Akım Motoru (FDAM) entegre edilmektedir.

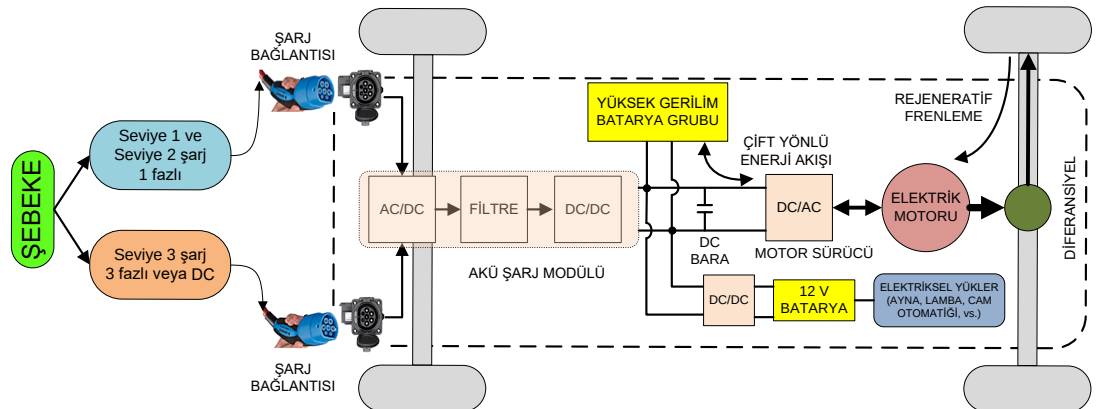
Ülkemizde enerji depolama alanındaki çalışmalar henüz hedeflenen seviyede değildir. Ayrıca ülkemizin gelişmesi için üzerinde durulması gereken en önemli konu, yerli kaynaklarla üretim yapılması ve bu sayede dışa bağımlılığın azaltılmasıdır. Dünyada ticari anlamda kullanılan depolama teknolojilerinden biri olan VEDS ile ilgili ülkemizde yeterince deneysel çalışma bulunmamaktadır. Yapılan çalışma ile bu teknolojinin yakından tanınması ve uygulamalı tecrübe kazanılarak, ulusal ve uluslararası literatüre katkıda bulunulması amaçlanmaktadır.

2. ELEKTRİKLİ VE HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Geleneksel bir araçta yakıt deposu ve içten yanmalı motor bulunmaktadır. Hibrit elektrikli araçta ise yakıt deposu ve daha küçük bir içten yanmalı motora ilave olarak bir elektrik motoru ve batarya grubu araç tahrikine yardımcı olmaktadır. Şehir içerisinde, ara hızlanmalarda elektrik motoru, ardından da içten yanmalı motor devreye girmektedir. Araç yavaşlaması sırasında ise elektrik makinası generatör olarak çalışarak bataryayı beslemekte ve böylece yakıt tüketimi azaltılmaktadır.

Şekil 2.1'deki gibi elektrikli bir araçta ise yakıt deposu ve içten yanmalı motor bulunmaz. Bunun yerine bir elektrik makinası ve buna enerji sağlayan bir yüksek gerilim bataryası bulunmaktadır. Ayrıca şebekeden bataryayı şarj etmek için gerekli olan şarj modülü ve aracın tahrik dışındaki elektrikselsel yüklerini beslemek üzere ihtiyaç duyulan bir alçak gerilim bataryası mevcuttur.

Şarj bağlantısı üzerinden elektrikli araca gelen gerilim, araç içerisindeki AA/DA doğrultucu modül tarafından doğrultulmaktadır. Doğrultulan bu gerilim bir filtre tarafından, ilk halinden daha düzgün bir DA gerilim haline getirildikten sonra aracın DA barasına verilir. Araç şarjı sırasında DA baradan sadece batarya grubuna doğru bir enerji akışı söz konusudur.



Şekil 2.1. Elektrikli aracın yapısı [44]

Araç hareket halinde iken DA bara, farklı yönlere enerji akışının olduğu bir köprü görevi görür. Bu durumda yüksek gerilim bataryası DA barayı besleyen kaynaktır.

Düşük gerilim bataryası, şarj modülü ve motor sürücü devresi ise DA baradan beslenen alıcılardır. Araçlarda yüksek gerilim bataryasına ilave olarak bir de düşük gerilim bataryası bulunmasının temel nedeni üretim maliyetlerinin aşağı çekilmesi ve hayati tehlikeyi ortadan kaldırmaktır. Araçta kullanılan lambaların, küçük güçlü birçok elektrik motorunun (fan motoru, ayna motoru, sunroof motoru, silecek motoru vs.) geleneksel araçlardakinden farklı olarak, yüksek gerilim batarya geriliminde (400 V) çalışabilir şekilde üretilmesi ekstra maliyet anlamına gelmektedir. Bununla birlikte yüksek gerilimle temas neticesinde araç içerisinde hayati tehlike de oluşturabilmektedir. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için yüksek DA bara gerilimi DA/DA kıyıcı kullanılarak 12 V'a indirilerek düşük gerilim bataryasına bağlanmaktadır.

Elektrikli araçlarda en temel sorun batarya kapasitesi ve buna bağlı olarak menzil olduğu için bu araçlarda geri kazanımlı (rejeneratif) frenleme büyük önem arz etmektedir. Yapılan bir çalışmada elektrikli aracın dik bir yokuşu çıkarken 72 kW'lık güç tükettiği, aynı yokuşu inerken ise elektrik makinasının generatör olarak çalışmasıyla 24 kW'lık bir gücü bataryaya aktardığı görülmektedir [45].

Günümüzde 60 lt'lik bir yakıt tankı (dizel/benzin) ve yaklaşık % 30 – 35 verimle çalışan bir içten yanmalı motor ile 600 – 1000 km'lik menzile ulaşmak mümkündür. Yaklaşık 400 kg'lık bir bataryası bulunan ve % 90 verimle çalışan elektrik makinası üzerinden tahrik edilen bir elektrikli araç ise ortalama olarak 200 km menzile ulaşabilmektedir. Gelecekte enerji yoğunluğu yüksek ve hafif bataryaların geliştirilmesi ile elektrikli araçların kısa menzil problemleri giderilebilecektir. Ayrıca normal şarj ile ancak 6 – 9 saat arasında şarj edilebilen elektrikli araçların, hızlı şarj (30 dakika) yöntemlerinin geliştirilmesi ile geleneksel içten yanmalı araçlara göre tercih edilme potansiyelleri yükselecektir.

Hibrit elektrikli araçların kullanılan hibrit yapıya bağlı olarak farklı çeşitleri bulunmaktadır. Aracın batarya kapasitesine göre kat edebileceği mesafe de değişkenlik göstermektedir. Ayrıca hibrit yapıya göre aracın bara gerilim değeri de değişmektedir. Mikro hibrit araçta sadece start/stop ve starter alternatör vasıtasıyla batarya dolumu özellikleri varken, tam hibrit araçta sadece elektrik motoru ile 50 km

kadar yol gidilebilmektedir. Tablo 2.1’de farklı hibrit yapıya sahip araçların teknik özellikleri görülmektedir.

Tablo 2.1. Farklı tipteki hibrit elektrikli araçların özellikleri

Araç Yapısı	Kısa Tanım	Gerilim (V)	Enerji Kapasitesi (kWh)	Güç (kW)
Mikro Hibrit	Start/stop, starter alternatör ile limitli frenleme, elektrikle hareket yok	12	0,6 – 1,2	2
Hafif Hibrit	Start/stop, geri kazanımlı frenleme, ara hızlanmalarda destek verme, tamamen elektrikle sürüş yok	36-150	1	5 – 20
Tam Hibrit	Start/stop, geri kazanımlı frenleme, ara hızlanmalarda destek verme, kısa mesafeli elektrikli sürüş	200-400	1	30 – 50
Fişe Takılabilir Hibrit	Start/stop, geri kazanımlı frenleme, tam elektrikli sürüş	200-400	5 – 20	30 – 100
Tam Elektrikli	Geri kazanımlı frenleme, tam elektrikli sürüş	200-600	10 – 100	30 – 350

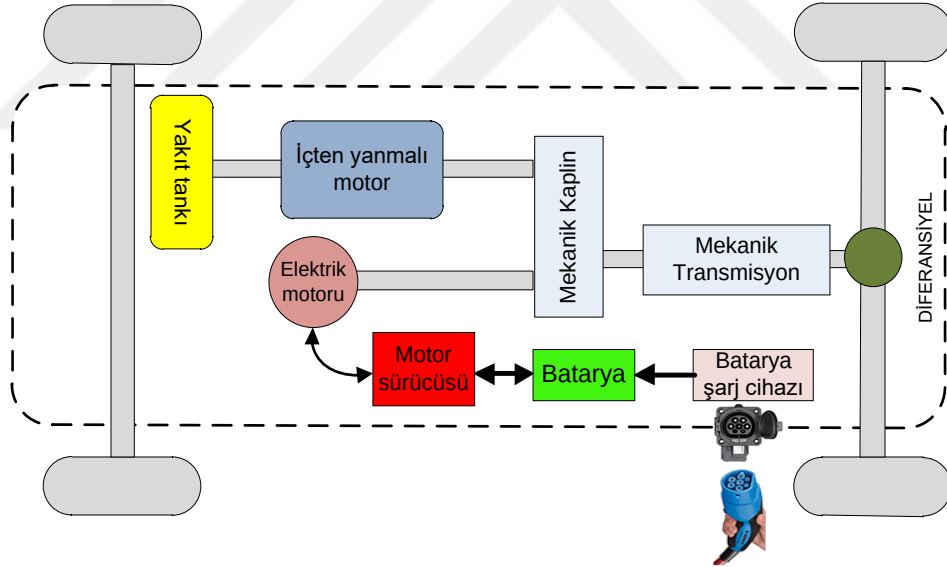
Elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar yapıları itibariyle bazı avantajlara sahiptirler. Bu avantajlar maddeler halinde sıralanacak olursa;

- Boşta durma sırasında enerji harcamazlar.
- Erken dönem yakıt kapatma teknolojisi ile frenleme yapılırken elektrik motorunu durdurarak enerji tasarrufu yaparlar.
- Kalkışlarda maksimum moment değerini yakalayarak performans artışı sağlarlar.
- Vites değiştirme sırasında yaşanan sarsıntıları ve gecikmeleri ortadan kaldırır.
- Geri kazanımlı frenleme yaparak yakıt ve enerji sarfiyatını azaltır, verimliliği artırır.
- Tam elektrikli araçlarda ve seri hibrit araçlarda şanzıman grubu devreden çıkarıldığı için üretim maliyeti aşağı çekilmiş olur.
- Elektrik motorlarının enerji ve güç yoğunlukları içten yanmalı motorlara göre daha yüksektir.
- Elektrik motorlarının kullanım ömrü içten yanmalı motorlara göre daha uzundur.
- İçten yanmalı motorlar elektrik motorlarına göre daha karmaşık yapıda ve daha çok parçadan oluşmaktadır. Problem çıkarma olasılıkları daha fazladır.
- Elektrik motorlarının gürültü seviyesi yok denecek kadar azdır. İçten yanmalı motorlara göre daha sessizdirler.
- Elektrik motorlarının verimi içten yanmalı motorlara göre çok daha yüksektir.

Hibrit araçlar, içten yanmalı ve elektrik motorunun yerleşimine göre yapısal olarak seri, paralel ve kombine olmak üzere sınıflandırılırlar.

Paralel hibrit yapıda elektrik motoru içten yanmalı motor ile birlikte aktarma organlarını tahrik eder. Aracın hareketini hem elektrik motoru hem de içten yanmalı motor sağlayabilir. Bilindiği gibi içten yanmalı motorlar araç hareket etmese bile, rölanti devrinde yakıt tüketmeye devam ederler. Ancak elektrik motorları sadece hareket ettikleri süre boyunca enerji harcarlar. Böylece araç belirli bir hızın altında seyreden sıkışık trafikte sadece elektrik motorunu kullanarak yakıt tasarrufu sağlayabilir.

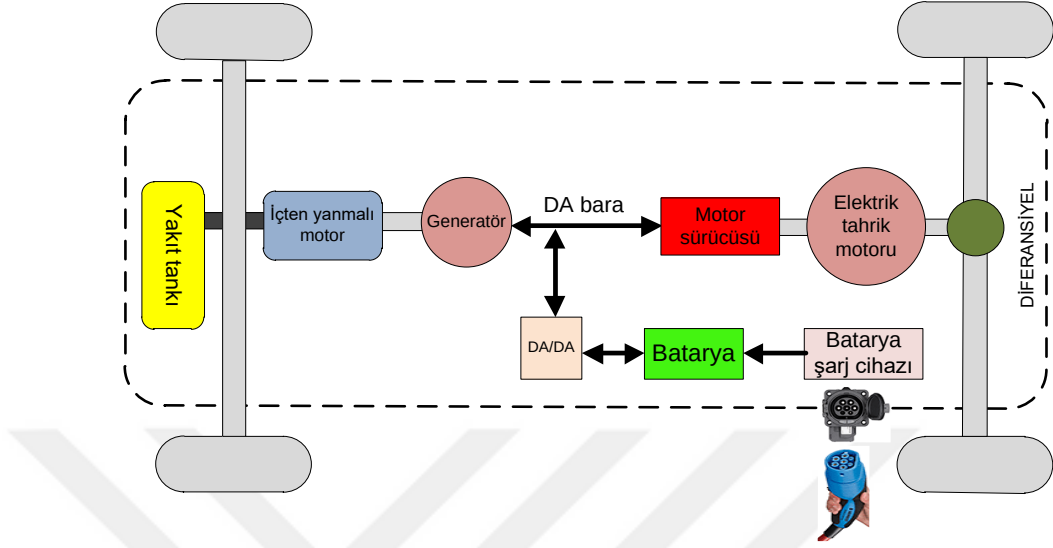
Ayrıca araç yüksek hızlarda seyrederken veya ara hızlanmalar sırasında ilave güce ihtiyaç duyduğunda da elektrik motoru araca destek vererek belirli bir süre boyunca performansı artırmaktadır. Üreticilerin en çok tercih ettiği yapı paralel hibrit yapıdır. Şekil 2.2’de paralel hibrit yapı görülmektedir.



Şekil 2.2. Paralel hibrit araç yapısı

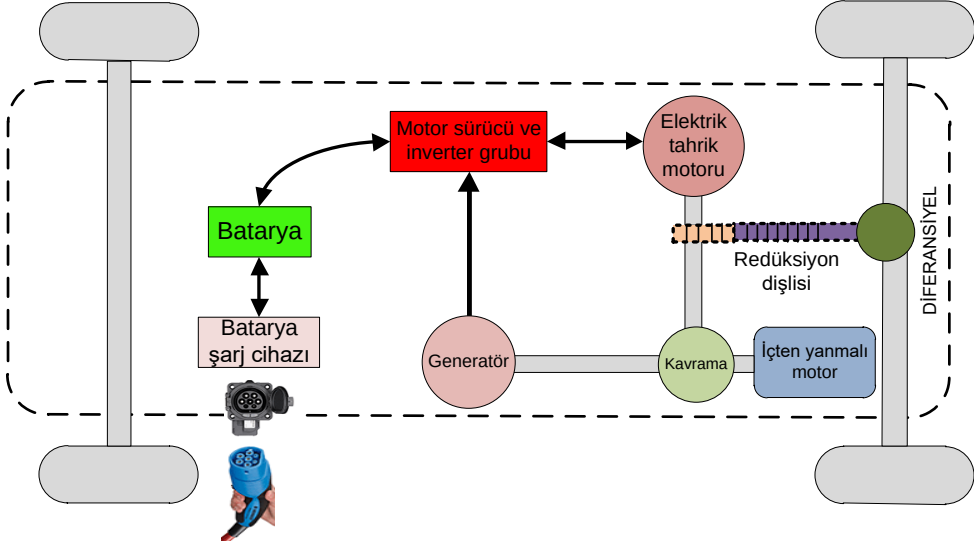
Seri hibrit yapıda ise içten yanmalı motor aracın tahrik sistemine doğrudan bağlı değildir. İçten yanmalı motor en düşük yakıt tüketiminin olduğu devir bandında sürekli bir şekilde çalışarak kendisine bağlı olan generatör sayesinde elektrik üretir. Bu yapıda aracın hareketini sağlayan başka bir elektrik motoru mevcuttur. Bu motor çekiş/tahrik motoru olarak adlandırılır. Üretilen elektrik ile hem aracın batarya grubu

şarj edilir hem de aracın hareketini sağlayan motora enerji aktarılır. Şekil 2.3’de seri hibrit aracın yapısı görülmektedir.



Şekil 2.3. Seri hibrit araç yapısı

Şekil 2.4’de seri-paralel kombine hibrit araç yapısı görülmektedir. Seri-paralel kombine yapıda ise içten yanmalı motor tek başına aracın tahrik sistemine gücü aktararak hareketi sağlayabilir.



Şekil 2.4. Seri-paralel kombine hibrit araç yapısı

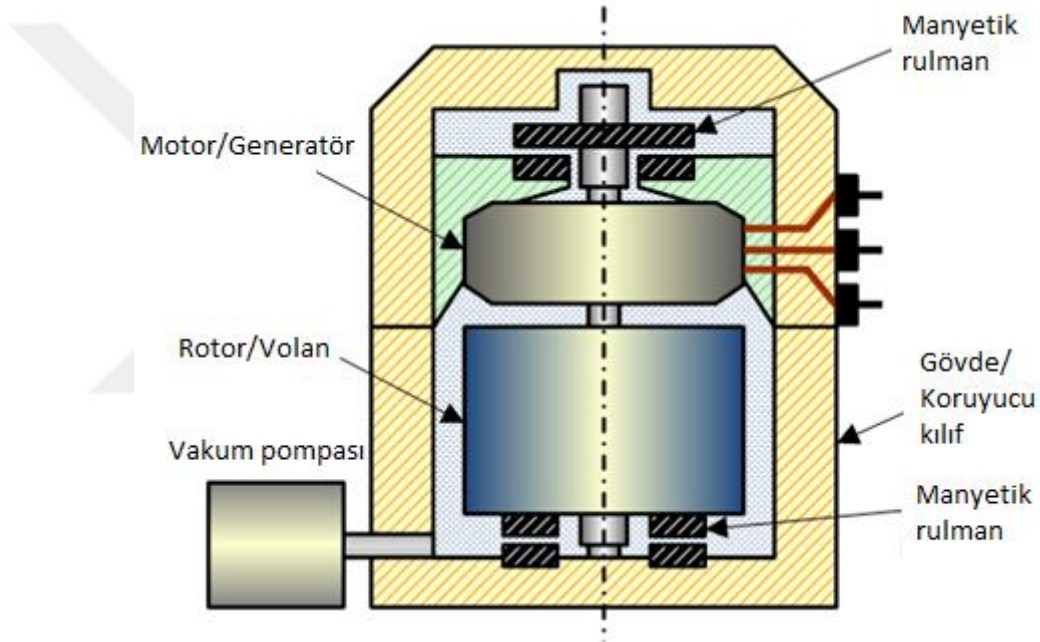
İkinci durumda ise, içten yanmalı motor aracın tahrikinden ayrılarak elektrik motorunun ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisini üretmek için bağımsız bir şekilde çalışabilir. Bu durumda, aracı elektrik motoru tek başına hareket ettirmektedir.

Üçüncü durum ise aracın yüksek güç ihtiyacı olduğu zaman hem elektrik motorunun hem de içten yanmalı motorun birlikte tahrik sistemine güç aktardığı durumdur.



3. VOLAN ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ

VEDS, enerjinin yüksek hızlarda dönen bir kütleye kinetik olarak depolanması prensibiyle çalışan bir enerji depolama teknolojisidir. Volana enerji depolanırken döner kütle, yani sistemin rotor kısmı devir kazanır. Deşarj sırasında ise döner kütle, yani sistemin rotor kısmı devir kaybeder ve bu enerji elektrik enerjisi olarak üretilir [45-47]. Şekil 3.1’de volan enerji depolama sisteminin temel yapısı verilmektedir [45].



Şekil 3.1. Volan enerji depolama sistemi temel yapısı [45]

VEDS’ler temelde iki şekilde tasarlanırlar. İlk yapıda döner kütle oldukça ağır seçilir. Ancak bu tip sistemlerde kütle, yani sistemin rotor kısmı devir kazanır. Deşarj sırasında ise döner kütle, yani sistemin rotor kısmı devir kaybeder ve bu enerji elektrik enerjisi olarak üretilir [45-47]. Bu tip sistemler genelde çok sayıda VEDS’in paralel olarak bağlanmasıyla oluşturulan şebeke bazlı santral uygulamalarda tercih edilmektedirler ve ihtiyaç halinde yükü 1 – 2 saat kadar besleyebilirler. Amerika da çeşitli bölgelerde 2011 yılından beri faaliyet gösteren çok sayıda VEDS tesisi bulunmaktadır. Bu tesislerin kurulu güçleri 60 MW’ın üzerindedir. Benzer şekilde Kanada’da da 2014 yılında kurulmuş bir depolama tesisi bulunmaktadır [46, 47].

İkinci yapıda ise döner kütle ilk yapıya göre oldukça hafiftir. Rotor yapımında kullanılan malzemeler yüksek dayanımlı kompozit malzemeler olabilir. Bu tip VEDS'lerin hızları ise 10000 – 100000 devir/dakika'ya kadar çıkmaktadır. Burada depolanan enerji miktarı rotorun dönüş sayısı yükseltilerek artırılır. VEDS'in depoladığı enerji, rotorun dönüş sayısının karesi ile doğru orantılı biçimde artmaktadır. Dolayısıyla ikinci tip VEDS'ler ilk tip VEDS'lere göre ileri teknoloji üretim teknikleri gerektirmektedir. Genellikle uzay ve havacılık, elektrikli araç ve savunma sanayi uygulamalarında tercih edilmektedirler. Her iki tip VEDS'in de verimliliği % 80'in üzerinde olmaktadır.

VEDS'lerde kullanılan rotorlar farklı malzemelerden yapılabilir. Tablo 3.1'de farklı rotor malzemelerinin sağladığı enerji yoğunluğu ve mekanik dayanım değerleri verilmektedir [47].

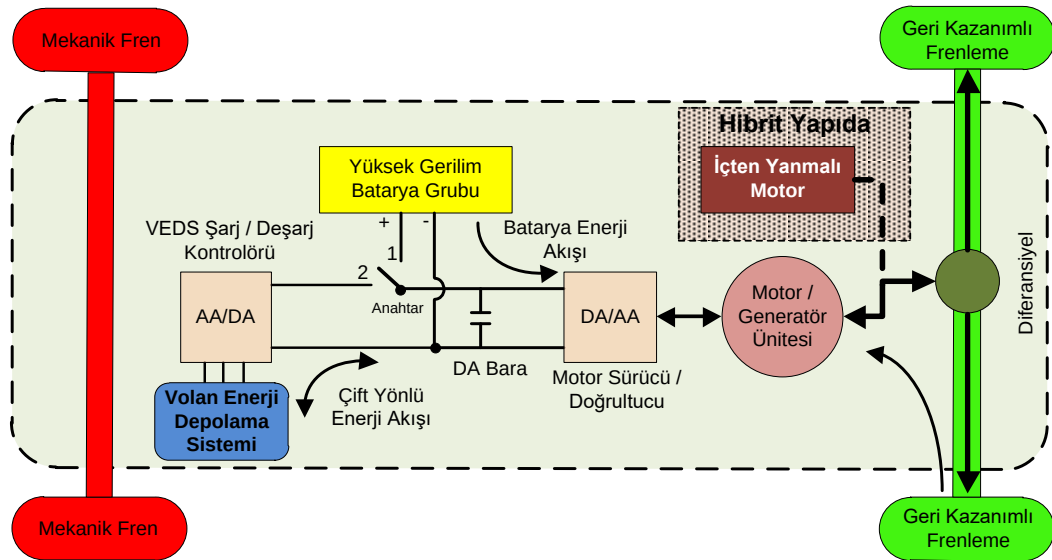
Tablo 3.1. Farklı rotor malzemelerinin enerji yoğunlukları ve mekanik dayanımları [48]

Materyal	Mekanik kuvvet (N/mm ²)	Enerji yoğunluğu (Wh/kg)
Döküm demir	150	5
Karbonlu çelik (Fe 34)	340	12
Cam elyaf destekli plastik (keçe)	400	28
Alaşımli çelik (30 NiCrMo12)	1000	36
Ağaç (kayın)	120	36
Alüminyum alaşım (2024)	450	46
Alüminyum alaşım (Ergal 65)	600	61
Magnezyum alaşım	320	61
Titanyum alaşım (ZK 60)	1150	63
Maryaşlandırma çeliği	1900	66
Ağaç (ceviz)	220	78
Ağaç (maun)	160	86
Çelik tel (DP 0.38)	3000	110
Bor elyafli plastik	1400	180
Cam elyaf destekli plastik (çok yönlü)	1300	180
Grafit elyafli plastik (çok yönlü)	1300	230
Kevlar elyafli plastik (çok yönlü)	1200	240
E-cam (lif)	3500	390
Grafit (lif)	2800	390
Bor (lif)	4000	420
Kevlar 29 ve 49 (lif)	2700	480
S-cam (lif)	4800	530
Kevlar T-950 (lif)	2850	550
Kuvars (lif)	6800	730
Bor-grafit alaşım (lif)	6000	840
Al ₂ O ₃ (flaman)	21000	1440
B ₄ C (flaman)	14000	1500
SiC (flaman)	20000	1800
Grafit (flaman)	21000	2500

Belirli bir devir sayısına kadar demir-çelik alaşımları kullanılan rotorların yapımında, yaklaşık 50000 devir/dakika'dan sonra kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Bunun nedeni, rotorun yüksek hızlarda dönmesi sırasında malzeme üzerinde meydana gelen merkezkaç kuvvetinin, malzeme üzerinde aşırı mekanik gerilimlere yol açmasıdır. Limit değerin üzerine çıktığında, rotor malzemesi merkezkaç kuvvetine yenik düşerek dağılmaktadır. Bu durum tehlike arz etmektedir.

3.1. EA ve HEA'lar İçin Önerilen VEDS Topolojileri

EA ve HEA'larda kullanılmak üzere önerilen VEDS ünitesinin araca entegrasyon şeması Şekil 3.2'de görülmektedir. EA'larda aracın yüksek gerilim bataryası temel enerji kaynağıdır. Bu kaynaktan sağlanan enerji ile harekete geçen araç durmak istediğinde, M/G ünitesi generatör olarak çalıştırılmaktadır. Böylece çift yönlü enerji akışı sağlanmış olur. Aracın kinetik enerjisi M/G ünitesi ile elektrik enerjisine dönüştürülerek DA baraya aktarılır. Sistemde kullanılan bir elektronik anahtar yardımıyla (SSR), aracın hareketi için yüksek gerilim bataryası ve geri kazanımlı frenleme enerjisinin depolanması için VEDS ünitesi arasında seçim yapılmaktadır. Böylece geri kazanımlı frenleme enerjisi bataryaya değil VEDS ünitesine yönlendirilmektedir.

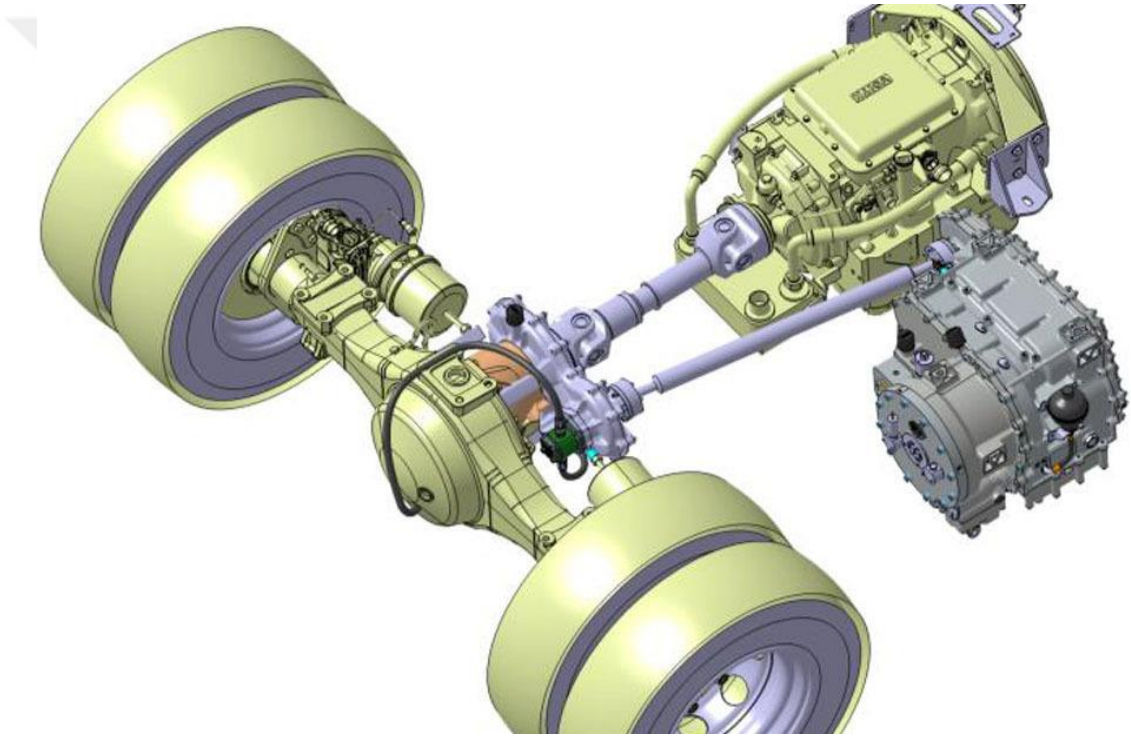


Şekil 3.2. VEDS ünitesinin EA ve HEA entegrasyonu

HEA'daki da durum EA'ya benzer olmaktadır. HEA'lar yapıları itibariyle iki farklı hareket ve enerji kaynağına sahiptir. Bu nedenle EA'ya göre en önemli fark hareket

için gerekli olan enerjinin, batarya grubunun yanı sıra İYM tarafından da karşılanabilmesidir. Oluşturulan hibrit yapının cinsine göre, elektriksel tahrik ile konvansiyonel tahrik sistemleri beraber çalışmaktadırlar.

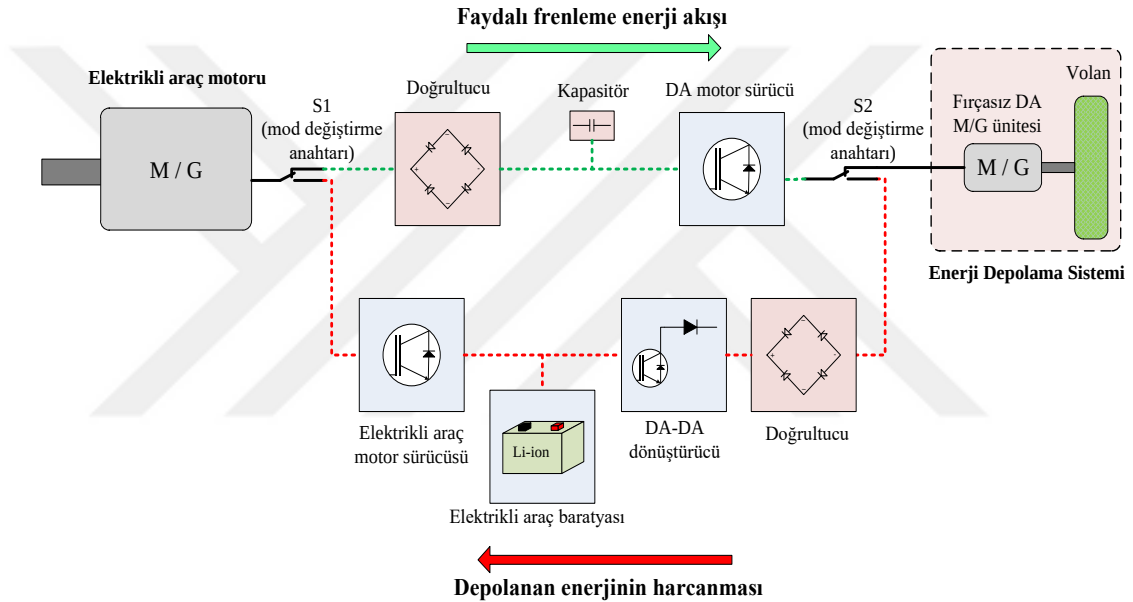
Önerilen sistemin haricinde EA ve HEA’larda kullanılmak üzere tasarlanan VEDS ünitelerinin, enerji aktarım şekillerine göre farklı tipleri mevcuttur. Bunlardan en bilineni Flybrid firmasının ürettiği mekanik CVT ile enerji aktarımı sağlayan sistemdir. Bu sistemde enerji, aracın aksından CVT yardımıyla VEDS ünitesine depolanmaktadır. Şekil 3.3’de Flybrid firmasının ürettiği CVT aktarmalı VEDS ünitesi görülmektedir [13].



Şekil 3.3. VEDS ünitesinin bir otobüse uygulanması [13]

Bu uygulamalarda sistemde volan ağırlığının dışında bir de CVT ünitesi mevcuttur. CVT ünitesi yüksek hassasiyet ile üretilmesi gereken ve karmaşık mekanik elemanlar içeren bir sistemdir. Bu sistemde hız ayarı yapabilmek için plakaları eksenel biçimde hareket ettirmek gerekmektedir. Bu hareket hidrolik bir sistem yardımıyla kontrol edilmektedir. Bütün bu bileşenler sistem maliyetini, ağırlığını ve arıza çıkarma olasılığını artırmaktadır. Ayrıca CVT, hareketi aracın aksından mekanik olarak aldığı için, sistemi aracın aksına entegre etmek gerekmektedir. Sistemin başka bir alana konumlandırılması mümkün olmamaktadır. Ancak önerilen sistemde mekanik CVT

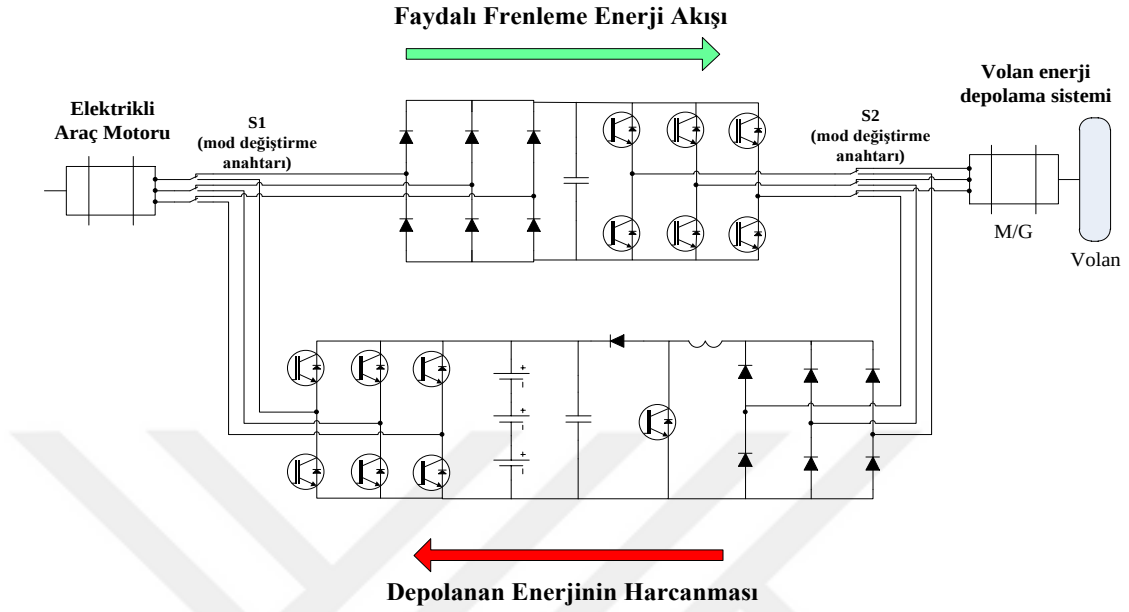
bulunmamaktadır. EA veya HEA'nın elektrik motorunun generatör olarak çalıştırılması ile enerjinin elektriksel olarak üretilmesi ve iletimi söz konusudur. Önerilen sistem topolojisinde VEDS'in enerji akışına baktığımızda iki farklı durum görülmektedir. Birinci durumda, VEDS'e doğrudan bağlı olan Fırçasız Doğru Akım Makinası (FDAM) motor modunda çalıştırılmakta ve volana hız kazandırılarak sisteme enerji depolanmaktadır. İkinci durumda ise, ilk durumun tersine VEDS'te depolanan enerji, FDAM'ın generatör modunda çalıştırılmasıyla aracı hareket ettirebilmek için kullanılmaktadır. Bu iki durum için önerilen sistem topolojisi Şekil 3.4' de görülmektedir.



Şekil 3.4. EA ve HES'lar için tasarlanan VEDS ünitesinin çift yönlü enerji akış diyagramı

Faydalı frenleme sırasında S1 ve S2 anahtarları "Faydalı frenleme enerji akışı modu"na geçmektedir. Bu durumda aracın elektrik motoru generatör olarak çalıştırılmakta ve enerji sırasıyla önce üç fazlı kontrolsüz bir doğrultucudan geçmektedir. Ardından bir kondansatör ile gerilim dalgalanmaları düzeltilmektedir. Sonrasında ise sürücü ve M/G ünitesine doğrudan bağlı olan rotora hız kazandırılarak enerji VEDS'e depolanmaktadır. Depolanan enerjinin kullanılması ise VEDS ünitesinin deşarj edilmesiyle mümkün olmaktadır. Bu durumda enerji, S1 ve S2 anahtarlarının yön değiştirmesiyle VEDS'den doğrultucuya, ardından DA/DA dönüştürücü üzerinden aracın motor sürücüsüne aktarılmaktadır. Elektrikli araç

motoru ile VEDS arasındaki enerji akış diyagramı verilen sistemin devre şeması Şekil 3.5’de görülmektedir.

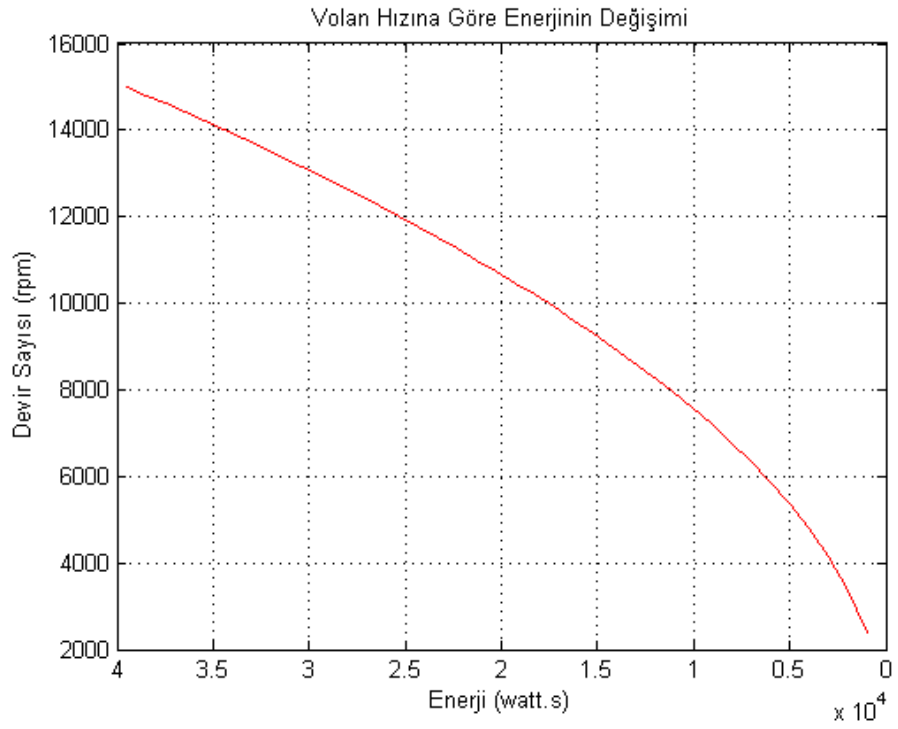


Şekil 3.5. VEDS entegre edilmiş araç devre şeması

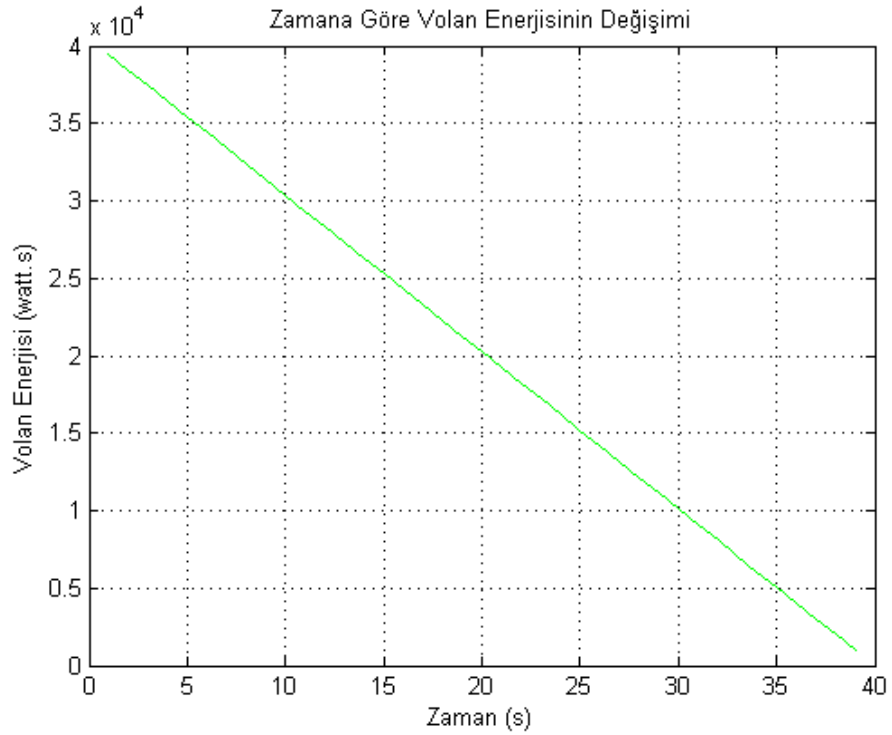
3.2. Volan Enerji Depolama Sistemi Simülasyon Çalışmaları

Volan enerji depolama sisteminin üretilmesinden önce çalışmalar ışığında, sistemin simülasyon çalışmaları yapılarak karşılaşılabilecek sorunlar, enerji akışı ile ilgili ön veriler elde edilmektedir. Simülasyon çalışmalarında ilk olarak, MATLAB programında sistemin mekanik kısmı olan rotorun (volan) üzerine depoladığı enerjinin zamana göre değişimi ile ilgili grafikler, matematiksel formüller üzerinden kod yazılarak modellenmektedir. Bu modelleme sonucunda, istenilen devir sayısında ve istenilen büyüklükte bir volanın enerjisinin zaman bağlı, devir sayısına bağlı deşarj grafikleri ile devir sayısının zamana bağlı grafiği elde edilebilmektedir. Modellemeler yapılırken üretilecek olan prototiplerin enerji ve güç değerlerine yakın değerler seçilmektedir.

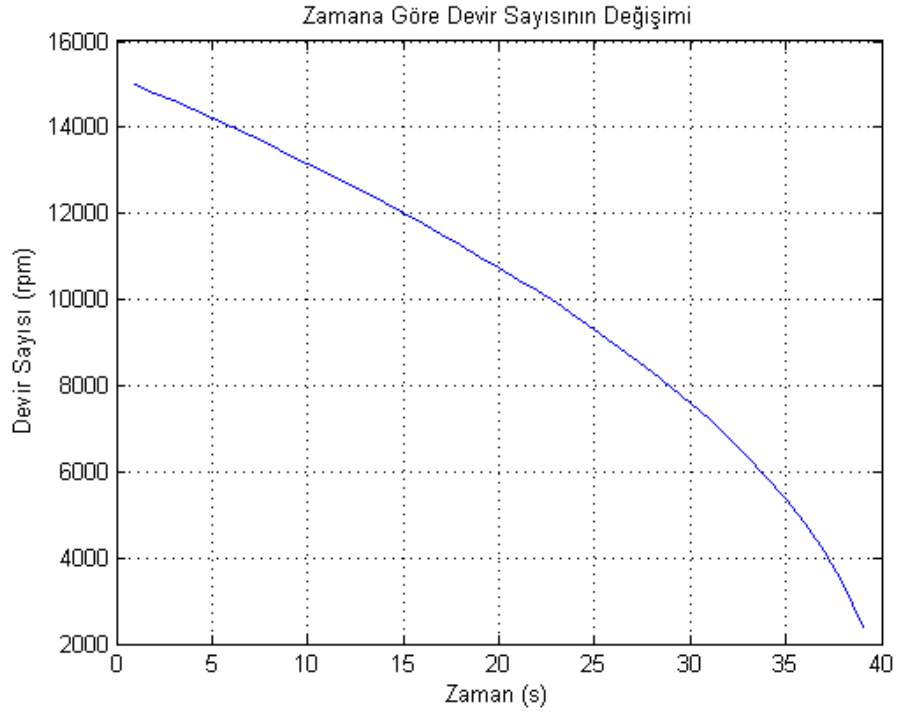
10 kg kütleyle sahip (rotor), yarıçapı 0,08 m olan ve 15000 d/d hıza sahip bir volanın enerjisi ve bu enerjinin 1000 W’lık bir yük tarafından tüketilmesi durumunda gözlemlenecek Devir Sayısı – Volan Enerjisi, Volan Enerjisi – Zaman, Devir Sayısı – Zaman değişim grafiklerine sırasıyla Şekil 3.6, 3.7 ve 3.8’de yer verilmektedir.



Şekil 3.6. Volan üzerinde depolanan enerjinin, volan devir sayısına göre değişimi



Şekil 3.7. Zamana göre volan enerjisinin değişimi



Şekil 3.8. Zamana göre volan devir sayısının değişimi

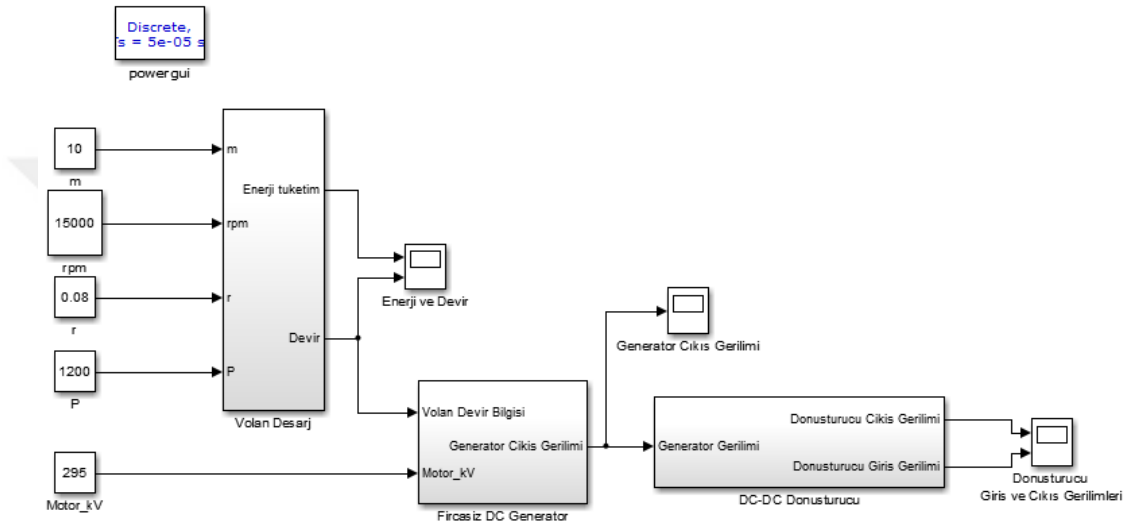
Volan üzerinde depolanan enerji, volan hızının karesi ile doğru orantılı olduğundan, Şekil 3.6'da devir sayısının yarıya düşmesi ile enerjinin $\frac{1}{4}$ oranına düştüğü gözlemlenebilmektedir. Volanda depolanan enerji ise çekilen güç sabit olduğu için zamana bağlı olarak Şekil 3.7'deki gibi doğrusal biçimde azalmaktadır. Volandan sabit güç çekildiğinden, zamana bağlı devir sayısı da Şekil 3.8'deki gibi üstel olarak azalmaktadır.

MATLAB'da yapılan çalışmalarda VEDS ünitesi ölçekli olarak simüle edilmektedir. Modelde VEDS'in toplam enerji kapasitesi 11 Wh olmaktadır. Bir aracın ihtiyaç duyduğu enerji kapasitesinin yaklaşık $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{5}$ 'i ölçekteki bir sistem modellenmektedir.

VEDS'in döner kısmının depoladığı enerjinin matematiksel eşitliklerle kullanılarak modellenmesinin ardından Simulink aracı kullanılarak tüm sistemin (motor ve DA/DA dönüştürücü dahil) modellenmesi yapılmıştır. Şekil 3.9'da VEDS'in genel modeline yer verilmektedir.

VEDS enerjii kinetik olarak depoladığından, sistemden enerji alındıkça volan hızı azalmaktadır. Bu da sistemin çıkış uç geriliminin düşmesine neden olmaktadır. Bu

nedenle çıkış gerilimini sabit tutmak için VEDS'in çıkışına bir DA/DA dönüştürücü eklenmektedir. Simülasyonlarda VEDS ünitesinin devri 15000 d/d çıkmaktadır. Bu durumda sisteme yaklaşık 11 Wh'lık enerji depolanmaktadır. Ardından depolanan enerji 1200 watt'lık bir yük üzerinden harcanmaktadır. VEDS 1200 watt'lık yükü yaklaşık 35 saniye beslemektedir. DA/DA dönüştürücünün giriş gerilimi yani generatörün çıkış gerilimi zamana bağlı olarak azalmaktadır. Ancak DA/DA dönüştürücünün çıkış gerilimi ayarlanan 60 V değerinde sabit kalmaktadır.



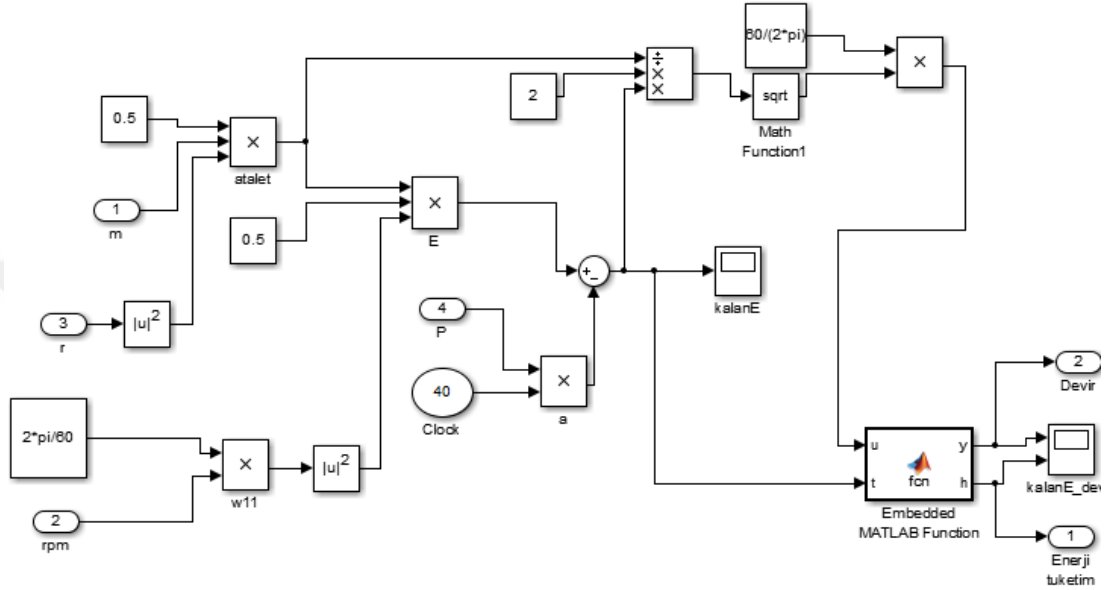
Şekil 3.9. VEDS'in genel MATLAB/Simulink modeli

İlk olarak volanın deşarj durumunun bloklar ile yapılan modellenmesine yer verilmektedir. Şekil 3.10'da volan deşarj bloğunun içi görülmektedir. Burada atalet ve enerji formülleri bloklar yardımı ile gerçekleştirilmektedir.

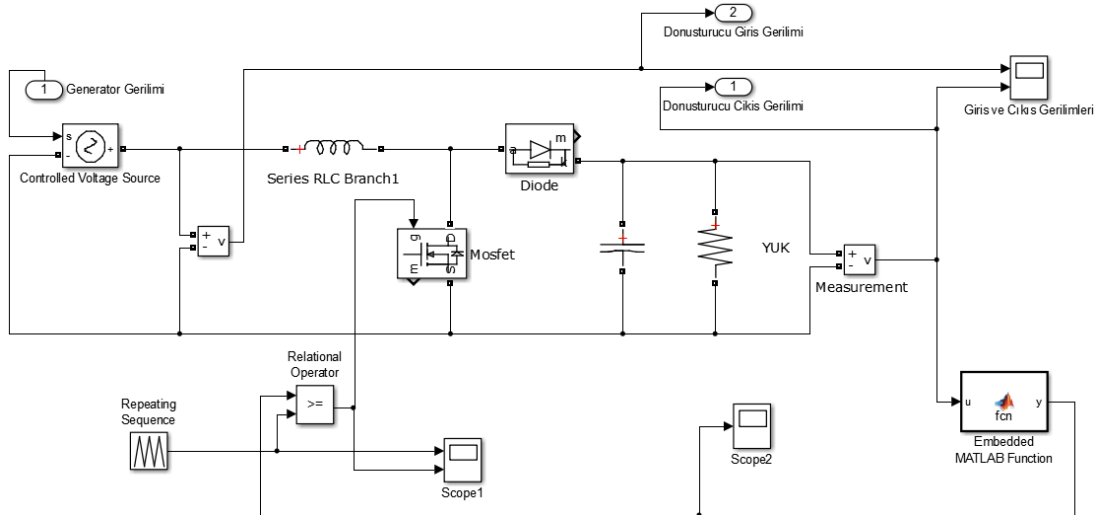
Volan M/G ünitesine doğrudan bağlı olduğundan motor devri volan devri ile aynı olup, volan devri azaldıkça generatör devri de azalmaktadır. Fırçasız DA makinalarının teknik verilerinde, motorun 1 volt ile kaç devir kazandığı bilgisi yer almaktadır. Benzer şekilde bu değer FDAM generatör olarak kullanıldığında mildeki devir sayısına göre çıkış gerilimini de vermektedir. Bu değer kullanılarak volanın devrine karşılık gelen generatör çıkış gerilim değeri elde edilebilmektedir. Şekil 3.9'da görülen modeldeki fırçasız DA generatör bloğu bu işlevi yerine getirmektedir.

DA/DA dönüştürücü bloğunda ise, yükseltici tip DA/DA dönüştürücü bulunmaktadır. Bu devre giriş geriliminin sürekli değişen yapısını, ayarlanan çıkış değerinde sabit tutmak için tasarlanmıştır. Bloğun iç yapısı Şekil 3.11'de

görülmektedir. Dönüştürücünün giriş gerilimi, generatörün zaman bağlı değişen (azalan) çıkış gerilimidir. Dönüştürücünün çıkış gerilimi ise 60 V olarak ayarlanmıştır. Kontrol algoritması, çıkış gerilimi olarak belirlenen değeri ve giriş gerilimini okur. Okunan bu iki değer arasındaki fark arttıkça dönüştürücünün darbe genişlik modülasyonu değiştirilerek çıkış gerilimi sabit tutulmaya çalışılmaktadır.



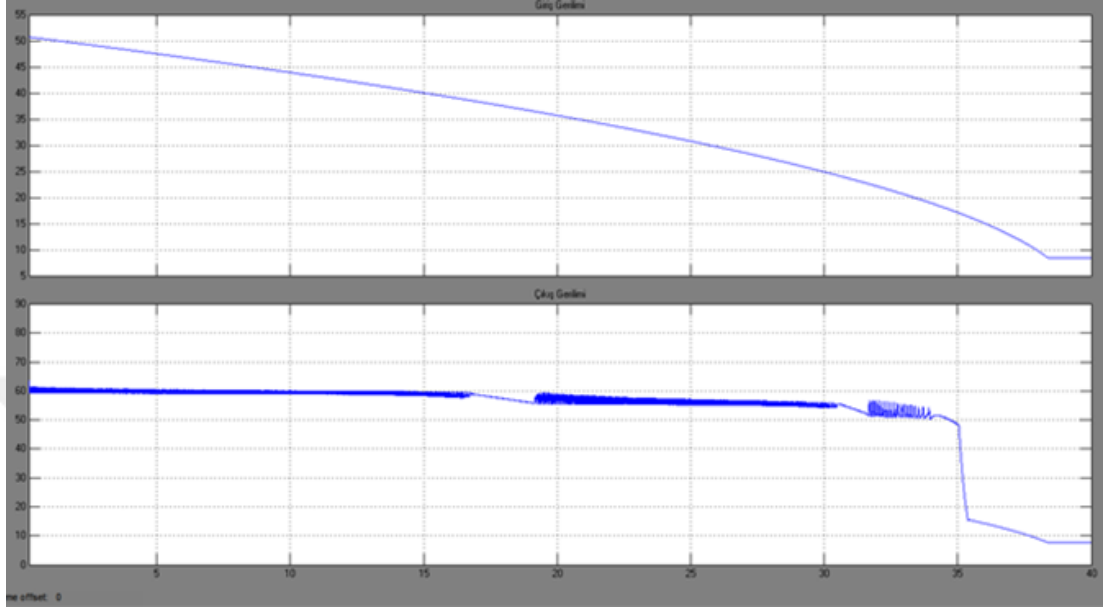
Şekil 3.10. Volan deşarj bloğunun modeli



Şekil 3.11. Geri beslemeli DA-DA dönüştürücü modeli

Dönüştürücü girişindeki endüktans değeri 1 mH ve çıkış kondansatörü 100 mF olarak belirlenmektedir. DA/DA dönüştürücünün çıkışındaki akım ve gerilim dalgalanmalarını azaltmak için yük değeri arttıkça çıkış kondansatörünün ve giriş

endüktansının da değeri artmalıdır. Volanın depoladığı enerji sabit yükte harcanmaktadır. DA/DA dönüştürücünün değişken giriş gerilimi ve 60 V değerine ayarlanan çıkış gerilimi Şekil 3.12’de görülmektedir.



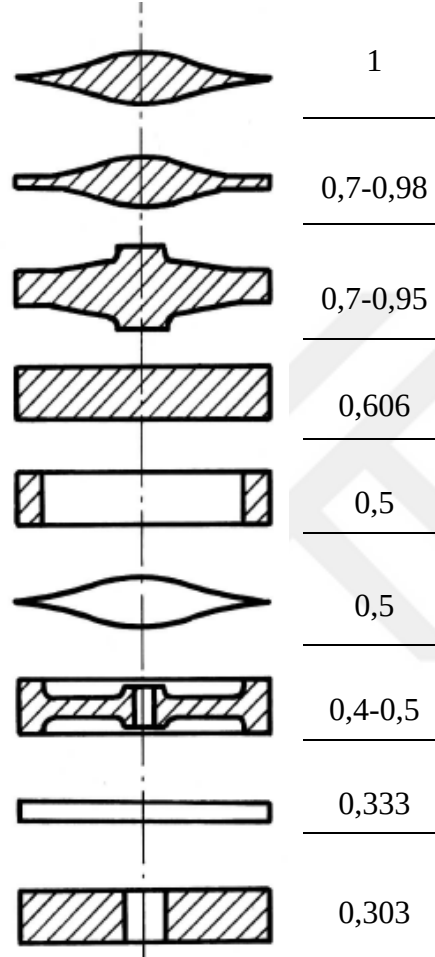
Şekil 3.12. DA-DA dönüştürücü giriş ve çıkış gerilim grafikleri

Çıkışına 1200 W yük bağlanan DA/DA dönüştürücünün giriş gerilimi 35 saniye içerisinde 53 V'den 8 V'ye kadar düşmektedir. Ancak çıkış gerilimi 55-60 V arasında sabit kalmaktadır.

3.3. Prototip Üretimi Gerçekleştirilecek VEDS Ünitelerine Ait Boyutsal Hesaplamalar

VEDS'lerin tasarım parametreleri kullanım alanlarına göre değişiklik arz etmektedir. Örneğin, şebeke uygulamalarında kullanılan VEDS'ler düşük devir/dakika (10000 d/d) değerine sahipken, büyük kütleli rotorlara (150 - 1500 kg) sahiptir. Fakat araç uygulamalarında kullanılan VEDS'ler düşük kütleli rotorlara (10 - 50 kg) sahiptir ve yüksek devirlere (60000 d/d) çıkabilmektedir. VEDS ünitesinde yer alan ve enerjiyi depolayan döner kütle farklı geometrilere sahip olabilmektedir. Bunlardan en temeli içi dolu silindirik yapıdaki rotordur. İçi dolu silindirik kütle için atalet momenti, içi boşaltılmış çember şeklinde bir kütle için atalet momentinin yarısı kadardır. Bu, içi dolu silindirik kütle için içi boş kütle için yarısı kadar bir enerjinin depolanabildiği anlamına gelmektedir. Ancak içi dolu kütle balansının daha rahat alınabilmesi,

yüksek devirlerde rezonansa yakalanma ihtimalinin düşük olması ve yüksek devirlerde meydana gelebilecek dağılma, patlama olaylarına karşı daha dayanıklı olması sebebiyle tercih edilebilmektedir. Şekil 3.13’de farklı geometriye sahip rotorların şekil faktörü katsayıları görülmektedir.



Şekil 3.13. Farklı geometriye sahip rotorların atalet momenti çarpanları

Tasarlanan sistem EA ve HEA’larda kullanılacak olan sistemin 1/4-1/5 ölçekli bir prototipidir. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre [49, 52] Avrupa’da şehir içi ortalama araç hızları 35 – 45 km/h aralığında olmaktadır. Ortalama bir aracın ağırlığını 1200 kg olarak aldığımızda, 40 km/h (11 m/s) hızla hareket eden bir aracın kinetik enerjisi Denklem (2.1) ile 72600 J (20 Wh) olarak elde edilmektedir. Şehir içi ortalama hızla (40 km/h) seyreden bir aracın, her durmak istediğinde 20 Wh’lık bir enerjiyi mekanik fren sisteminde ısı enerjisi olarak kaybettiği söylenebilir.

$$E = \frac{1}{2}mV^2 = \frac{1}{2} \times 1200 \times 11^2 = 72600 \text{ J} = 20 \text{ Wh} \quad (3.1)$$

Araç içi boyutları, kullanılacak olan yüksek teknolojiye sahip rulmanlar ve rotor malzemesi dayanım sınırları göz önüne alındığında, tasarlanan VEDS'in enerji depolama kapasitesi içi dolu silindirik biçimli kütle için Denklem (3.2) ile yaklaşık olarak 10800 – 21600 Ws hesaplanmaktadır. Literatürdeki benzer sistemler incelendiğinde VEDS'in araç içerisinde kapladığı hacmin yaklaşık 0,05 m³ olduğu görülmüştür [9].

$$E = \frac{1}{2}I\omega^2 = \frac{1}{4}mr^2\omega^2 \quad (3.2)$$

Denklemde verilen değişkenlerin açıklamaları Tablo 3.2'de verilmektedir.

Tablo 3.2. Kinetik enerji formülündeki değişkenler	
I	Eylemsizlik momenti (kg.m ²)
ω	Açısal hız (rad/s)
m	Kütle (kg)
r	Yarıçap (m)

Denklem (2.2)'den yola çıkıldığında 10800 – 21600 Ws'lik bir enerjiyi depolamak için gerekli olan cismin yaklaşık boyutları (çap/uzunluk/ağırlık) 10 cm x 4 cm x 2,5 kg ile 16 cm x 6 cm x 6 kg arasında değişmektedir.

Bu kriterler göz önüne alınarak iki farklı sistem tasarlanmasına karar verilmiştir. İlk olarak büyük sistemin tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmektedir. İlk sistemin maksimum devrinin 13000 d/d olmasına karar verilmiştir. Bunun en önemli nedeni rulmanların dayanımı ve çelik rotorun elastikiyet ve dağılma sınırlarının dışına çıkılmadan, sistemin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamaktır. Yüksek devirli çalışma sırasında doğabilecek problemlerin önüne geçilmesi ve güvenlik önlemi olarak rotorun 10 mm'lik çelik bir kılıf içerisinde dönmesi sağlanmıştır. Böylelikle doğabilecek mekanik sorunların tehlikeli sonuçlarının önüne geçilmesi amaçlanmaktadır. İlk sistemin rotor ölçüleri hesaplanırken aynı koruyucu kılıf ve flanşlar kullanılarak iki farklı ölçüde rotor üretilmesi planlanmıştır. Burada farklı güç yoğunluklarında ve farklı atalet değerlerine sahip çeşitli testleri yapabilmek hedeflenmektedir. Tablo 3.3'de büyük sisteme ait fiziksel büyüklüklere yer verilmiştir. Küçük boyutlu sistemde de tek bir dış kılıf yapılarak, bu kılıfa adapte

edilebilecek iki farklı volan üretimi gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Tablo 3.4’de küçük sisteme ait fiziksel büyüklüklere yer verilmektedir.

Tablo 3.3. Büyük sisteme ait fiziksel ölçüler

Geniş Volan	160mm(Çap)x60mm(Boy)
Dar Volan	160mm(Çap)x40mm(Boy)
Koruma Kılıfı Dış Çapı	195mm(Çap)x165mm(Boy)
Montaj Tablası	600mmx450mmx12mm

Tablo 3.4. Küçük sisteme ait fiziksel ölçüler

Geniş Volan	100mm(Çap)x60mm(Boy)
Dar Volan	100mm(Çap)x40mm(Boy)
Koruma Kılıfı Dış Çapı	140mm(Çap)x135mm(Boy)
Montaj Tablası	450mmx330mmx10mm

Tasarlanan büyük sistemle küçük sistem arasında bir bağıntı kurulabilmesi adına, her iki sistemin de rotor ölçülerinin genişlik ölçüleri eşit seçilmektedir. Geniş volanların boyları 60 mm, dar volanların boyları ise 40 mm olarak seçilmektedir. Burada rotor çapları ve devir sayıları birbirinden farklı iki sistemin aynı miktarda enerjiyi depolaması amaçlanmaktadır. Böylelikle optimum sistem tasarımının hangi kriterlere göre değişkenlik arz etmesi gerektiği ölçüm sonuçları ile ortaya konulacaktır. Büyük rotor çapına sahip sistemin ataleti de büyük olmaktadır. Bu da sisteme enerjinin depolanması sırasında kullanılması gereken motor mekanizmasının daha yüksek moment değerine sahip olması gerekliliğini doğurmaktadır. Küçük sistemde ise enerjinin depolanması sırasında büyük sisteme nazaran daha küçük moment değerine sahip makineler kullanılabilmektedir. Ancak burada da kullanılacak olan makinanın daha yüksek devir/dakika değerine sahip olması gerekmektedir. Büyük sistem ile küçük sistem arasındaki temel fark, birbirine yakın enerji depolama kapasitelerine sahip olmalarına rağmen, büyük sistemin kütlesinin büyük ancak maksimum devir sayısının daha düşük olması, küçük sistemin kütlesinin küçük ancak devir sayısının daha büyük olmasıdır.

Büyük sistem ile küçük sistem arasındaki temel farklardan bir diğeri de, sisteme enerjinin depolanması ve depolanan bu enerjinin geri alınmasını sağlayan motor/generatör (M/G) ünitesinin seçim parametreleridir. Büyük sistemde rotor devri

daha düşük olduğundan kullanılan M/G ünitesinin devir sayısı da daha düşük olmaktadır. Küçük sistemde ise devir sayısı yüksek olduğundan kullanılan M/G ünitesinin devir sayısı daha yüksek olmaktadır. Büyük sistemin çalışma devir aralıkları 2000 – 13000 devir/dakika arasındadır. Küçük sistemin çalışma devir aralıkları ise 3000 – 24000 devir/dakika arasındadır. Depolanan enerjinin harcanması sırasında, büyük sistemde 2000 d/d, küçük sistemde ise 3000 d/d'nın altındaki devirlerde sistemde kalan enerji kayda değer olmadığı için bu devirlerin altında sistemden enerji çekilmemektedir. Diğer bir deyişle bu değerler minimum enerji kesim değerleridir. Tablo 3.5'de VEDS'in maksimum ve kesim devir değerleri görülmektedir.

Tablo 3.5. VEDS'lerin maksimum ve kesim devir sayıları

	Büyük Sistem	Küçük Sistem
Maksimum Devir Sayısı	13000 d/d	24000 d/d
Kesim Devri	2000 d/d	3000 d/d

Yukarıda verilen sistemlerin devir sayısı değerlerinden yola çıkarak kullanılacak M/G üniteleri için bazı çıkarımlar yapılabilmektedir. Büyük sistemde kullanılacak olan M/G ünitesi seçimi yapılırken yük altındaki maksimum devir sayısının 15000 – 18000 d/d arasında olmasına dikkat edilmelidir. Fırçasız DA cinsi elektrik motoru maksimum devrini maksimum gerilim değerinde vermektedir. Bu nedenle sisteme enerji depolarken motorun sistemi 13000 d/d'ye çıkarabilmesi gerekmektedir. Küçük sistemde kullanılacak olan M/G ünitesi seçimi yapılırken maksimum devir sayısının 25000 – 28000 d/d arasında olmasına dikkat edilmelidir. Generatör modda çalışma ile sistemden enerji çekilirken ise sistemin maksimum devrinde generatörün uç geriliminin de maksimumda olması istenmektedir.

Bahsi geçen tasarım kriterleri çerçevesinde bakıldığında, iki sistem arasında bir diğer farklı nokta ortaya çıkmaktadır. Büyük sistemin devir değişkenliği (2000 d/d ile 13000 d/d arasında çalıştığından) 11000 d/d olmaktadır. Küçük sistemin devir değişkenliği ise (3000 d/d ile 24000 d/d arasında çalıştığından) 21000 d/d olmaktadır. Bu da küçük sistemde kullanılacak olan M/G ünitesinin daha geniş devir aralığında çalışması gerektiğini ve geniş devir aralıklarında moment ve verim eğrisinin düzgün olması zorunluluğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca küçük sistemde

kullanılacak olan güç elektroniği devrelerinin de gerilim ve akım değerleri bakımından daha geniş bir aralıkta çalışması gerekmektedir.

3.4. Volan Enerji Depolama Sistemi Mekanik Tasarımı, Prototip Üretimi ve Ön Test Çalışmaları

Ön test çalışmalarında her iki sistemde de kullanılabilecek parametrelere sahip bir M/G ünitesi ve motor sürücüsünden yararlanılacaktır. Kullanılan M/G ünitesi Şekil 3.14’de görülmektedir.



Şekil 3.14. Ön testlerde kullanılan M/G ünitesi [53]

Her iki sistemde de kullanılacağından yüksüz halde maksimum devir sayısı 45000 d/d olan bir M/G ünitesi tercih edilmiştir. Yüklü halde çalıştırıldığında 40000 d/d değerine ulaşabilmektedir. M/G ünitesinin teknik özellikleri Tablo 3.6’da verilmektedir. M/G ünitesini motor modunda çalıştırılmak için 3 fazlı fırçasız DA motor sürücü kullanılmaktadır. Motorun maksimum akımı 110 A olduğundan sürücü 120 A akım verebilecek büyüklükte seçilmiştir. VEDS’de kullanılan sürücü ünitesi Şekil 3.15’de görülmektedir. VEDS’i kısa zamanda maksimum devrine çıkarabilmesi için sürücünün anlık olarak yüksek akımlara dayanabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle zorlanmış akım dayanımı 150 A olan su soğutmalı bir sürücü kullanılmaktadır. Sürücü ünitesinin teknik özellikleri Tablo 3.7’de verilmektedir.

Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de üretimi gerçekleştirilecek olan VEDS ünitelerinin bilgisayar programı yardımıyla elde edilen farklı açılardan bakış sağlayan resimleri görülmektedir. Sistemde yer alan rotor, kaplin, flanş, koruma kılıfı (gövde) gibi bileşenlerin yerleşimleri ve sistemin genel tasarımı çizim programı sayesinde üretimden önce görülerek sistemle ilgili ön bilgi edinilmektedir.

Tablo 3.6. Ön testlerde kullanılan M/G ünitesinin özellikleri [53]

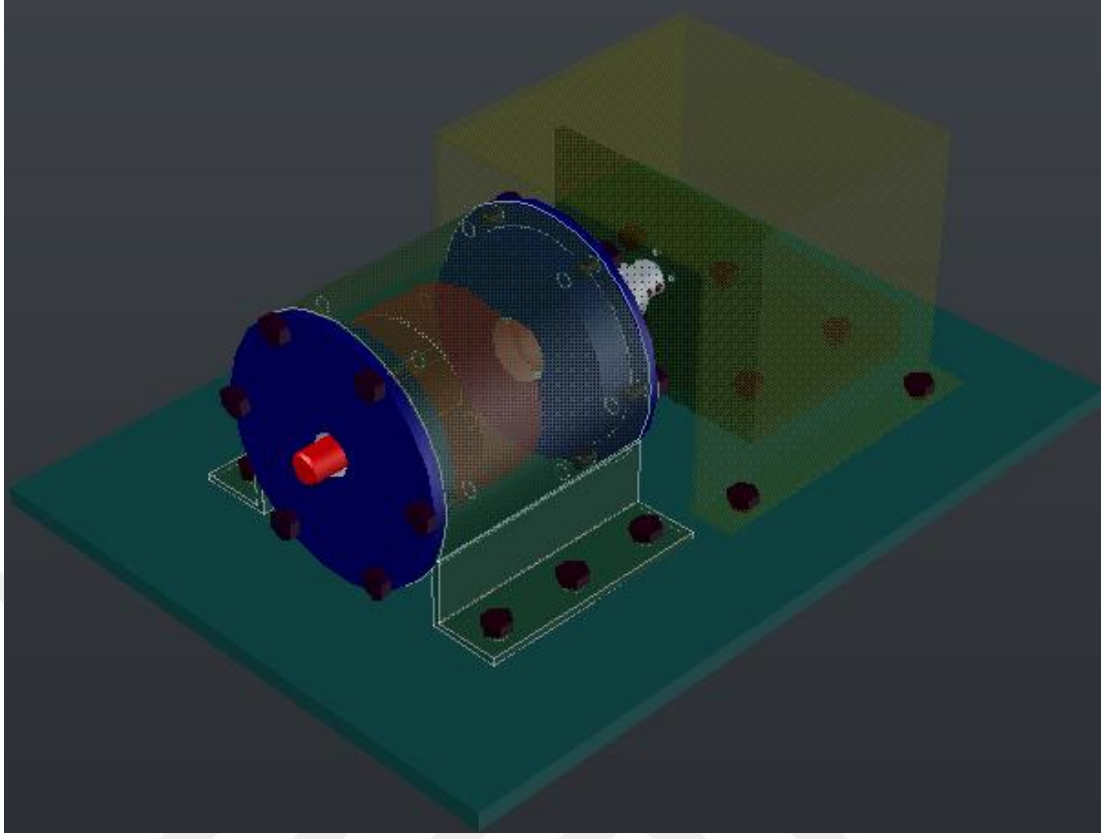
Kv (rpm/v)	1500
Ağırlık (g)	363
Maksimum Akım (A)	110
İç Direnç (ohm)	0,012
Maksimum Gerilim (V)	30
Güç (W)	3000
Mil A (mm)	8
Uzunluk B (mm)	68
Çap C (mm)	39
Sargı Kısmı Uzunluğu (mm)	60
Toplam Uzunluk (mm)	92



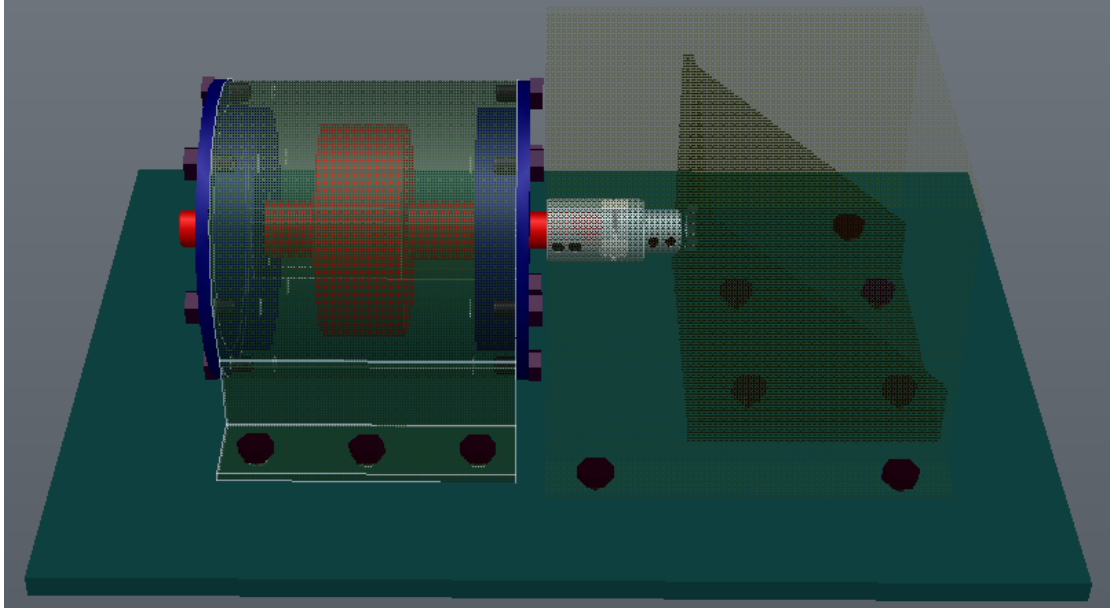
Şekil 3.15. Ön testlerde kullanılan M/G sürücü ünitesi [54]

Tablo 3.7. Ön testlerde kullanılan M/G sürücüsünün özellikleri [54]

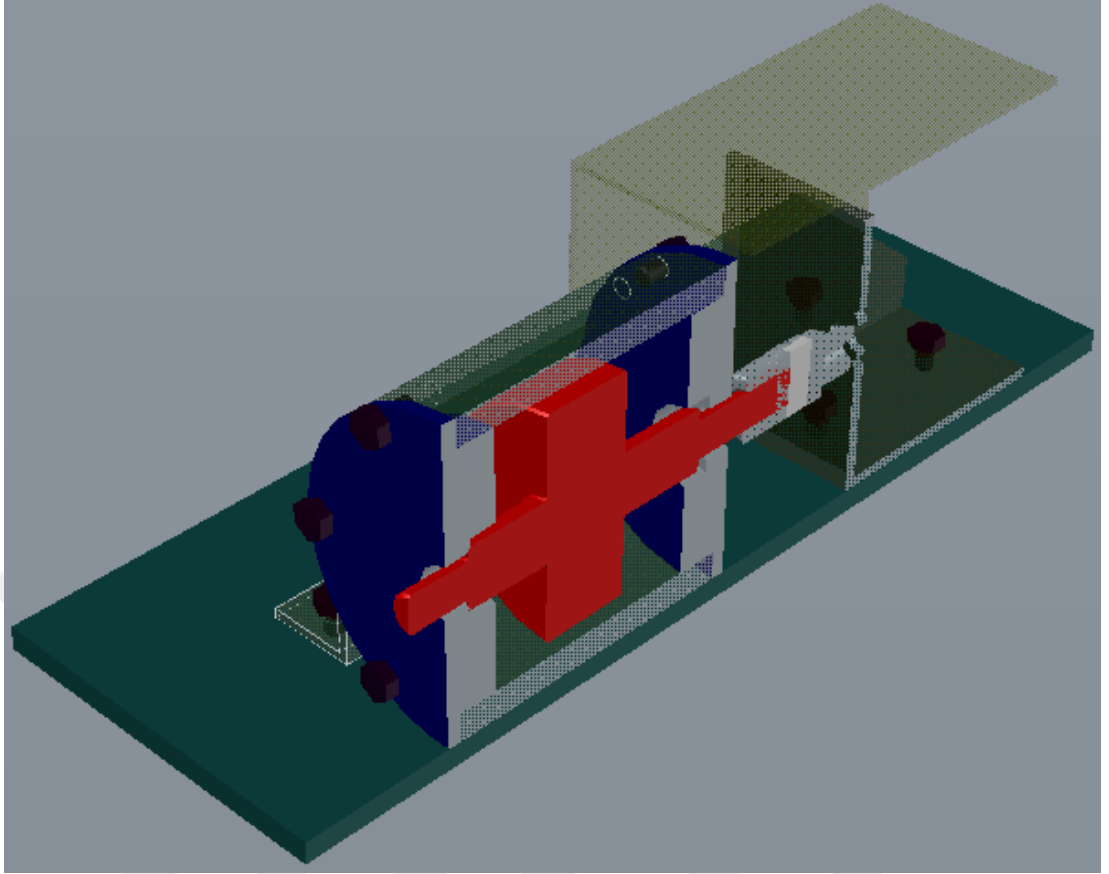
Programlanabilir Özellikler	Özellikler
Kalkış (yumuşak/orta/sert)	Sürekli Akım: 120 A
Düşük Gerilimde Kesme	Aşırı Akım: 150 A
Frenleme	Ölçüler: 90x36x20 mm
PWM Oranı (8/12/16 kHz)	Ağırlık: 100 g
Gerilim: 7,4 – 22,2 V	Ekstra Çıkış: 5 V – 3,5 A



Şekil 3.16. VEDS'in Autocad programında tasarım çizimleri (perspektif)



Şekil 3.17. VEDS'in Autocad programında tasarım çizimleri (ön taraftan bakış)



Şekil 3.18. VEDS'in Autocad programında tasarım çizimleri (kesit görünüş)

Büyük ölçekli VEDS ünitesinin tasarlanmasının ve ölçülendirme işlemlerinin ardından üretim aşamasına geçilmiştir. VEDS yüksek devirlere çıktığından (büyük sistem için 13000 d/d, küçük sistem için 24000 d/d) sistemde kullanılan rotorun çevresel hızı 450 km/h hızla giden bir aracın hızına eşit olmaktadır. Bu hızla dönen bir rotorun bağlı olduğu sistemde dağılma, kırılma vs. gibi bir kazaya önlem olarak bütün sistem kapalı bir kılıf içerisine konulmuştur. Kılıf 10 mm et kalınlığına sahip demir malzemeden imal edilmiştir. Bu kılıfın iki tarafına flanş kapakları monte edilmiştir. Kapakların ortaları boşaltılarak rotor milini taşıyan ve yataklama görevi gören rulmanlarının oturması için boşluklar açılmıştır. Şekil 3.19'da kılıf ve kapaklar görülmektedir.

Rotor kısmının yataklamasında yüksek devirlerde ve yüksek dinamik zorlanma değerlerine sahip rulmanlar kullanılmaktadır. Büyük sistem için "SKF Energy Series E2.6204-2Z/C3" kod numaralı rulmanlar kullanılmıştır. Bu rulmanın teknik özellikleri Tablo 3.8'de verilmektedir.



Şekil 3.19. Volanın koruma kılıfı ve flanş kapakları

Tablo 3.8. Büyük sisteme ait rulmanların teknik özellikleri [55]

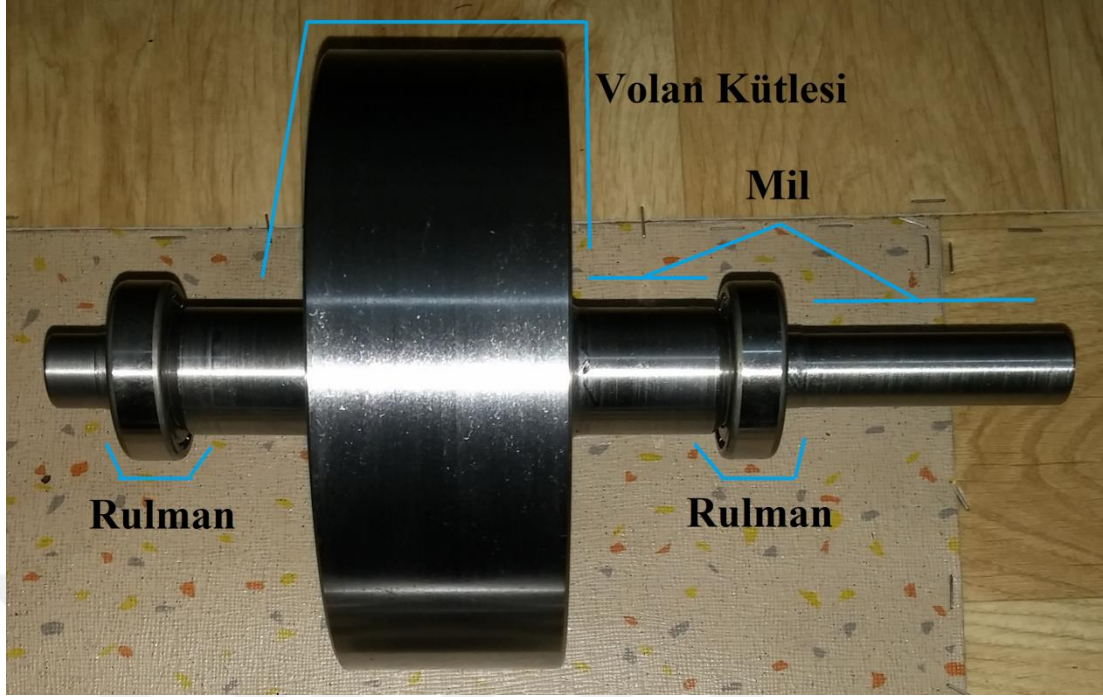
İç çap ölçüsü	20 mm
Dış çap ölçüsü	47 mm
Yatak genişliği	14 mm
Yanlar	Çift taraflı kapaklı
Bilye sırası	Tek sıra
Statik yüklenme değeri	6,55 kN
Dinamik yüklenme değeri	12,7 kN
Kafes materyali	Fiberglas ile kuvvetlendirilmiş kompozit polimer
Limit devir sayısı	19000 d/d
Referans devir sayısı	35000 d/d

Küçük sistem için ise “SKF Energy Series E2.6003-2Z/C3” kod numaralı rulmanlar kullanılmıştır. Bu rulmanın teknik özellikleri Tablo 3.9’da verilmektedir.

Tablo 3.9. Küçük sisteme ait rulmanların teknik özellikleri [55]

İç çap ölçüsü	17 mm
Dış çap ölçüsü	35 mm
Yatak genişliği	10 mm
Yanlar	Çift taraflı kapaklı
Bilye sırası	Tek sıra
Statik yüklenme değeri	3 kN
Dinamik yüklenme değeri	5,85 kN
Kafes materyali	Fiberglas ile kuvvetlendirilmiş kompozit polimer
Limit devir sayısı	25000 d/d
Referans devir sayısı	49000 d/d

VEDS’de kullanılacak rotorların ve millerin yüksek çekme dayanımına sahip demir malzemeden üretilmesine karar verilmiştir. Ayrıca tek bir gövde için değiştirilebilen iki farklı boyda rotor üretilmektedir. Mil ve rulman montajları yapılmış rotor Şekil 3.20’de görülmektedir.

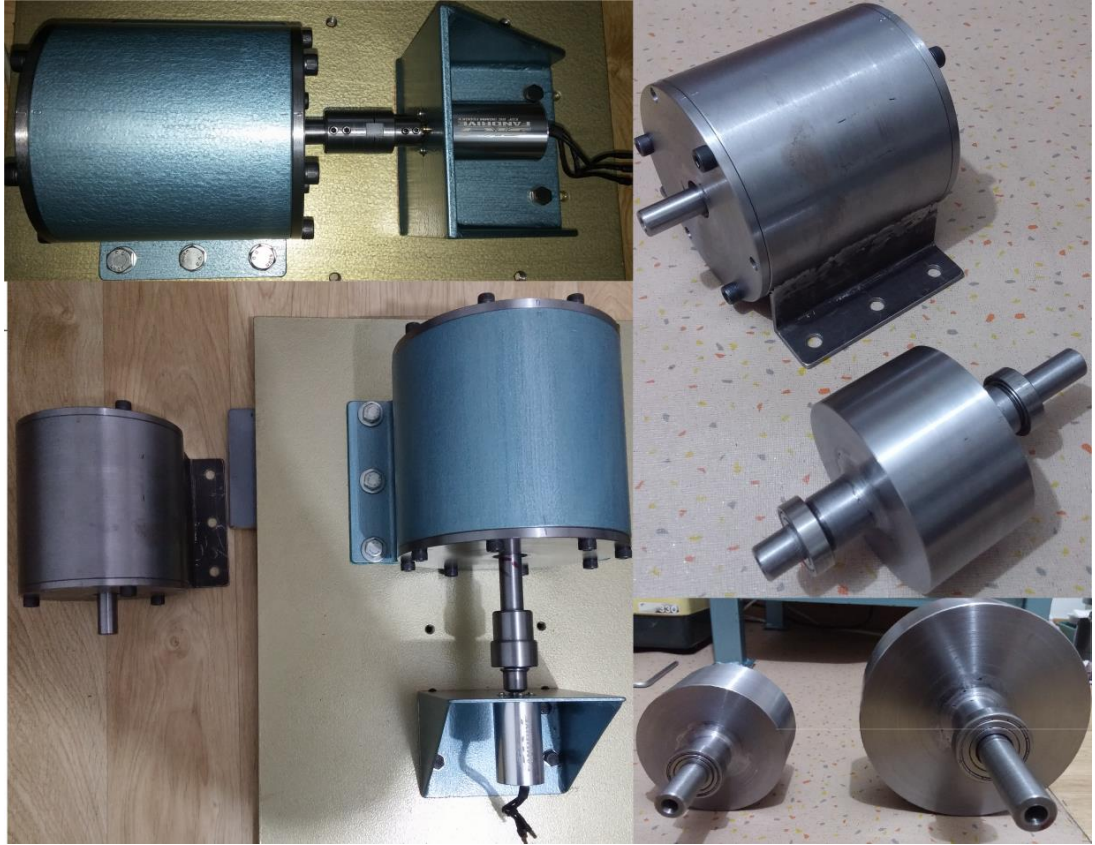


Şekil 3.20. VEDS'in mil ve rulman montajları yapılmış olan rotor kısmı

Mil ve rulman montajı yapılmış rotor kılıfın içerisinde konulmuş ve flanşlar yardımı ile merkezlenmektedir. Ardından boyanmış ve alt kaide olarak bir tablaya montajlanmaktadır. Tablaya montajı yapılan volan sisteminin hareket etmesini sağlayacak olan motor generatör ünitesinin bağlantısı için bir platform yapılmaktadır. Bu platform herhangi bir eksenel kaçıklığa sebep olmamak için oldukça hassas bir şekilde işlenmektedir. Ardından M/G ünitesi bu platforma monte edilmektedir. Bu işlemler sırasında aynı zamanda volan ve M/G kısımlarının birbirine bağlantısını sağlayacak olan kaplin kısmı da yüksek devirlere dayanacak şekilde hassas bir biçimde dizayn edilmekte ve üretimi gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.21'de kullanılan kaplin mekanizmaları görülmektedir. Son olarak M/G ve volan ünitesi arasındaki bağlantılarda (kaplin) ve M/G ünitesinde meydana gelebilecek tehlikeli durumların önüne geçilmesi adına bu kısımlar bir muhafaza sacı ile kapatılmıştır. Büyük sistemin tamamlanmasından sonra küçük sistemin projelendirilmesine, ardından da üretimine başlanmaktadır. Büyük sistem için bahsedilen adımlar küçük sistem için de benzer şekilde yürütülmüştür. Şekil 3.22'de küçük sistemin üretim aşamaları, Şekil 3.23'de iki sistemin kıyaslamalı rotor büyüklükleri, Şekil 3.24'de ise iki sistem üretimi bitmiş halde görülmektedir.



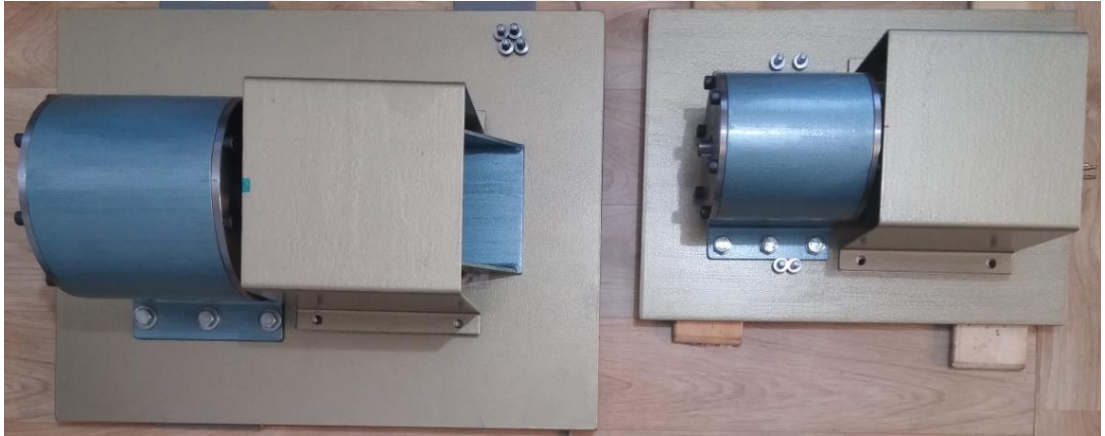
Şekil 3.21. Volan ve M/G ünitesi arasında kullanılan farklı tipte kaplin çeşitleri



Şekil 3.22. Küçük sistemin üretim aşamaları ve genel resmi



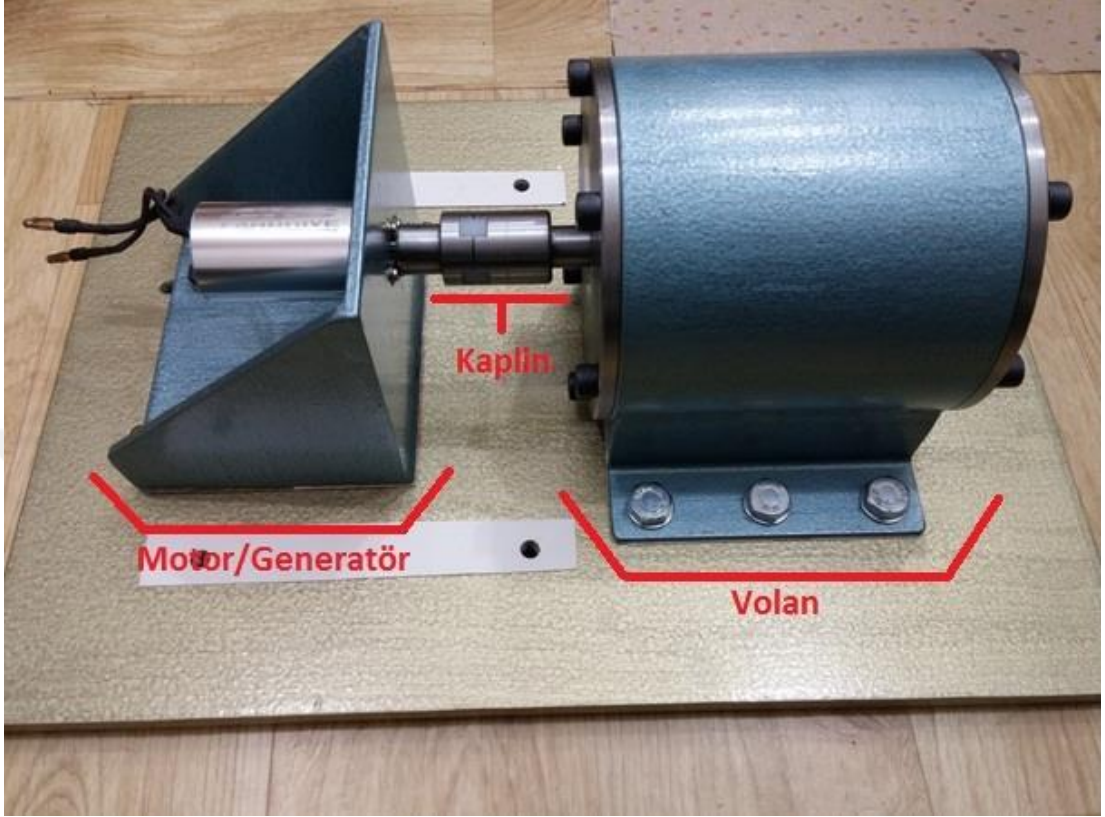
Şekil 3.23. Büyük ve küçük sisteme ait eş genişlikteki (60 mm) rotorlar



Şekil 3.24. Büyük ve küçük sistemin tamamlanmış hali

Şekil 3.25’de tabla üzerine montajı yapılmış VEDS ünitelerinin yerleşimi görülmektedir. M/G ünitesinin mili kapline bağlıdır. Kaplinin diğer kısmı ise VEDS’in rotor miline bağlıdır. Böylece sistem “direct drive” (doğrudan akuple) şekilde çalışmaktadır. M/G ünitesi ve rotor arasında devir düşürücü veya yükseltici herhangi bir redüktör bulunmamaktadır. Bu durum sürtünme kayıplarının azalmasına, sistemde gereksiz balans ve atalet oluşmamasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca sistem bakım ve güvenilirlik yönünden de avantajlı hale gelmektedir. Kullanılan kaplin yüksek devirli sistemlerde tercih edilen bir çeşittir. M/G ünitesi ile rotor bağlantısında hareket polyemit yapı aracılığıyla aktarılmaktadır. Böylece

(dönmeden kaynaklanan) metal yorgunluğuna bağlı olarak oluşabilecek aksilikler önlenmiş olmaktadır.

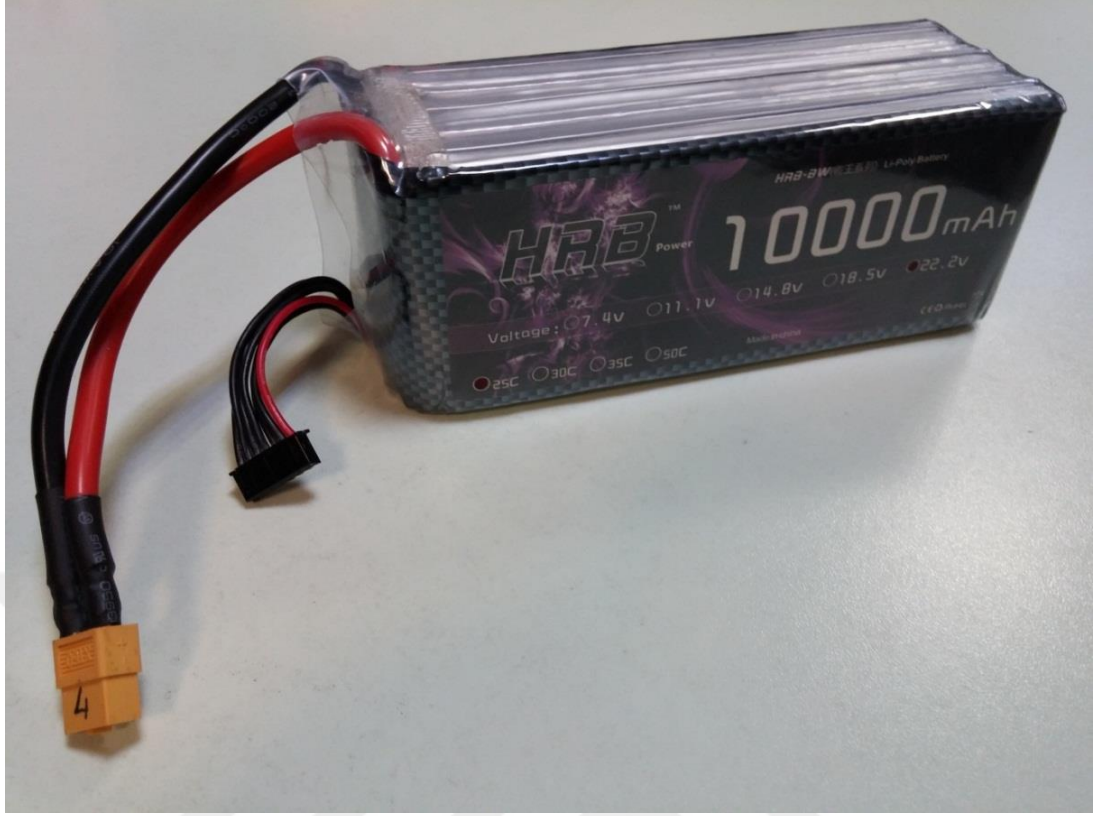


Şekil 3.25. Volan enerji depolama sistemi

3.5. Performans Testlerinde Kullanılan Ekipmanlar ve Bağlantı Şeması

Deneysel çalışmalarda, elektrikli araç motorunu generatör olarak kullanıp elde edilen gerilimi doğrultarak DA gerilim elde etmek yerine, VEDS'in verim analizini doğru biçimde yapabilmek adına sistem, lityum-polimer bataryalar kullanılarak çalıştırılmaktadır. Şekil 3.26'da sisteme enerji sağlayan lityum-polimer batarya görülmektedir. VEDS'in verim hesaplamaları yapılırken bataryadan çekilen akım değeri, batarya gerilimi ve güç değerleri kaydedilmektedir. Tablo 3.10'da kullanılan bataryanın teknik özellikleri verilmektedir.

Büyük VEDS'e 7,2 kW gücünde M/G ünitesi montajı gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.27'de büyük sistemde kullanılan 7,2 kW'lık M/G ünitesi görülmektedir. Motorun boşa çalışma durumunda maksimum devri 19800 d/d olmaktadır. Seçilen motor hem güç hem de devir sayısı olarak hedeflenen hıza ulaşmak için uygun görülmektedir.



Şekil 3.26. VEDS'e enerji sağlamada kullanılan lityum-polimer batarya

Tablo 3.10. VEDS'e enerji sağlamada kullanılan batarya teknik özellikleri

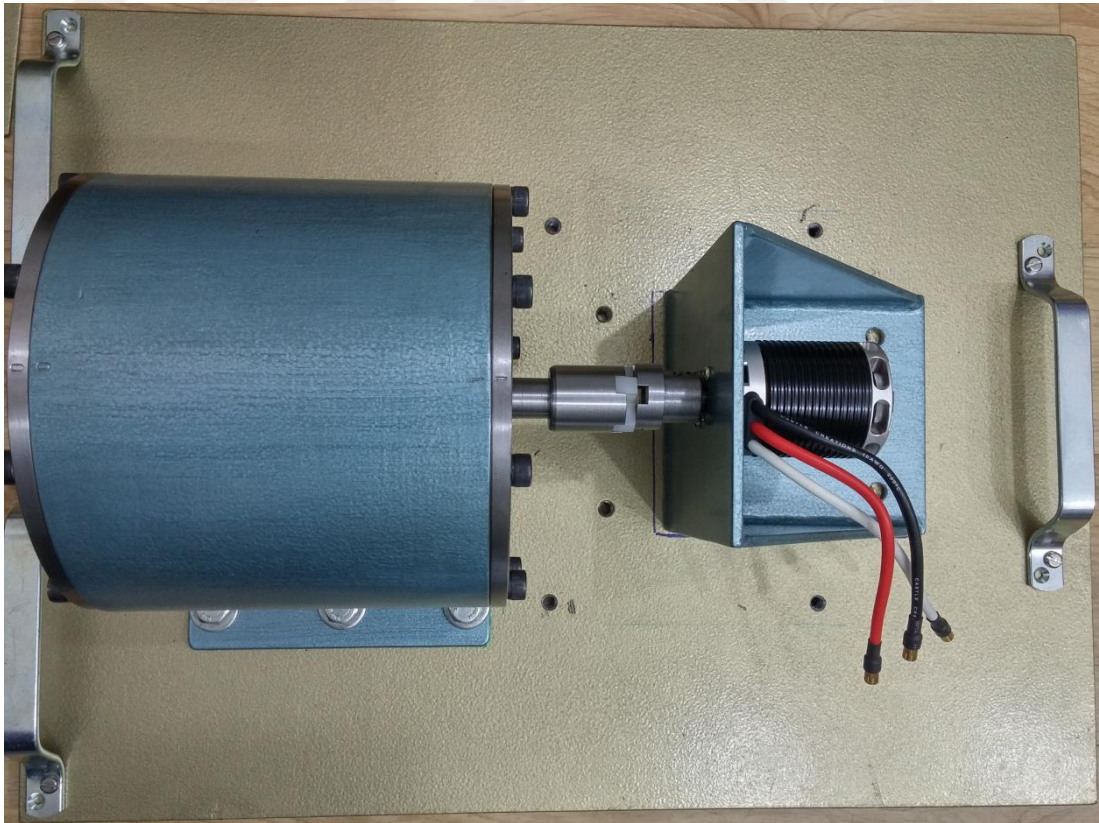
Parametreler	HRB BW
Cinsi	Li-Polymer
Nominal Gerilim	22,2 V
Tam şarjlı gerilim	25,2 V
Nominal hücre gerilimi	3,7 V
Tam şarjlı hücre gerilimi	4,2 V
Kapasite	10000 mAh
Sürekli akım verme kapasitesi	25 C (250 A)
Anlık akım verme kapasitesi	40 C (400 A)
Hücre Sayısı	6 S
Konnektör Tipi	XT60
Şarj Tipi	Balanslı Şarj
Maksimum şarj akımı	1 C (10 A)
Boyutlar (mm)	164 x 64 x 60
Ağırlık	1362 gr

Şekil 3.28'de büyük sistemin M/G ünitesi entegre edilmiş hali görülmektedir. Tablo 3.11'de büyük sistemde kullanılan 7,2 kW gücündeki motorun teknik verileri görülmektedir. Küçük VEDS'e ise 4,8 kW gücünde M/G ünitesi montajı gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.29'da sistemde kullanılan 4,8 kW'lık M/G ünitesi

görülmektedir. Motorun boşta çalışma durumunda maksimum devri 26000 d/d olmaktadır. Seçilen motor hem güç hem de devir sayısı olarak hedeflenen hıza ulaşmak için uygun görülmektedir. Şekil 3.30’da küçük sistemin M/G ünitesi entegre edilmiş hali görülmektedir. Tablo 3.12’de küçük sistemde kullanılan 4,8 kW gücündeki motorun teknik verileri görülmektedir.



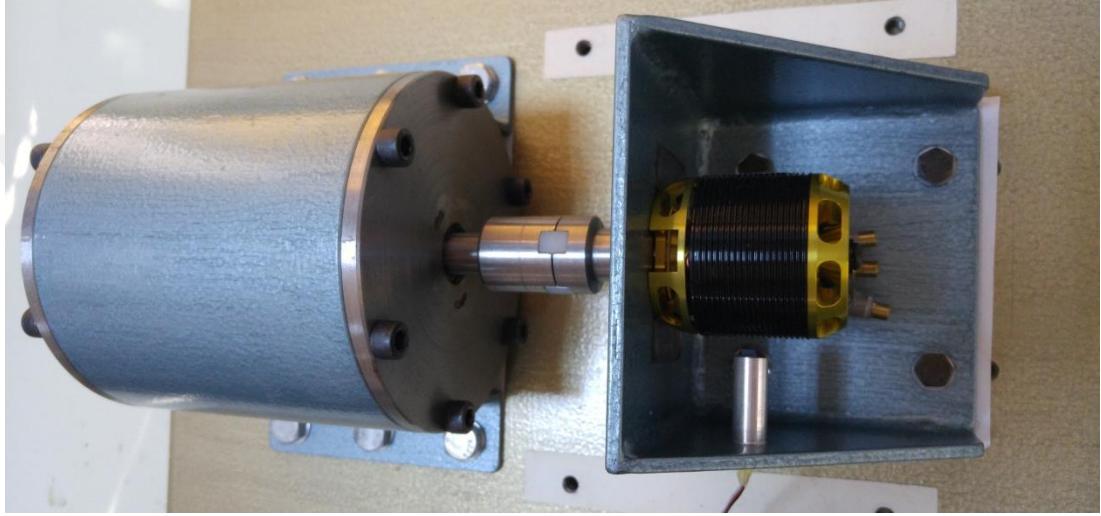
Şekil 3.27. 7,2 kW gücünde fırçasız doğru akım motoru [56]



Şekil 3.28. Montajı bitmiş büyük VEDS ünitesi



Şekil 3.29. 4,8 kW gücünde Fırçasız doğru akım motoru [57]



Şekil 3.30. Montajı bitmiş küçük VEDS ünitesi

Tablo 3.11. 7,2 kW gücündeki motorun teknik özellikleri [56]

Kv	295 rpm/V
Maksimum Anlık Akım	248 A (2 s)
Maksimum Anlık Güç	12875 W (2 s)
Maksimum Sürekli Akım	139 A (180 s)
Maksimum Sürekli Güç	7195 W (180 s)
Maksimum Verim	% 93
Çalışma Gerilim Aralığı	37 V (10S) – 67,2 V (16S)
Io (@ 10 V) (boşta çalışma akımı)	1,4 A
Rm (sargı direnci)	0,018 Ω
Kutup Sayısı	10 (12S10P)
Rulmanlar	Dörtlü, 698ZZ/MR148ZZ
Montaj Ölçüleri	M4 x Φ 30mm, M3 x Φ 25mm
Stator Sargı Ölçüsü	12'li, Φ 0,38mm
Şaft Çapı	6 mm
Şaft Uzunluğu	41 mm
Motor Ölçüleri	Φ 56mm x 74,7mm
Motor Ağırlığı	695 g
Motor Bağlantı Kabloları	10 AWG, 200 °C
Soğutma Sistemi	Yüksek volümetrik santrifüj fan
ESC PWM Frekansı (sürücü)	8 – 32 kHz

Tablo 3.12. 4,8 kW gücündeki motorun teknik özellikleri [57]

Kv	540 rpm/V
Maksimum Anlık Akım	250 A (2 s)
Maksimum Anlık Güç	11000 W (2 s)
Maksimum Sürekli Akım	115 A (180 s)
Maksimum Sürekli Güç	4800 W (180 s)
Maksimum Verim	> % 90
Çalışma Gerilim Aralığı	44,4 V (12S)
Io (@ 10 V) (boşta çalışma akımı)	2,11 A
Rm (sargı direnci)	0,010 Ω
Kutup Sayısı	10 (12S10P)
Montaj Ölçüleri	M4 x Φ 30 mm
Stator Sargı Ölçüsü	12'li, Φ 1,5 mm
Şaft Çapı	5,98 mm
Şaft Uzunluğu	38 mm
Motor Ölçüleri	Φ 56,7 mm x 62 mm
Motor Ağırlığı	565 g
Soğutma Sistemi	Yüksek volümetrik santrifüj fan
ESC PWM Frekansı (sürücü)	8 kHz

VEDS'lerde kullanılan FDAM ünitelerini sürmek için 200 A ve 14 S (55 V) değerinde bir sürücü ünitesi kullanılmaktadır. Şekil 3.31'de motor sürücüsü görülmektedir. Kullanılan sürücü USB kablosu aracılığıyla bilgisayara bağlanabilmekte ve bu sayede birçok kurulum ayarı yapılabilmektedir. Bu ayarlar arasında, batarya geriliminin belirlenen değerin altına düşmesi durumunda motor akımının kesilip bataryanın koruma altına alınması, yumuşak yol verme, akım kesildiğinde frenleme yapma gibi önemli seçenekler de bulunmaktadır. Ayrıca motor akımı, batarya gerilimi, motor devri gibi bilgileri de hafızasında saklayabilme ve (grafiksel olarak) bilgisayar ortamına aktarabilme özelliklerine de sahiptir. Sürücü ünitesinin teknik özellikleri Tablo 3.13'de verilmektedir.

Tablo 3.13. Motor sürücü ünitesi teknik özellikleri [58]

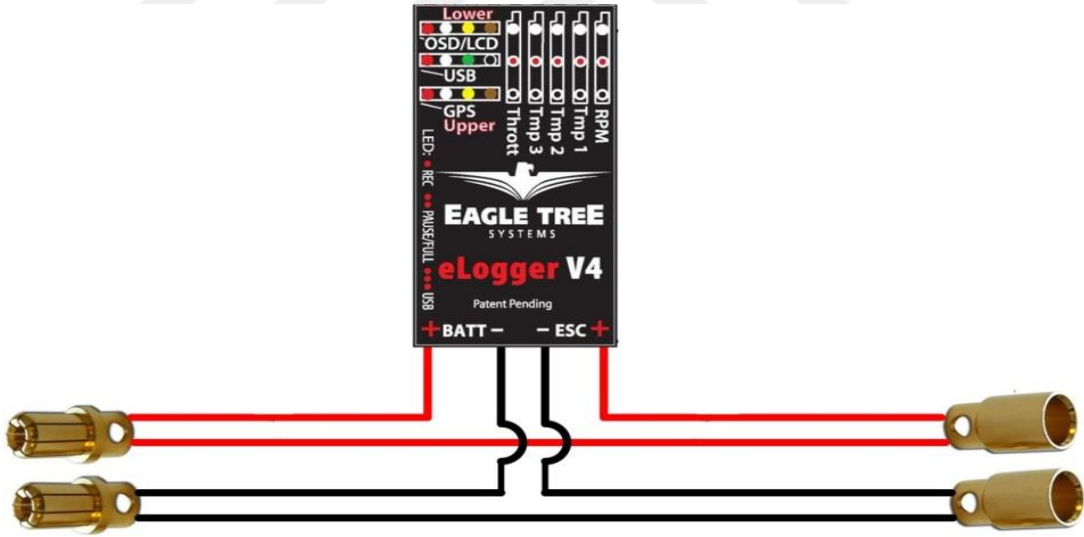
Maksimum Sürekli Akım	200 A
Maksimum Anlık Akım	250 A
Çalışma Gerilim Aralığı	14,8 – 58,8 V (4 – 14 S) Lityum Polimer
Motor PWM Frekans Bandı	8 – 32 kHz
Entegre hız sensörü	Var

VEDS ünitelerinin şarj deşarj deneyleri sırasında elde edilen akım, gerilim, güç ve devir sayısı gibi verilerin saklanması için kullanılmak üzere veri toplama kartı kullanılmaktadır. Bu kart sayesinde kaydedilen veriler daha sonra tekrar incelenerek gerekli analizler yapılmaktadır. Elektriksel veriler ayrıca osiloskop kullanılarak

kaydedilmektedir. Ölçümlerin alınmasında kullanılan veri toplama kartı Şekil 3.32’de görülmektedir.



Şekil 3.31. 200 A fırçasız doğru akım motor sürücüsü [58]

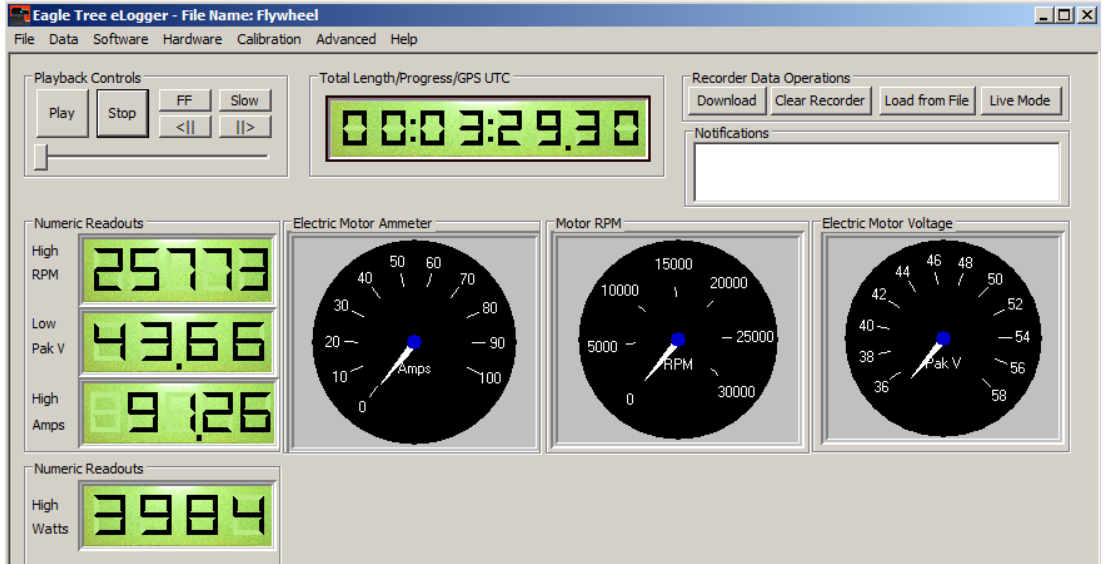


Şekil 3.32. Akım, gerilim, güç ve devir sayısı bilgilerini kaydeden veri toplama kartı [59]

Veri toplama kartının ara yüz programı kullanılarak Akım – Zaman, Gerilim – Zaman, Devir sayısı – Zaman grafikleri çizdirilebilmektedir. Ayrıca sistem sıcaklığı da ilgili sensör bağlanarak ölçülebilmektedir. Zamana bağlı grafikler dışında akım, gerilim ve devir sayısı değişimleri ibrelı göstergeler şeklinde de okunabilmektedir. Kullanılan kart ile 80 Volt 100 Amper’e kadar elektriksel ölçümler, 60000 d/d’ye

kadar ise mekanik ölçüm yapılabilmektedir. Şekil 3.33’de ön test çalışmalarında küçük VEDS ünitesinden elde edilen veriler kartın ara yüz program ekranında görülmektedir.

VEDS şarj deşarj deneyleri sırasında Chroma marka 6410A ve 63108A model programlanabilir yük grubundan yararlanılmaktadır. Şekil 3.34’de yük grubu görülmektedir. Bu yük gurubunun sabit güç ve sabit akım çekme özellikleri bulunmaktadır. Böylece VEDS’in deneysel çalışmaları yapılırken daha güvenilir sonuçları alınmaktadır. Yük grubunun çalışabileceği en yüksek gerilim 500 V, en yüksek akım ise 20 A’dır. Maksimum güç değeri ise 600 W’dır. Programlanabilir yük grubunun teknik özellikleri Tablo 3.14’de verilmektedir [60].



Şekil 3.33. Data logger kartı arayüz programı ekran görüntüsü



Şekil 3.34. Chroma Programlanabilir Yük Grubu

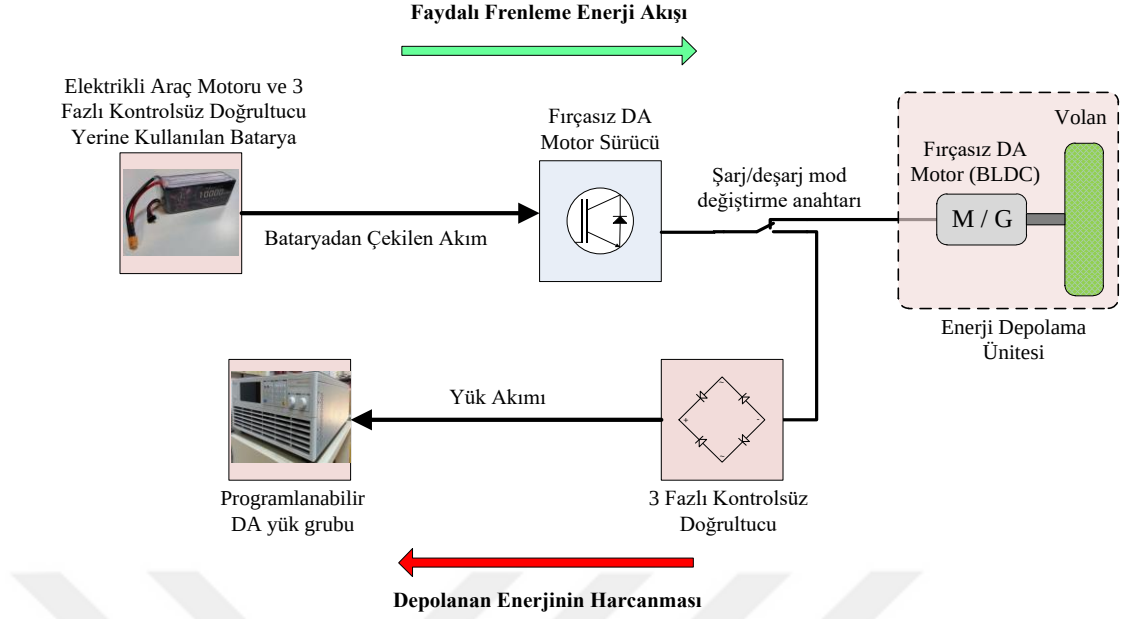
Tablo 3.14. Chroma Programlanabilir yük modülünün teknik özellikleri [60]

Parametreler	Chroma 63108A yardımcı yük modül	
Güç	60W	600W
Akım	0-2A	0-20A
Gerilim	0-500V	
Sabit Akım Modu		
Akım Aralığı	0-2A	0-20A
Çözünürlük	0,5mA	5mA
Sabit Direnç Modu		
Direnç Aralığı	25Ω – 100kΩ	
Çözünürlük	10μS	
Sabit Gerilim Modu		
Gerilim Aralığı	0-500V	
Çözünürlük	125mV	
Sabit Güç Modu		
Güç Aralığı	0-60W	0-600W
Çözünürlük	15mW	150mW

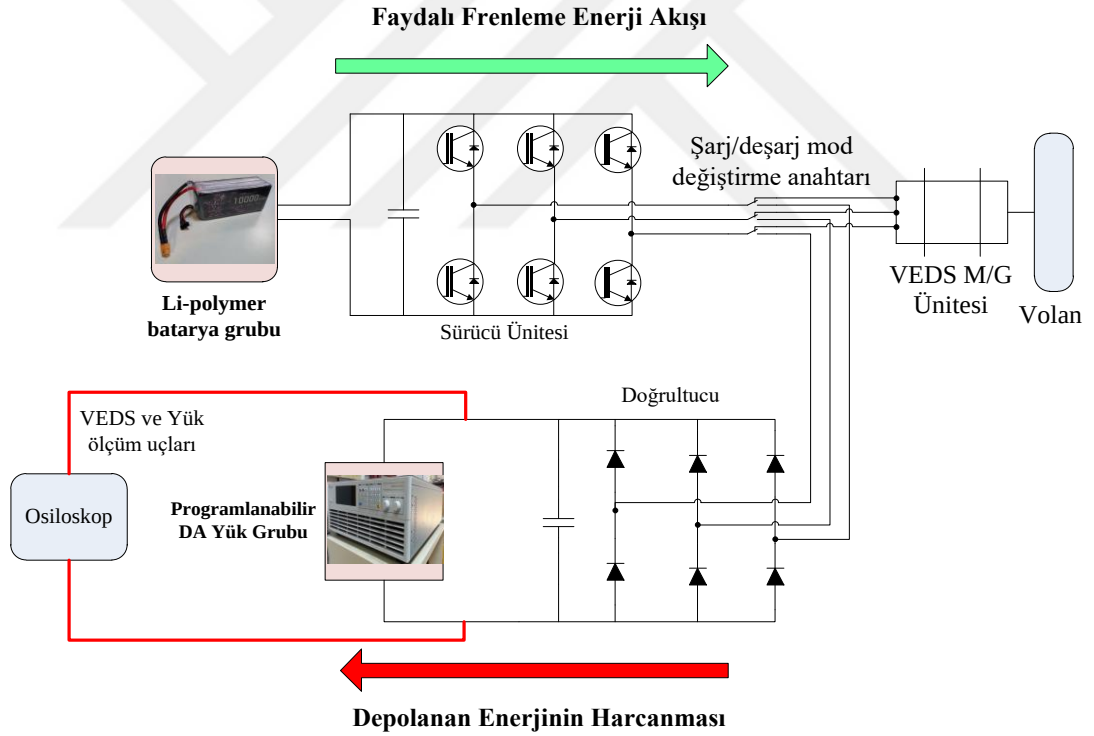
3.6. Volan Enerji Depolama Sistemi Deneysel Çalışmaları

VEDS ünitesinin deşarj deneyleri programlanabilir yük grubu kullanılarak yapılmaktadır. Lityum-polimer bataryalar kullanılarak enerji VEDS'e depolanmaktadır. Depolanan enerji, programlanabilir yük grubu kullanılarak belirli güç değerlerinde (200 W, 300 W, 500 W, 600 W) tüketilmektedir. VEDS ünitesini şarj ederken ölçülen akım, gerilim ve güç değerleri ile deşarj ederken elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri karşılaştırılarak sistemin performans analizi gerçekleştirilmekte, verim hesabı yapılmaktadır. Şekil 3.35'de VEDS testi için oluşturulan deneysel yapının şeması verilmektedir. Kurulan deneysel düzeneğin bağlantı şeması ve osiloskop ölçüm uçları ise Şekil 3.36'da verilmektedir.

Yapılan ölçümlerde sisteme ait akım, gerilim ve güç grafikleri elde edilmektedir. Büyük ve küçük boyutlu VEDS ünitelerine enerji depolanmasının (şarj) ardından, yük grubu VEDS'den 200 W, 300 W, 500 W ve 600 W güç çekecek şekilde "sabit güç" modunda programlanmaktadır. Her bir yük değeri için ölçümler ayrı ayrı yapılmaktadır. VEDS'e enerji depolanması sırasında M/G ünitesinin akım, gerilim ve güç değerleri de ölçülmüş ve kaydedilmiştir. VEDS'lere enerji depolanırken küçük sistem 24000 d/d hıza, büyük sistem ise 13000 d/d hıza çıkarılmaktadır. VEDS'in hızlanması ve yavaşlaması sırasında ölçülen zamana bağlı hız grafikleri de paylaşılmaktadır.



Şekil 3.35. VEDS testlerinde kullanılan deneysel düzenek



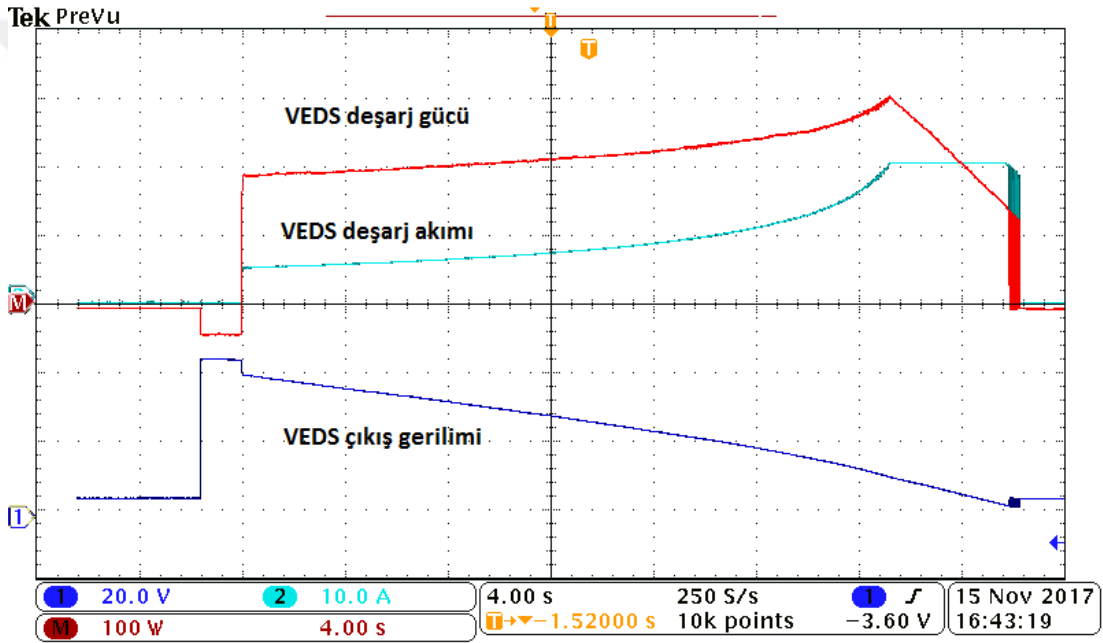
Şekil 3.36. Deneysel sistem bağlantı şeması ve osiloskop ölçüm uçları

3.6.1. Küçük boyutlu dar volanlı VEDS performans çalışmaları

Deneysel çalışmalarda küçük VEDS ünitesi 24000 d/d değerine ulaşmaktadır. Denklem (2.2)'den yola çıkılarak hesaplamalar yapıldığında, 24000 d/d'de VEDS'e

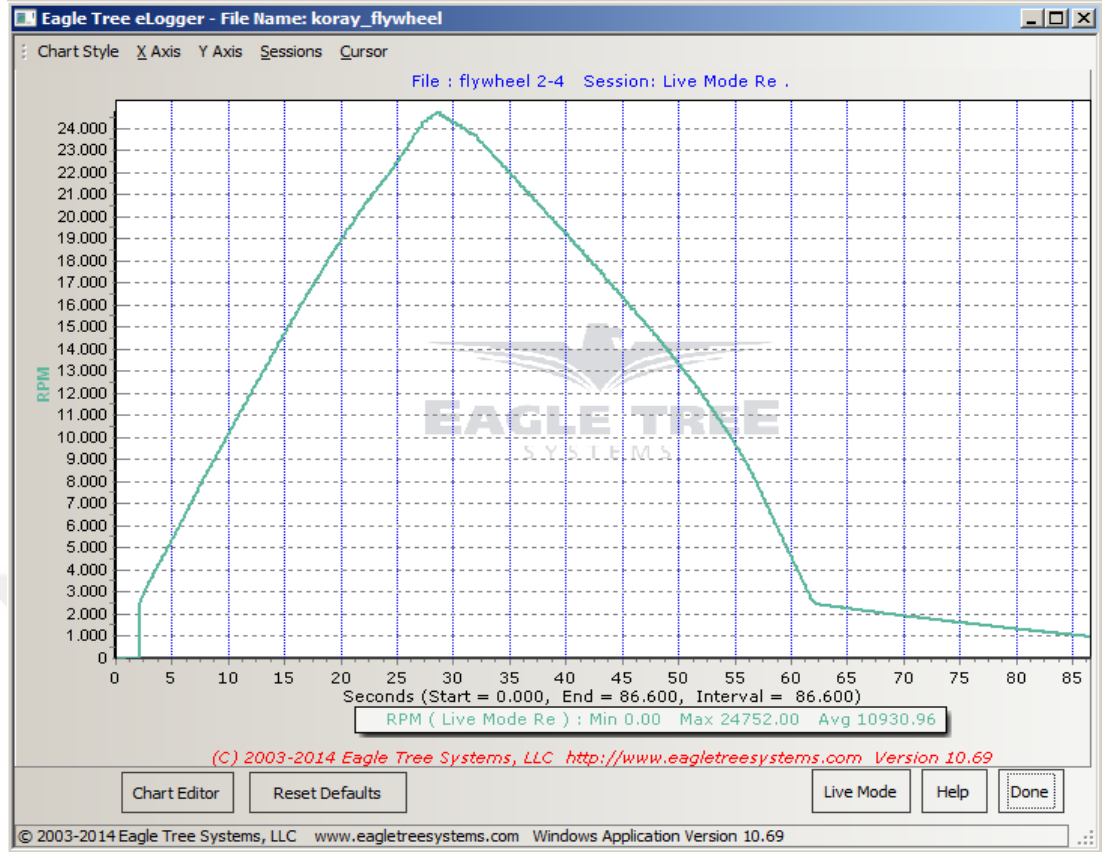
yaklaşık olarak 10000 J'lük bir enerji depolanmaktadır. Bu da 10 kW.saniye değerine eşit olmaktadır.

VEDS ünitesinin 24000 d/d hıza çıkarılmasının ardından 200 W değerine ayarlanan programlanabilir yük grubu devreye alınarak VEDS'den enerji çekilmeye başlanmaktadır. VEDS ünitesi 200 W'lık yükü 28 saniye besleyebilmektedir. Bu süreden sonra akım, programlanabilir yük grubunun maksimum akım değerini (20 A) aştığından ve VEDS çıkış geriliminin düşmesinden dolayı çekilen güç değeri düşmektedir. Şekil 3.37'de VEDS'in 200 W ile yüklenmesi sırasında ölçülen akım, gerilim ve güç değerleri görülmektedir.

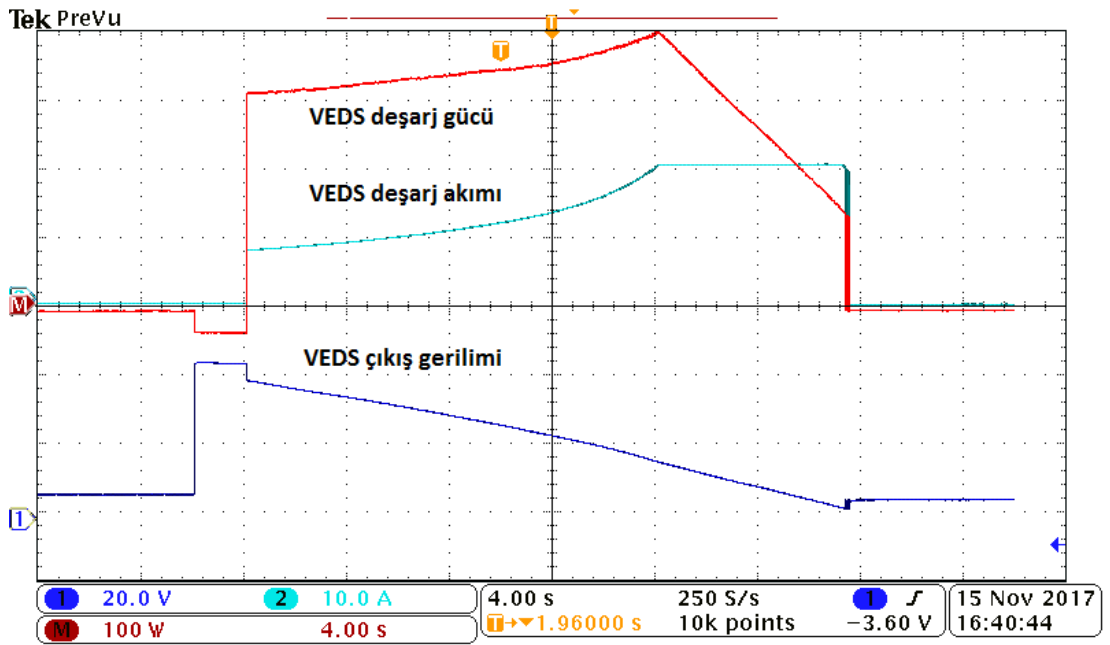


Şekil 3.37. Sistemden 200 W'lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri

VEDS ünitesinin şarj ve deşarj işlemi sırasında, volanın dönüş hızı grafiği Şekil 3.38'deki gibi olmaktadır. VEDS şarj sırasında, durağan halden maksimum hıza yaklaşık 25 saniyede çıkmaktadır. 200 W yük ile deşarj olurken, volan maksimum hızdan kesim hızına yaklaşık 35 saniyede düşmektedir. 200 W'lık yük deneyinin ardından, programlanabilir yük grubu 300 W değerine ayarlanarak ölçümler tekrarlanmaktadır. 300 W'lık yük ile yapılan çalışmada, sistemin yükü 20 saniye besleyebildiği görülmektedir. Şekil 3.39'da VEDS'in 300 W'lık yük ile yüklenmesi sonucu elde edilen akım, gerilim, güç grafikleri görülmektedir.

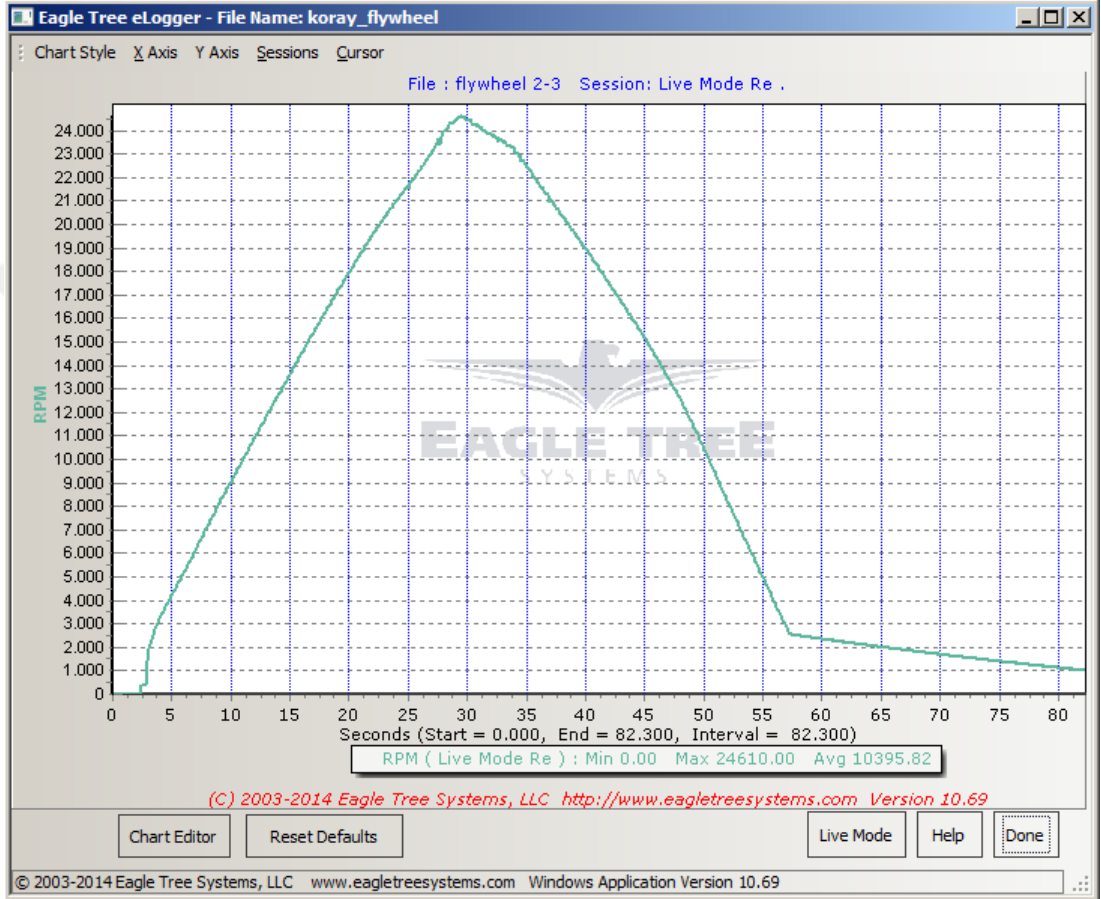


Şekil 3.38. VEDS'in şarjı ve 200 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği



Şekil 3.39. Sistemden 300 W'lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri

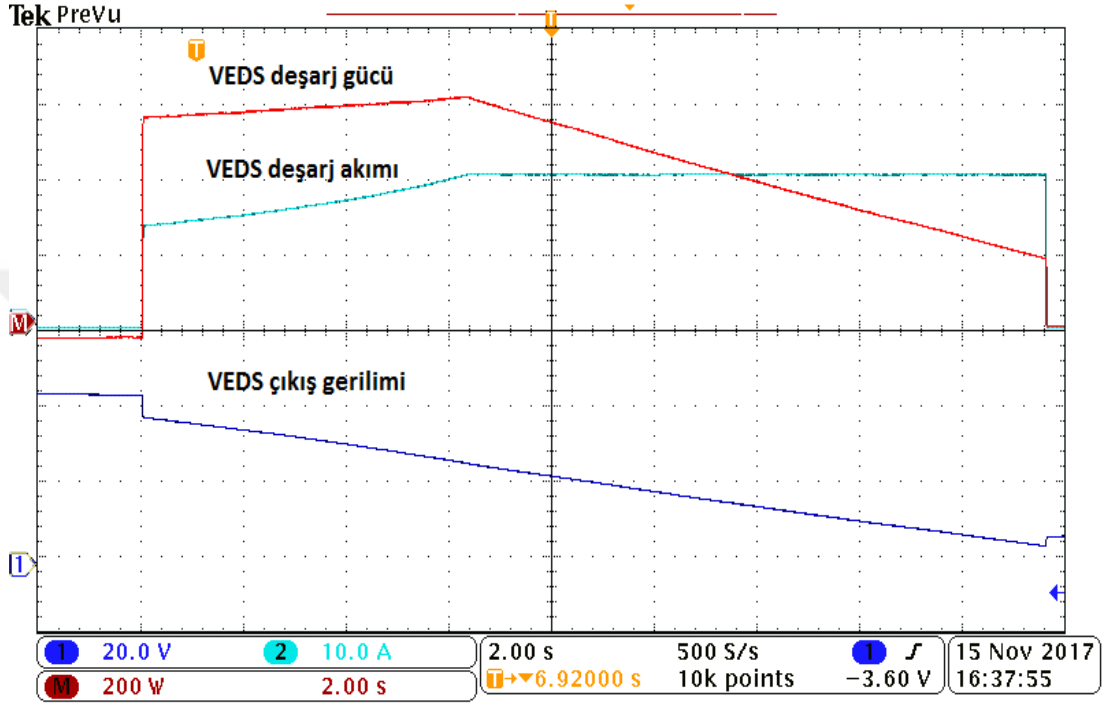
Bir önceki deneye benzer şekilde sistem şarj edilirken 25 saniyede durağan halden maksimum hıza ulaşmaktadır. Ancak VEDS deşarj edilirken volanın maksimum hızdan kesim hızına düşmesi 30 saniye sürmektedir. Yük değerindeki artış VEDS'in dönüş hızının daha kısa sürede azalmasını sağlamaktadır. Şekil 3.40'da 300 W yük ile deşarj edilen VEDS ünitesinin hızlanma ve yavaşlama grafiği görülmektedir.



Şekil 3.40. VEDS'in şarjı ve 300 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği

300 W yüklenme deneyinin ardından programlanabilir yük grubu sistemden 500 W çekecek şekilde ayarlanmaktadır. Elde edilen grafiklere bakıldığında VEDS ünitesinin 500 W'lık yükü 8 saniye besleyebildiği görülmektedir. Yük grubunun verebildiği akım değeri 20 amper ile sınırlı olduğundan, VEDS gerilimi düşse bile çekilen akım değeri 20 amperde sabit kalmaktadır. Şekil 3.41'de, çıkışına 500 W yük bağlanmış olan VEDS ünitesinin akım, gerilim ve güç grafikleri görülmektedir. 8. saniyeden sonra sistemden güç çekilmeye devam edilmektedir. Yük grubu sabit bir şekilde 20 A akımı, 8. saniyeden 18. saniyeye kadar çekmeye devam etmektedir. VEDS'den çekilen toplam enerjiye bakıldığında, 500 W'lık yükü 16 saniye

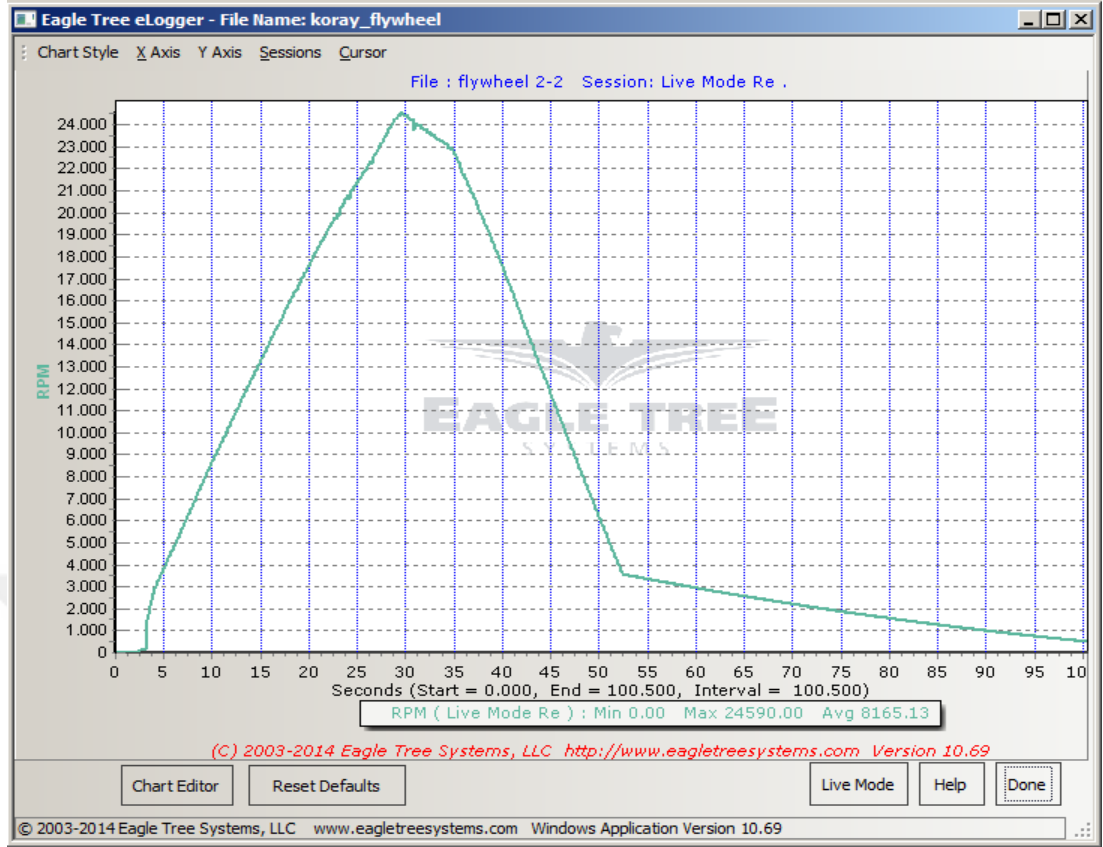
beslemeye eşdeğer bir enerji çekildiği görülmektedir. 500 W'lık yük deneyinde şarj ve deşarj sırasında elde edilen hızlanma grafiklerine bakıldığında, şarj süresinin aynı kaldığı ancak deşarj süresinin 23 saniyeye düştüğü görülmektedir. Bu durumun sebebi sisteme bağlanan yük değerinin artmasıdır. Şekil 3.42'de 500 W'lık yükün şarj ve deşarj işlemi sırasında elde edilen zamana bağlı hız grafikleri görülmektedir.



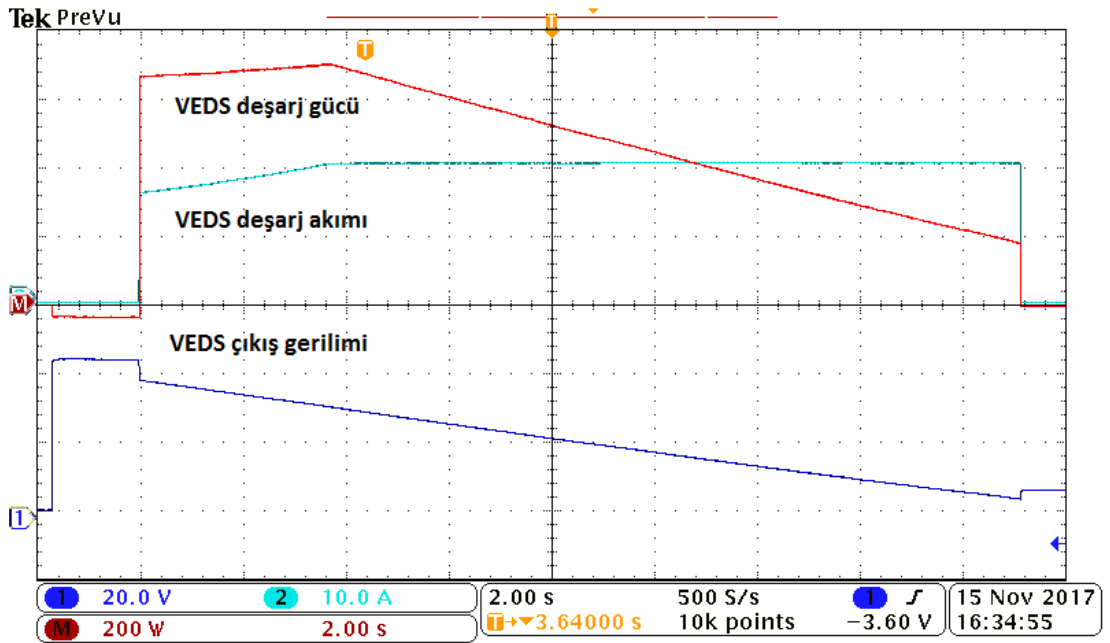
Şekil 3.41. Sistemden 500 W'lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri

Son olarak, sistem tekrar çalışma hızına çıkarılarak 600 W'lık bir yük ile deşarj edilmektedir. VEDS ünitesi 600 W'lık yükü 8 saniyeye yakın bir süre besleyebilmektedir. Sonrasında ise 9 saniye boyunca sistemden 20 A akım çekilmeye devam edilmektedir. VEDS'den çekilen toplam enerjiye bakıldığında, 600 W'lık yükü yaklaşık 13 saniye beslemeye eşdeğer bir enerji çekildiği görülmektedir. Şekil 3.43'de, VEDS ünitesinin 600 W'lık bir yük ile deşarj edilmesi sonucu elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri görülmektedir.

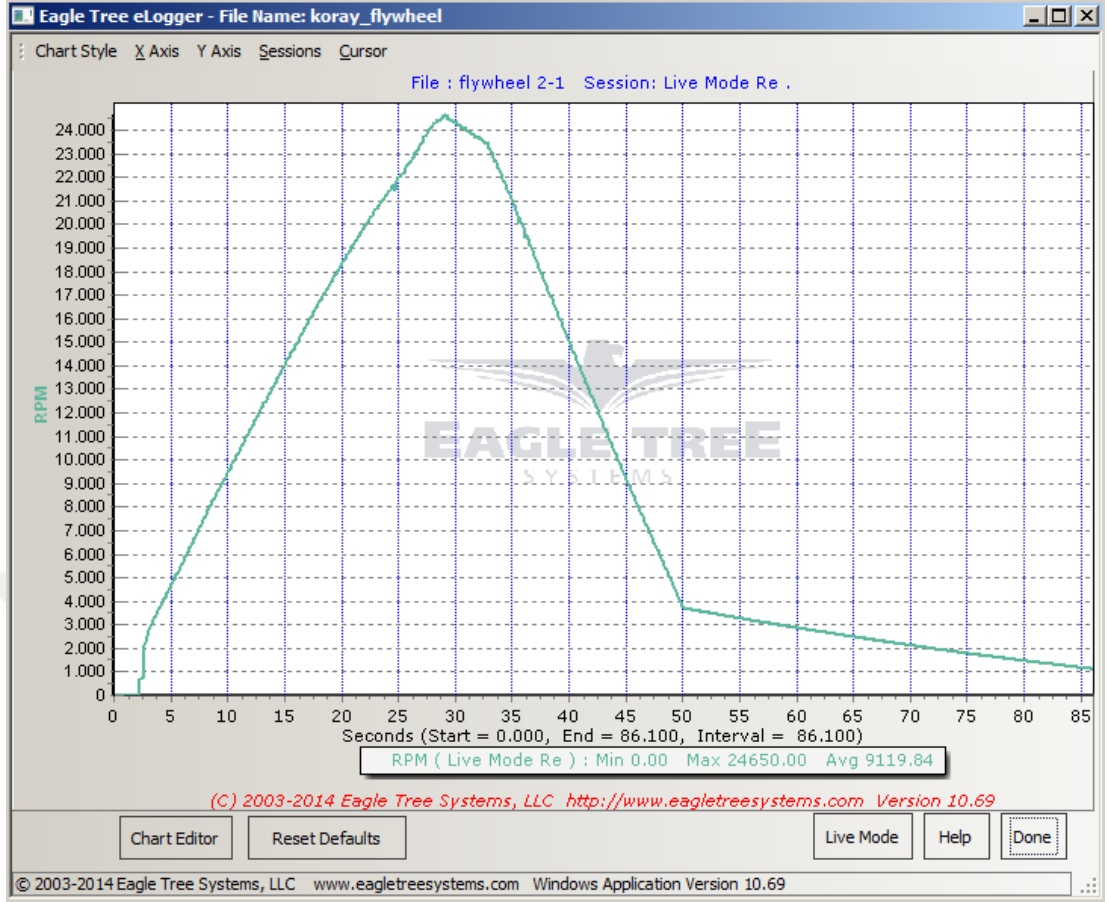
600 W'lık yük VEDS uçların bağlandığında şarj süresi değişmezken, deşarj süresi 20 saniyeye düşmektedir. Şekil 3.44'de VEDS ünitesinin 600 W yük ile deşarj edilmesi durumundaki hızlanma ve yavaşlama grafikleri görülmektedir.



Şekil 3.42. VEDS'in şarjı ve 500 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği

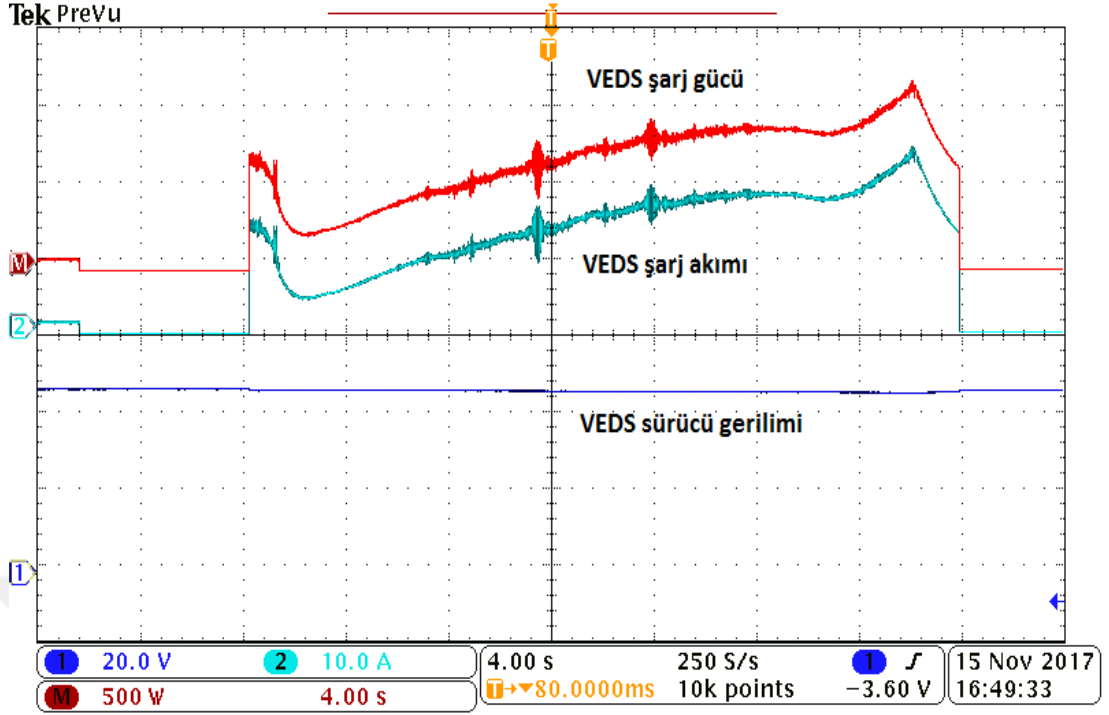


Şekil 3.43. Sistemden 600 W'lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri



Şekil 3.44. VEDS'in şarjı ve 600 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği

VEDS ünitesini 24000 d/d hıza çıkarırken M/G ünitesinin çektiği akım, gerilim ve güç grafikleri Şekil 3.45'de görülmektedir. İlk durumda volan durağan halde olduğundan, sistem ataletini yenmek için motor demeraj akımı çekmektedir. Şekil 3.45'de görülen ilk akım yükselmesi bu durumun sonucudur. Ardından harekete geçen sistem hız kazandıkça depoladığı ve muhafaza ettiği enerji arttığından, çektiği akım ve güç de zamana bağlı olarak artmaktadır. Kalkışta 700 W güç tüketen ve 15 A akım çeken sistem maksimum hıza ulaştığında 1100 W güç ve 25 amper akım çekmektedir. VEDS'in çektiği güç ve akıma bakıldığında sistemin 25 saniyede durağan halden maksimum hıza ulaştığı görülmektedir. Şekil 3.45'de elde edilen sonuçlar kullanılarak hesaplamalar yapıldığında, VEDS'in şarjı için harcanan enerji yaklaşık 15300 W.saniye (15,3 kW.s) olmaktadır.



Şekil 3.45. Sistem 24000 d/d hıza çıkarken (enerji depolanırken) elde edilen akım gerilim ve güç grafikleri

Deşarjı sırasında VEDS'den yüke aktarılan toplam enerji Şekil 3.43'deki osiloskop ölçüm sonucu ile 8200 W.saniye (8,2 kWs) olarak bulunmaktadır. Tüm sistemin elektriksel verimi Denklem (3.3) ile hesaplanarak % 54 olarak bulunmaktadır. Bu değer aracın frenlemeden önce sahip olduğu kinetik enerjinin % 54'inin tekrar araca aktarılabildiğini göstermektedir.

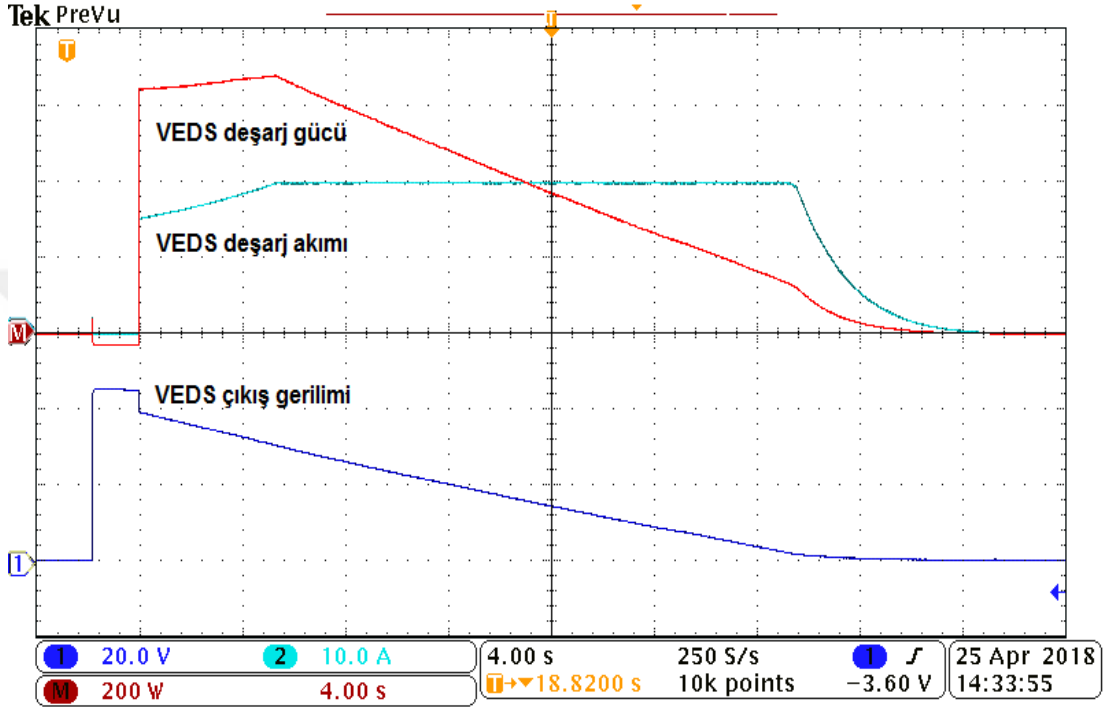
$$\mu_{VEDS} = E_{deşarj} / E_{şarj} = 8200/15300 = 54 \quad (3.3)$$

3.6.2. Küçük boyutlu geniş volanlı VEDS performans çalışmaları

Volan ağırlığının değiştirilerek geniş volanın VEDS'e bağlanmasının ardından sistem tekrar çalışma hızına çıkarılarak (24000 d/d), 600 W'lık bir yük ile deşarj edilmekte ve sisteme ait akım, gerilim ve güç grafikleri elde edilmektedir.

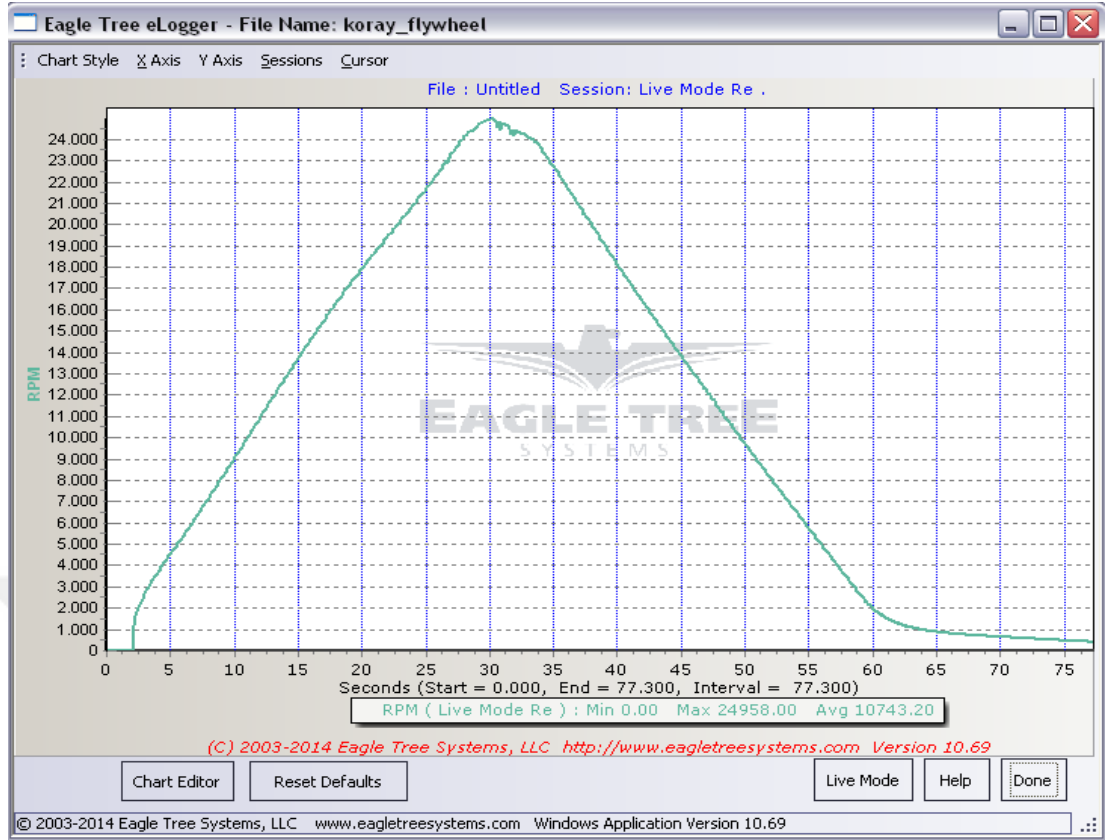
VEDS ünitesi 600 W'lık yükü 9 saniyeye yakın bir süre besleyebilmektedir. Sonrasında ise 16 saniye boyunca sistemden 20 A akım çekilmeye devam edilmektedir. 600 W'lık yük VEDS uçlarına bağlandığında toplam deşarj süresi 26 saniyeye olmaktadır. VEDS'den çekilen toplam enerji, Şekil 3.46'da görülen osiloskop ölçüm sonuçları kullanılarak hesaplandığında 11600 W.saniye (11,6 kWs)

olarak elde edilmektedir. Bu değerin, VEDS'in 600 W'lık yükü yaklaşık 19,5 saniye beslemesine yetecek miktar olduğu görülmektedir. Şekil 3.46'de, VEDS ünitesinin 600 W'lık bir yük ile deşarj edilmesi sonucu elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri görülmektedir. Şekil 3.47'de VEDS ünitesinin 600 W yük ile deşarj edilmesi durumundaki hızlanma ve yavaşlama grafikleri görülmektedir.

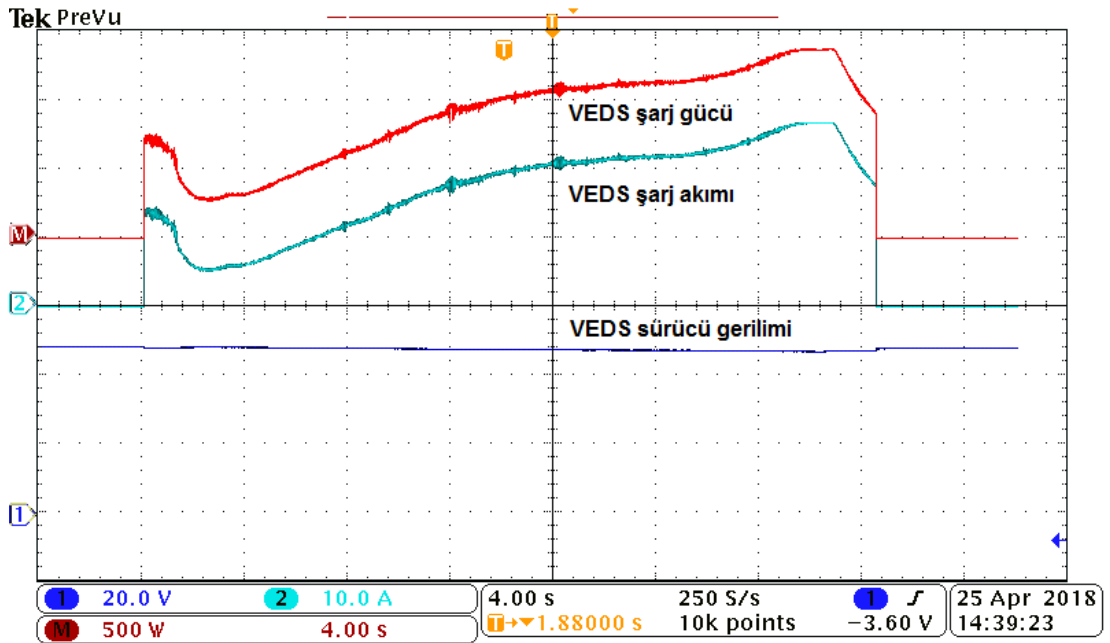


Şekil 3.46. Sistemden 600 W'lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri

VEDS ünitesini 24000 d/d hıza çıkarırken M/G ünitesinin çektiği akım, gerilim ve güç grafikleri Şekil 3.48'de görülmektedir. İlk durumda volan durağan halde olduğundan, sistem ataletini yenmek için motor demeraj akımı çekmektedir. Şekil 3.38'de görülen ilk akım yükselmesi bu durumun sonucudur. Ardından harekete geçen sistem hız kazandıkça depoladığı ve muhafaza ettiği enerji de arttığından, çektiği akım ve güç de zamana bağlı olarak artmaktadır. Kalkışta 750 W güç tüketen ve 15 A akım çeken sistem maksimum hıza ulaştığında 1400 W güç ve 27 amper akım çekmektedir. VEDS'in çektiği güç ve akıma bakıldığında sistemin 23 saniyede durağan halden maksimum hıza ulaştığı görülmektedir. Şekil 3.48'deki sonuçlar kullanılarak hesaplamalar yapıldığında, VEDS'in şarjı için harcanan enerji yaklaşık 24000 W.saniye (24 kW.s) olmaktadır.



Şekil 3.47. VEDS'in şarjı ve 600 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği



Şekil 3.48. Sistem 24000 d/d hıza çıkarken (enerji depolanırken) elde edilen akım gerilim ve güç grafikleri

Deşarjı sırasında VEDS'den yüke aktarılan toplam enerji Şekil 3.46'daki osiloskop ölçüm sonucu ile 11600 W.saniye (11,6 kW.s) olarak bulunmaktadır. Tüm sistemin elektriksel verimi Denklem (3.3) ile hesaplanarak % 49 olarak bulunmaktadır. Bu değer aracın frenlemeden önce sahip olduğu kinetik enerjinin % 49'unun tekrar araca aktarılabildiğini göstermektedir.

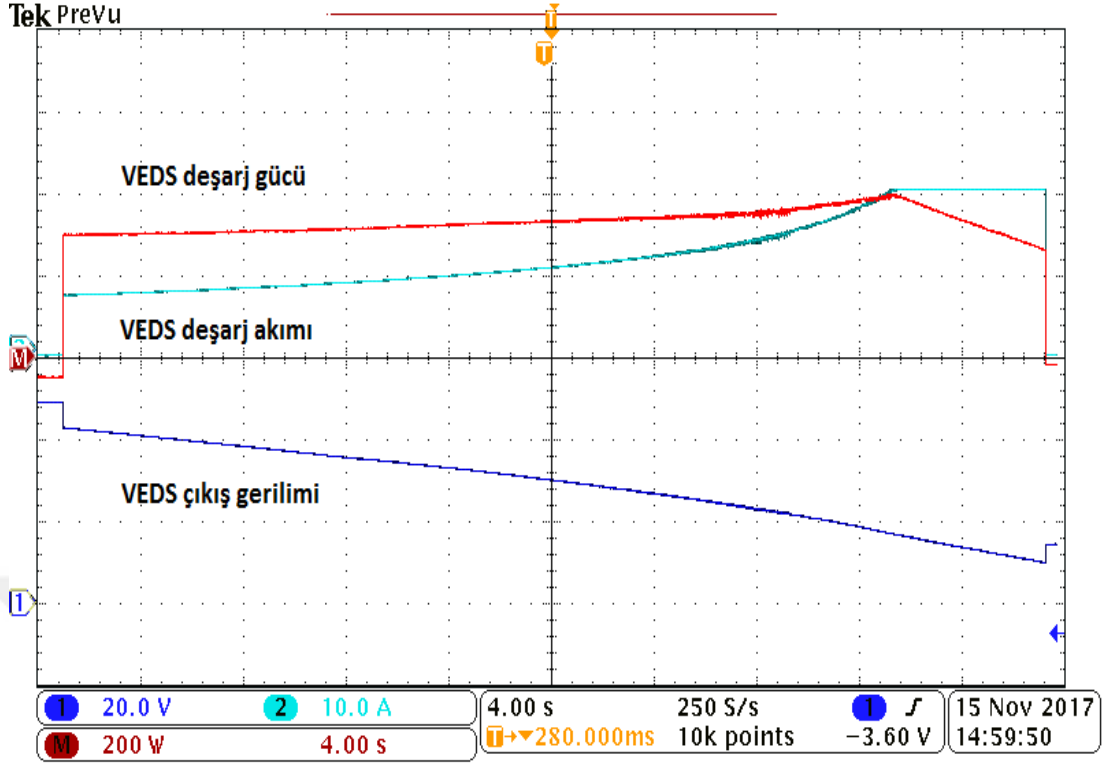
3.6.3. Büyük boyutlu dar volanlı VEDS performans çalışmaları

Deneyisel çalışmalarda büyük VEDS ünitesi 13000 d/d değerine ulaşmaktadır. (3.2) formülünden yola çıkılarak hesaplamalar yapıldığında, 13000 d/d'de VEDS'e yaklaşık olarak 18600 J'lük bir enerji depolanmaktadır. Bu da 18,6 kW.saniye değerine eşit olmaktadır.

Testlerde ilk olarak VEDS ünitesi 13000 d/d hıza çıkarılmaktadır. Ardından 300 W değerine ayarlanan programlanabilir yük grubu devreye alınarak VEDS'den enerji çekilmeye başlanmaktadır. VEDS ünitesi 300 W'lık yükü yaklaşık 40 saniye besleyebilmektedir. Bu süreden sonra akım, programlanabilir yük grubunun maksimum akım değerini (20 A) aştığından ve VEDS çıkış geriliminin düşmesinden dolayı çekilen güç değeri düşmektedir. Şekil 3.49'da VEDS'in 300 W ile yüklenmesi sırasında ölçülen akım, gerilim ve güç değerleri görülmektedir.

VEDS ünitesinin şarj ve deşarj işlemi sırasında, volanın dönüş hızı grafiği Şekil 3.50'deki gibi olmaktadır. Sistem şarj sırasında, durağan halden maksimum hıza yaklaşık 40 saniyede çıkmaktadır. VEDS ünitesi 300 W yük ile deşarj olurken, volan maksimum hızdan kesim hızına yaklaşık 45 saniyede düşmektedir.

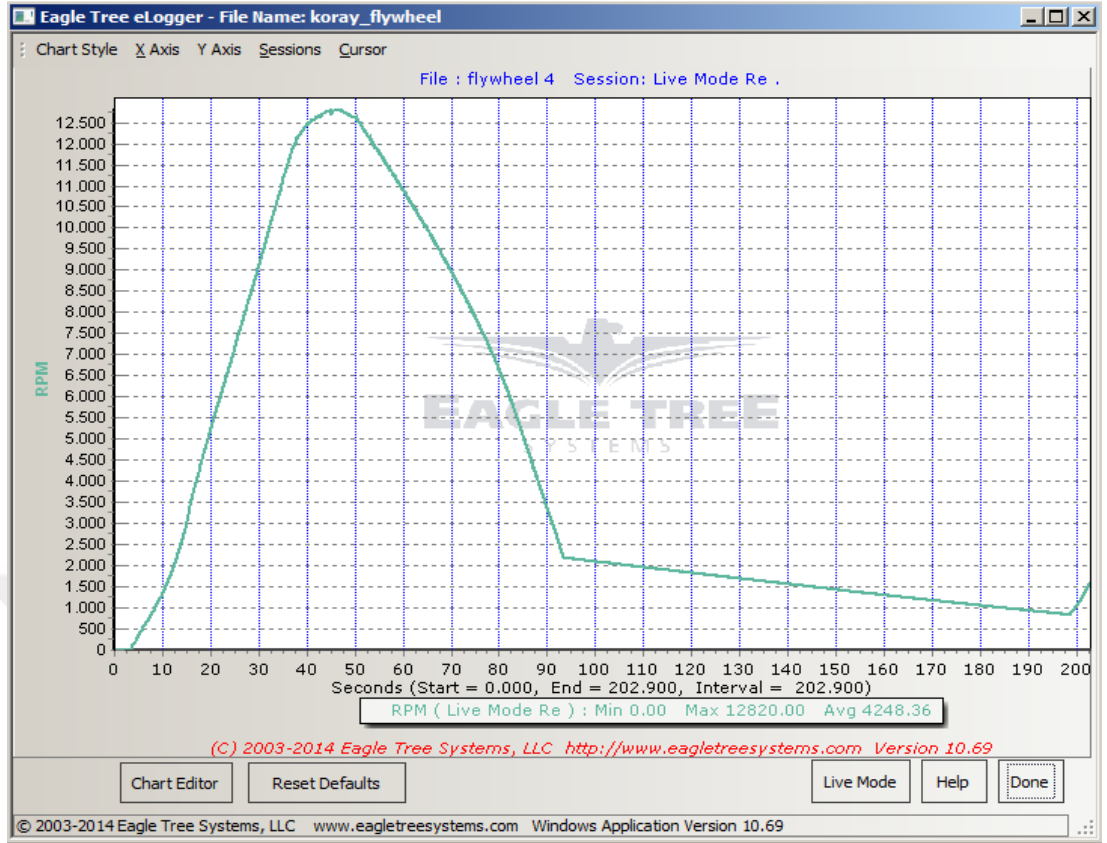
300 W'lık yük deneyinin ardından programlanabilir yük grubu 500 W değerine ayarlanarak ölçümler tekrar edilmektedir. 500 W'lık yük ile yapılan çalışmada sistemin yükü 20 saniye besleyebildiği görülmektedir. Şekil 3.51'de VEDS'in 500 W'lık yük ile yüklenmesi sonucu elde edilen akım, gerilim, güç grafikleri görülmektedir.



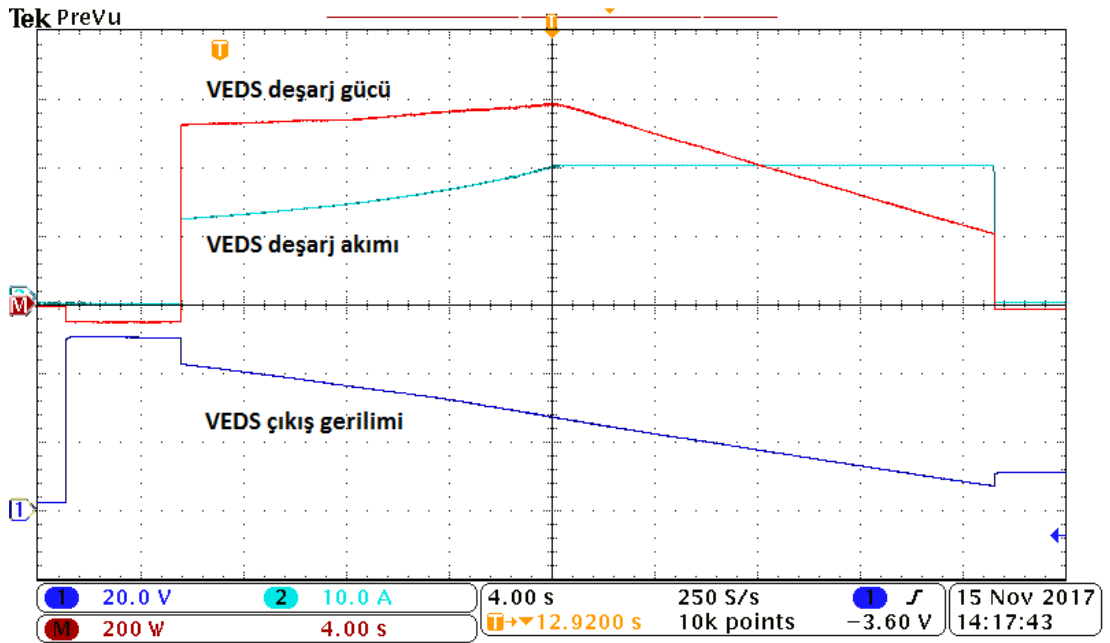
Şekil 3.49. Sistemden 300 W'lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri

500 W'lık yük deneyinde şarj ve deşarj sırasında elde edilen hızlanma grafiklerine bakıldığında, şarj süresinin aynı kaldığı ancak deşarj süresinin 36 saniyeye düştüğü görülmektedir. Bu durumun sebebi sisteme bağlanan yük değerinin artmasıdır. Şekil 3.52'de 500 W yükün şarj ve deşarj işlemi sırasında elde edilen zamana bağlı hız grafikleri görülmektedir.

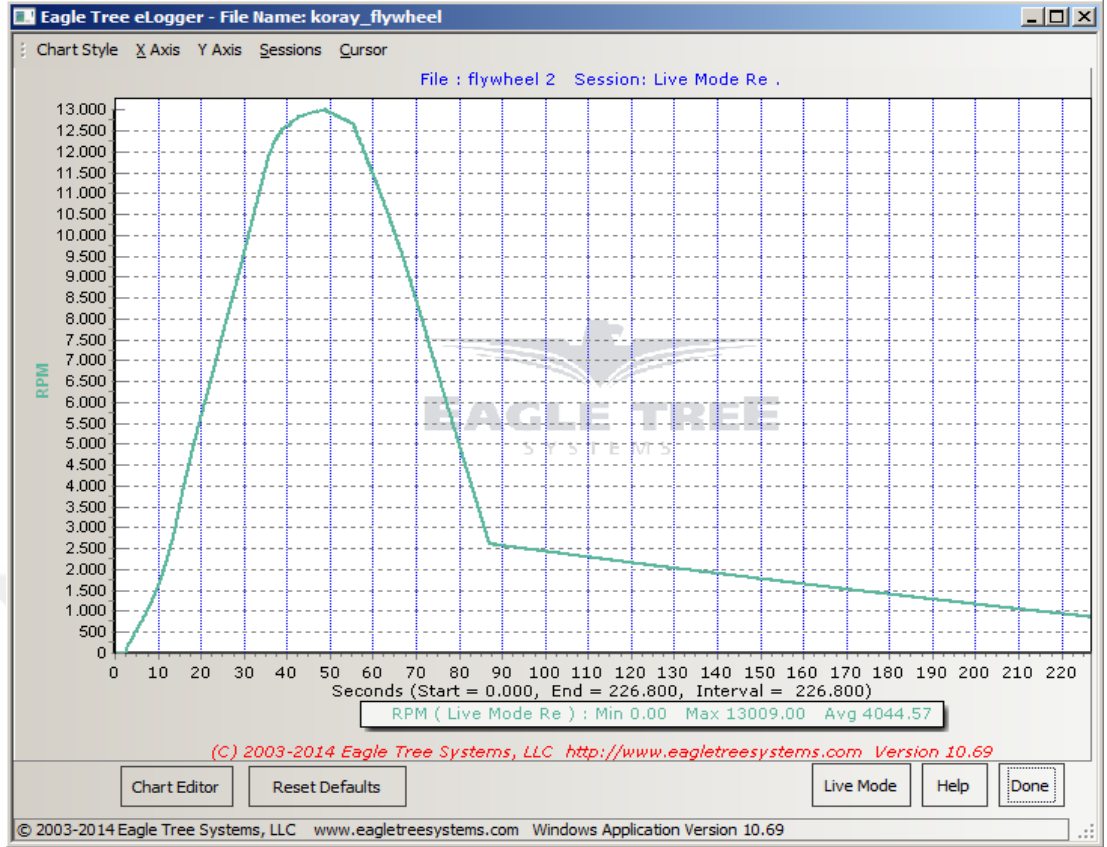
500 W yüklenme deneyinin ardından programlanabilir yük grubu sistemden 600 W çekecek şekilde ayarlanmaktadır. VEDS ünitesi 600 W'lık yükü 12 saniye besleyebilmektedir. Yük grubunun verebildiği akım değeri 20 amper ile sınırlı olduğundan, VEDS gerilimi düşse bile çekilen akım değeri 20 amperde sabit kalmaktadır. Şekil 3.53'de çıkışına 600 W yük bağlanmış olan VEDS ünitesinin akım, gerilim ve güç grafikleri görülmektedir. 12. saniyeden sonra sistemden güç çekilmeye devam edilmektedir. Yük grubu sabit bir şekilde 20 A akımı, 12. saniyeden 30. saniyeye kadar çekmeye devam etmektedir. VEDS'den çekilen toplam enerjiye bakıldığında, 600 W'lık yükü 20 saniye besleyebileceği görülmektedir.



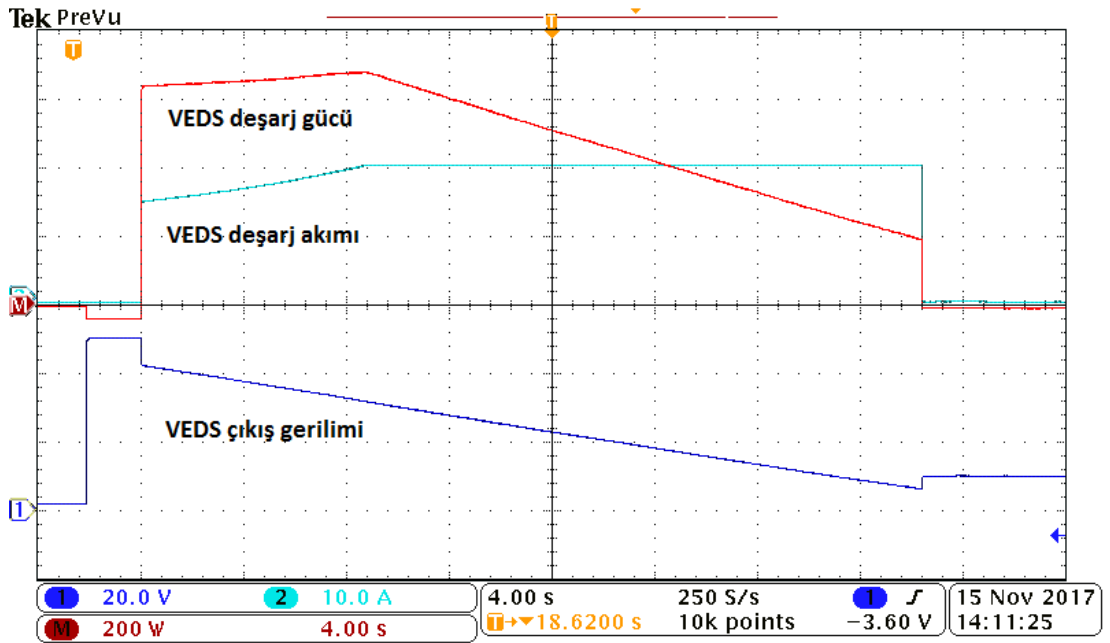
Şekil 3.50. VEDS'in şarjı ve 300 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği



Şekil 3.51. Sistemden 500 W'lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri



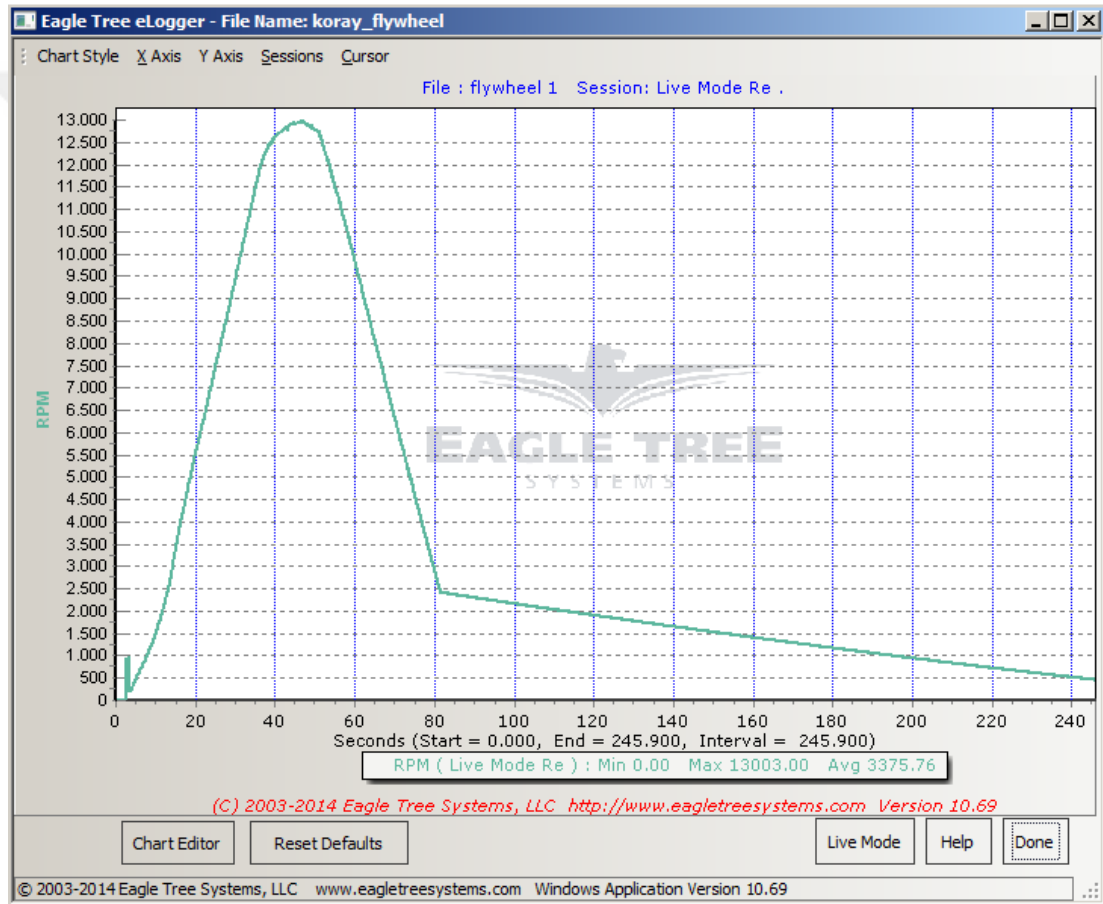
Şekil 3.52. VEDS'in şarjı ve 500 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği



Şekil 3.53. Sistemden 600 W'lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri

600 W'lık yük VEDS uçların bağlandığında şarj süresi değişmezken, deşarj süresi 30 saniyeye düşmektedir. Şekil 3.54'de VEDS ünitesinin 600 W yük ile deşarj edilmesi durumundaki hızlanma ve yavaşlama grafikleri görülmektedir.

VEDS ünitesinin 300 W, 500 W ve 600 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen en belirgin sonuç, 300 W yük ile yapılan deşarj deneyinde ortaya çıkmaktadır. Programlanabilir yük grubunun akım kapasitesi 20 A ile sınırlı olduğundan en uzun süreli düzgün akım, gerilim ve güç grafikleri 300 W yük devrede iken elde edilmektedir.

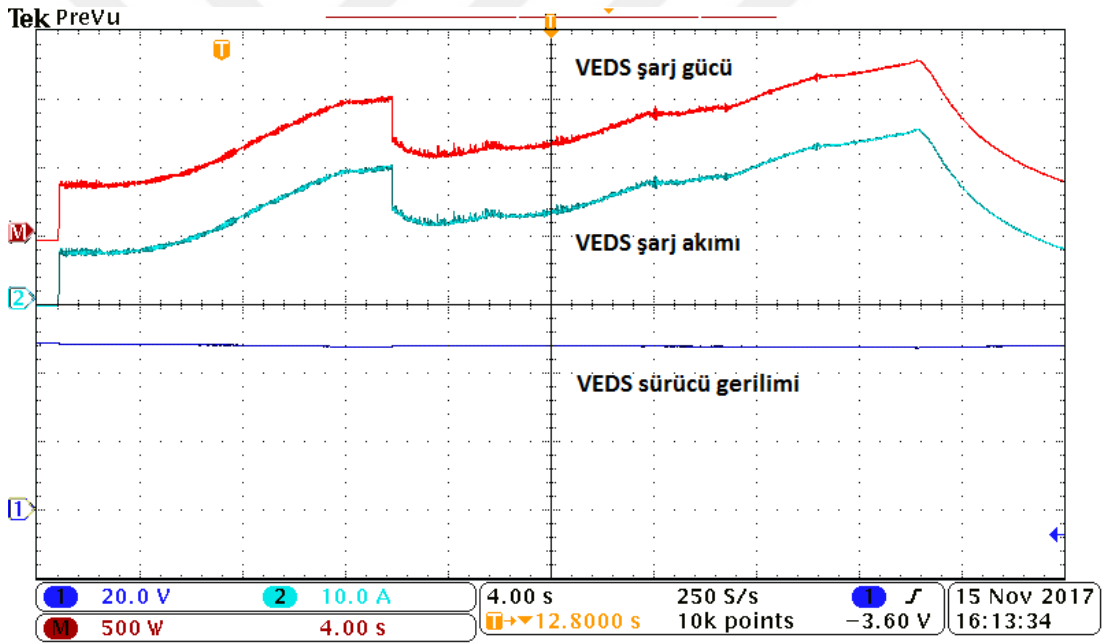


Şekil 3.54. VEDS'in şarjı ve 600 W'lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği

VEDS ünitesini 13000 d/d hıza çıkarırken M/G ünitesinin çektiği akım, gerilim ve güç grafikleri Şekil 3.55'de görülmektedir. İlk durumda volan durağan halde olduğundan, sistem ataletini yenmek için motor demeraj akımı çekmektedir. Şekil 3.55'de görülen ilk akım yükselmesi bu durumun sonucudur. Harekete geçen sistem hız kazandıkça depoladığı ve muhafaza ettiği enerji arttığından, çektiği akım ve güç

de zamana bağılı olarak artmaktadır. Kalkışta 1000 W güç tüketen ve 20 A akım çeken sistem, maksimum hıza ulaştığında 1250 W güç ve 25 amper akım çekmektedir. VEDS'in çektiği güç ve akıma bakıldığında sistemin 34 saniyede durağan halden maksimum hıza ulaştığı görülmektedir. Şekil 3.55'deki sonuçlar kullanılarak hesaplamalar yapıldığında, VEDS'in şarjı için harcanan enerji yaklaşık 27000 W.saniye (27 kW.s) olmaktadır.

Deşarjı sırasında VEDS'den yüke aktarılan toplam enerji Şekil 3.55'deki osiloskop ölçüm sonucu ile 14900 W.saniye (14,9 kW.s) olarak bulunmaktadır. Tüm sistemin verimi Denklem (3.3) ile hesaplanarak % 55 olarak bulunmaktadır. Bu değer aracın frenlemeden önce sahip olduğu kinetik enerjinin % 55'inin tekrar araca aktarılabildiğini göstermektedir.



Şekil 3.55. Sistem 13000 d/d hıza çıkarken (enerji depolanırken) elde edilen akım gerilim ve güç grafikleri

3.6.4. Büyük boyutlu geniş volanlı VEDS performans çalışmaları

Yapılan ölçümlerde sisteme ait akım, gerilim ve güç grafikleri elde edilmektedir. VEDS ünitesine enerji depolanmasının (şarj) ardından, yük grubu VEDS'den 600 W güç çekecek şekilde "sabit güç" modunda programlanmaktadır. VEDS'e enerji depolanması sırasında M/G ünitesinin akım, gerilim ve güç değerleri de ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Enerji depolanırken sistem 13000 d/d hıza çıkarılmaktadır.

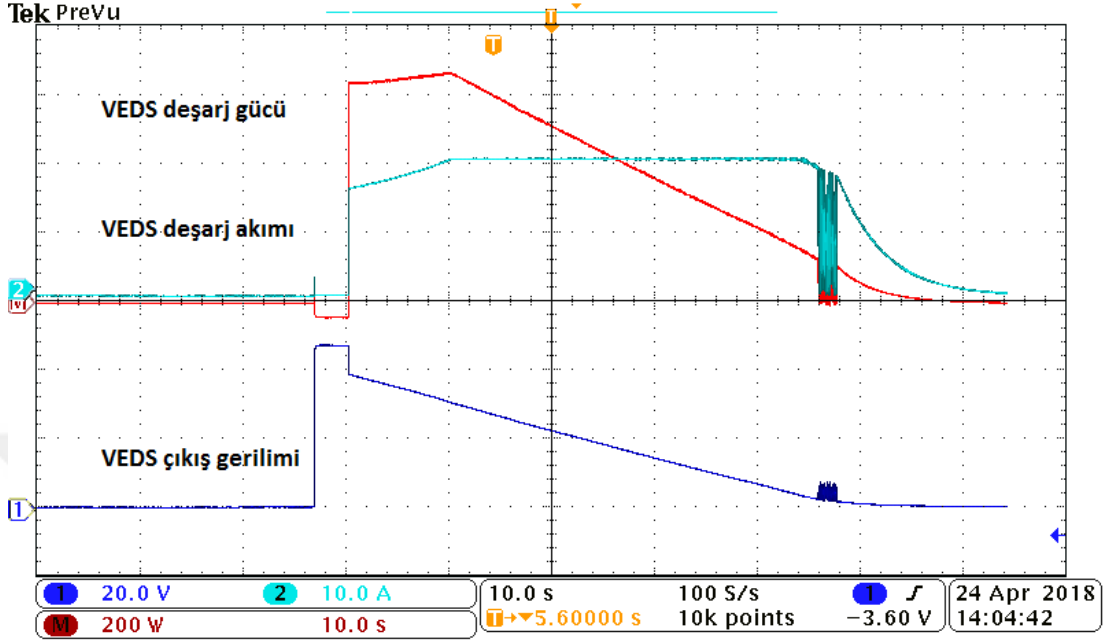
VEDS ünitesi 600 W'lık yükü 15 saniye besleyebilmektedir. Yük grubunun verebildiği akım değeri 20 amper ile sınırlı olduğundan, VEDS gerilimi düşse bile çekilen akım değeri 20 amperde sabit kalmaktadır. Şekil 3.56'da çıkışına 600 W yük bağlanmış olan VEDS ünitesinin akım, gerilim ve güç grafikleri görülmektedir. 15. saniyeden sonra sistemden güç çekilmeye devam edilmektedir. Yük grubu sabit bir şekilde 20 A akımı, 12. saniyeden 45. saniyeye kadar çekmeye devam etmektedir. VEDS'den çekilen toplam enerjiye bakıldığında, 600 W'lık yükü 35 saniye besleyebileceği görülmektedir.

Şekil 3.57'de VEDS ünitesinin 600 W yük ile deşarj edilmesi durumundaki hızlanma ve yavaşlama grafikleri görülmektedir. VEDS ünitesini 13000 d/d hıza çıkarırken M/G ünitesinin çektiği akım, gerilim ve güç grafikleri Şekil 3.58'de görülmektedir. İlk durumda volan durağan halde olduğundan, sistem ataletini yenmek için motor demeraj akımı çekmektedir. Şekil 3.58'de görülen ilk akım yükselmesi bu durumun sonucudur. Harekete geçen sistem hız kazandıkça depoladığı ve muhafaza ettiği enerji arttığından, çektiği akım ve güç de zamana bağlı olarak artmaktadır. Kalkışta 1200 W güç tüketen ve 24 A akım çeken sistem, maksimum hıza ulaştığında 1400 W güç ve 28 amper akım çekmektedir. VEDS'in çektiği güç ve akıma bakıldığında sistemin 40 saniyede durağan halden maksimum hıza ulaştığı görülmektedir. Şekil 3.58'deki sonuçlar kullanılarak hesaplamalar yapıldığında, VEDS'in şarjı için harcanan enerji yaklaşık 42000 W.saniye (42 kW.s) olmaktadır.

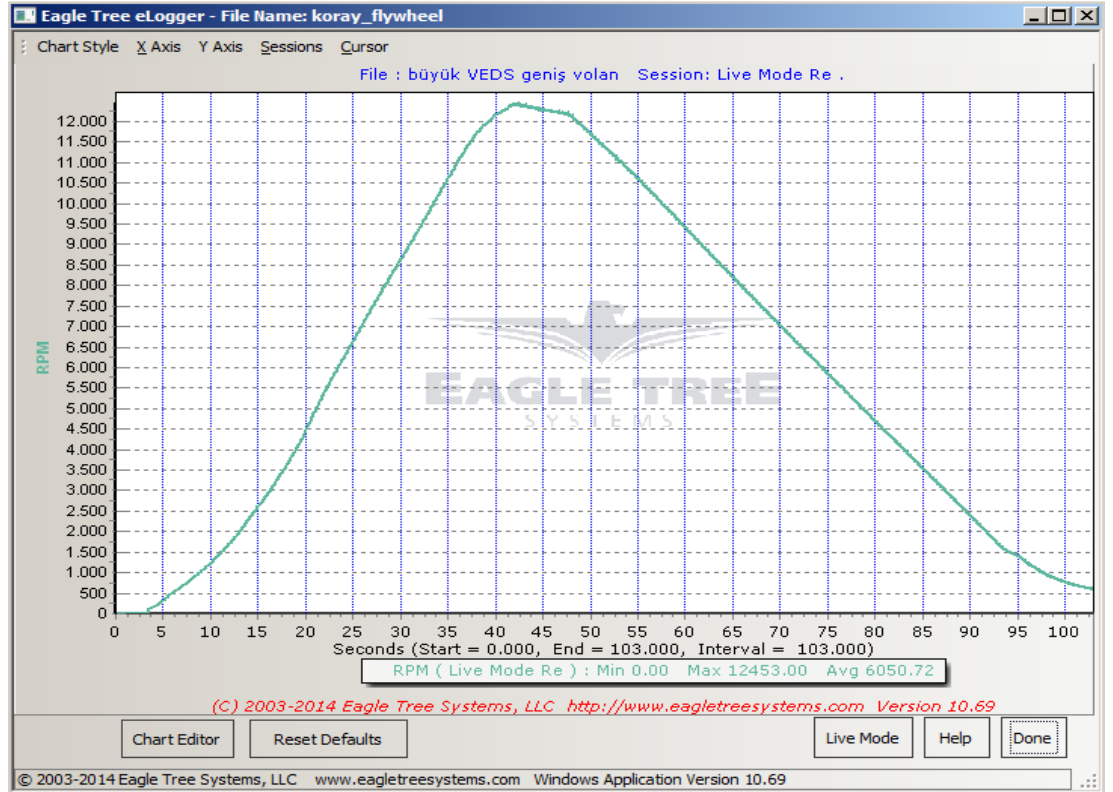
Deşarjı sırasında VEDS'den yüke aktarılan toplam enerji Şekil 5.58'deki osiloskop ölçüm sonucu ile 21000 W.saniye (21 kW.s) olarak bulunmaktadır. Tüm sistemin verimi Denklem (3.3) ile hesaplanarak % 50 olarak bulunmaktadır. Bu değer aracın frenlemeden önce sahip olduğu kinetik enerjinin % 50'sinin tekrar araca aktarılabildiğini göstermektedir.

VEDS performans testlerinden sonra elde edilen sonuçlar, prototip üretimi gerçekleştirilen düzeneğin yaklaşık % 49-55 verim ile enerji dönüşümü yapabildiğini göstermektedir. Bu verim hesaplamasında sırasıyla VEDS'e enerji depolanması sırasında motorun elektriksel ve volanın (rotor) mekanik verimi ile VEDS'den enerji çekilirken generatörün elektriksel ve volanın mekanik verimi dikkate alınmaktadır.

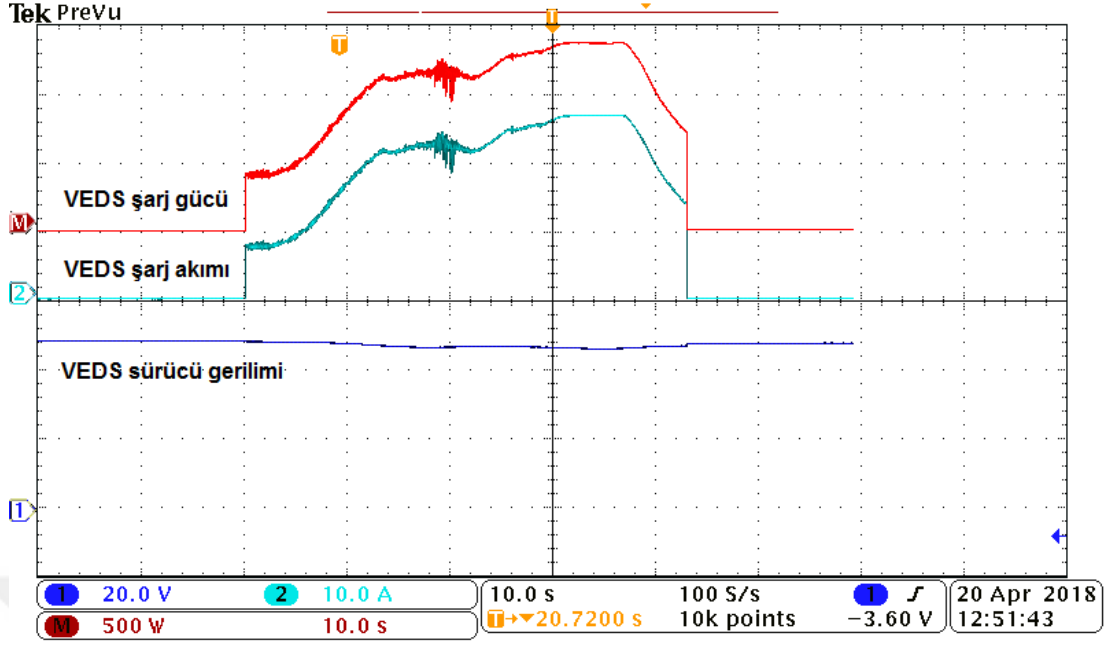
Tablo 3.15’de prototiplenen dört sistemin şarj sırasında çektiği ve deşarj sırasında verdiği enerji değerleri, sistem verimleri ve deşarj güçleri verilmektedir.



Şekil 3.56. Sistemden 600 W’lık güç çekilirken elde edilen akım, gerilim ve güç grafikleri



Şekil 3.57. VEDS’in şarjı ve 600 W’lık yük ile deşarj edilmesi sırasında elde edilen zamana göre devir sayısı grafiği



Şekil 3.58. Sistem 13000 d/d hıza çıkarken (enerji depolanırken) elde edilen akım gerilim ve güç grafikleri

Tablo 3.15. VEDS ünitelerine ait performans değerleri

VEDS ünitesi (Volan)	Şarj Enerjisi (W.saniye)	Deşarj Enerjisi (W.saniye)	Deşarj Gücü (W)	Sistem Verimi (%)
Küçük boyutlu dar	15300	8200	600	54
Küçük boyutlu geniş	24000	11600	600	49
Büyük boyutlu dar	27000	14900	600	55
Büyük boyutlu geniş	42000	21000	600	50

VEDS performans testlerinde elde edilen deşarj güç değerleri ile şarj ve deşarj zamanlarına ait sonuçların tamamı Tablo 3.16’da verilmektedir.

Tablo 3.16. VEDS ünitelerinin yüke bağlı şarj ve deşarj süreleri

Sistem tipi ve deşarj gücü	Şarj süresi (s)	Deşarj süresi (s)
Küçük boyutlu dar volan (200 W)	26	30
Küçük boyutlu dar volan (300 W)	26	23
Küçük boyutlu dar volan (500 W)	26	18
Küçük boyutlu dar volan (600 W)	26	17
Küçük boyutlu geniş volan (600 W)	28	26
Büyük boyutlu dar volan (300 W)	43	43
Büyük boyutlu dar volan (500 W)	43	31
Büyük boyutlu dar volan (600 W)	43	28
Büyük boyutlu geniş volan (600 W)	46	42

4. ULTRA-KAPASİTÖR ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ

Ultra-kapasitör enerji depolama teknolojisi, enerjinin statik olarak (hareketli parça içermeyen) depolanması prensibiyle çalışmaktadır. Ultra-kapasitörler normal kapasitörlerden yola çıkılarak geliştirilmiştir. Ancak normal kapasitörlere göre enerji yoğunlukları çok daha yüksektir. Diğer depolama teknolojileri ile kıyaslandığında enerji yoğunlukları az ancak güç yoğunlukları yüksektir. Ayrıca çevrim ömürleri de uzundur (1 000 000 çevrim). Kapasitörler iki adet iletken plaka arasına bir adet yalıtkan konulması ve bu yapının silindirik şeklinde sarılmasından meydana gelmektedir. Bu yapının sarım sayısı ne kadar fazla ise kapasitörün kapasite değeri de o oranda artacaktır. Sarım sayısının artması ise kapasitörün boyutlarının artmasına neden olur. Ultra-kapasitörlerin güç yoğunlukları yaklaşık olarak 3-12 kW/kg olmaktadır. Yüksek çevrim ömrü, yüksek verimlilik, geniş sıcaklık değerlerinde kararlı çalışmaları, bakıma gerek duymamaları ve hızlı cevap süresi ultra-kapasitörlerin temel avantajlarıdır. Yüksek maliyetleri, durduğu yerde kendi kendine deşarj olma ve düşük enerji yoğunlukları da başlıca dezavantajlarındandır. Sürekli gelişim içerisinde olan bu teknoloji, havacılık, uzay ve uydu uygulamaları, şebeke bazlı uygulamalar, elektrikli araçlar, savunma sanayi gibi ileri teknoloji gerektiren alanlarda tercih edilmektedir. Son dönemde birim maliyetlerinin gerilemesiyle birlikte batarya ve normal kapasitörlerin karşılayamadığı anlık yüksek güç ihtiyaçlarının karşılanması için tercih edilmektedir. Şebeke bazlı uygulamalarda gerilim regülasyonu sağlamak ve güç kalitesini artırmak için, kesintisiz güç kaynaklarında, vinç uygulamalarında, elektrikli otobüs ve tramvaylarda ve rüzgar türbinlerinde ise enerji depolama ünitesi olarak kullanılmaktadır. Almanya da otomotiv uygulamalarında İspanya da ise toplu taşımada 2003 yılından beri kullanılmaktadır [44-46].

Ultra-kapasitörler anlık olarak yüksek güç çıkışı verebildiklerinden şebeke bağlantılı uygulamalarda bataryalarla birlikte hibrit enerji depolama sistemi olarak kullanılmaktadır. Böylece hem anlık yüksek güç taleplerine cevap verilebilmekte hem de bataryaların üzerindeki stres azaltılmaktadır [61] .

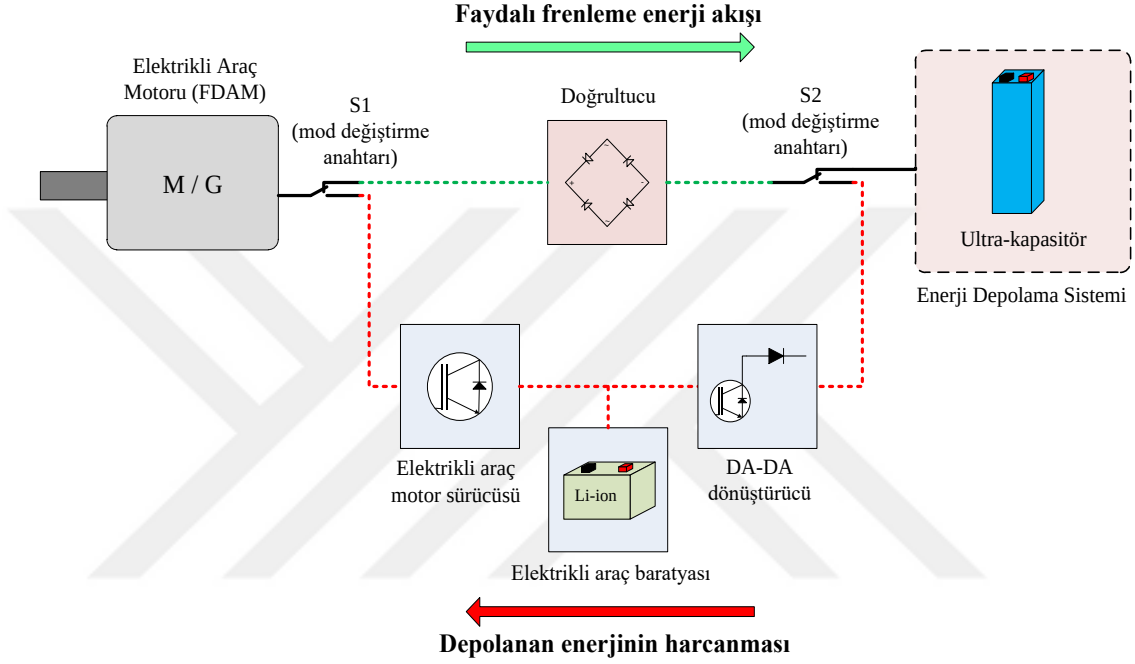
Araç uygulamalarına bakıldığında ultra-kapasitörler özellikle yakıt pilli araçlarda hibrit enerji kaynağı olarak tercih edilmektedirler. bunun en temel sebebi yakıt pillerinin anlık enerji taleplerini hızlı bir şekilde karşılayamamasıdır. Ultra-kapasitörler hızlı şarj ve deşarj tepki süreleri ile hibrit enerji depolama sistemlerinde önemli rol oynamaktadır. Ayrıca yakıt ekonomisini de artırmakta yardımcı olurlar [62, 63].

Ultra-kapasitörlerin hibrit araçlarda kullanımını öneren çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Batarya ve ultra-kapasitör hibrit yapısının kullanımı, farklı sürüş koşullarında % 6 ila % 22 arasında verim artışı sağlamaktadır [64]. Batarya ve ultra-kapasitör enerji depolama sisteminin karşılaştırıldığı bir çalışmada batarya grubunun UEDS'e göre 2,8 kat daha ucuza mal olabildiği belirtilmektedir [65]. EA ve HEA'ların üretim maliyetlerini aşağı çekebilmek adına uygun fiyatlı bataryalar tercih edilmektedirler. ZEBRA bataryalar fiyat olarak lityum bataryalardan çok daha uygundur. Ancak güç yoğunluğu değerleri lityum bataryalara göre düşüktür. ZEBRA bataryaların düşük güç yoğunluğunun yükseltilmesi adına ultra-kapasitörler tercih edilmekte ve hibrit bir yapı oluşturulmaktadır. Böylece % 16 menzil artışı, % 18 verimlilik artışı da sağlanmaktadır [66].

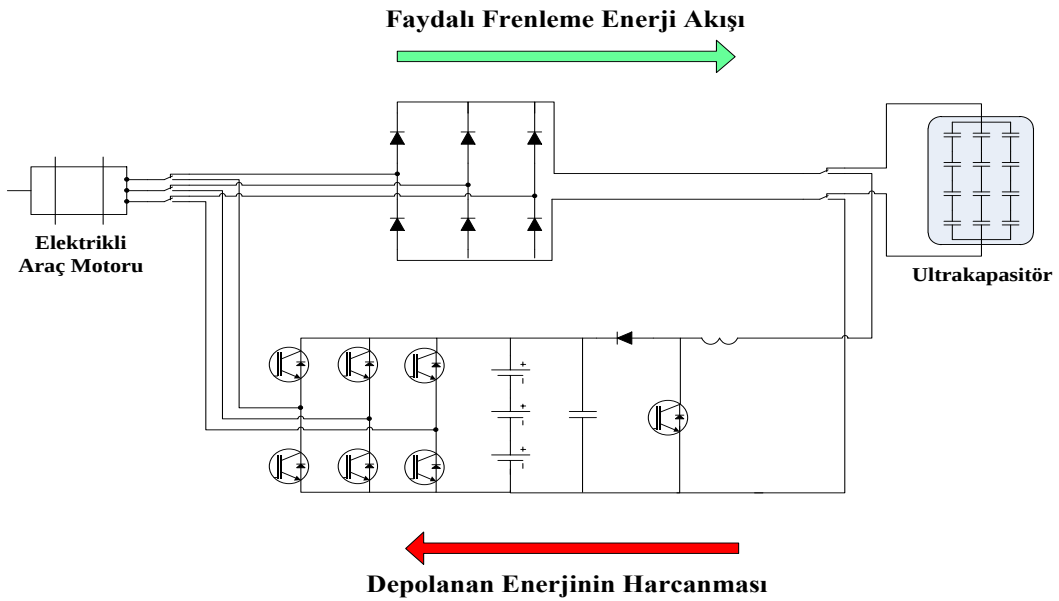
4.1. EA ve HEA'lar İçin Önerilen UEDS Topolojisi

Klasik yapıda araç frenleme yaptığında, aracın sahip olduğu kinetik enerji disk ve balatalarda ısı enerjisi olarak harcanmaktadır. Ancak önerilen sistemde araç frenleme yaptığında mekanik frenler devreye girmez. Geri kazanımlı frenleme sırasında aracın motor ünitesi generatör olarak çalıştırılır. Generatör uçlarından alınan gerilim doğrultularak ultra-kapasitör grubuna yönlendirilir ve enerji depolanır. Sonrasında, araç hareket ettirilmek veya hız kazandırılmak istendiğinde ihtiyaç duyulan enerji ultra-kapasitörler tarafından sağlanmaktadır. Ultra-kapasitörlerdeki enerji öncelikle yükseltici tip bir DA/DA dönüştürücü vasıtasıyla elektrikli aracın DA bara gerilimine yükseltilmektedir. Ardından aracın motor sürücüsüne aktarılan bu enerji aracın hareket etmesi için kullanılır. Geri kazanımlı frenleme yapılacağı zaman aracın motoru generatör olarak çalıştırılmaktadır. Generatörün ürettiği enerji S1 ve S2 anahtarlarının “Faydalı frenleme enerji akışı” moduna geçmesiyle ultra-kapasitöre aktarılmaktadır. Ultra-kapasitörlerdeki enerjiye ihtiyaç duyulduğunda ise S1 ve S2

anahtarları “Depolanan enerjinin harcanması” moduna geçerek kapasitörlerdeki enerjiyi aracın motor sürücü ünitesine aktarmaktadır. Ultra-kapasitör enerji depolama teknolojisinin elektrikli ve hibrit elektrikli araçlara uygulanması için geliştirilen topoloji Şekil 4.1’de verilmektedir. Faydalı frenleme sırasında enerji akışı ve depolanan enerjinin harcanması sırasında kullanılan devre elemanları Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.1. Geliştirilen topoloji ile EA ile UEDS arasındaki çift yönlü enerji akış diyagramı



Şekil 4.2. UEDS entegre edilmiş araç devre şeması

4.2. VEDS Ünitesine Eşdeğer UEDS Ünitesi İçin Boyutsal Hesaplamalar

Üretilen Volan Enerji Depolama Sisteminin (VEDS) enerji depolama kapasite değeri büyük sistem için Denklem (4.1) ile hesaplandığında, 7,75 Wh olarak bulunmaktadır. küçük sistem için hesaplandığında ise yaklaşık 4 Wh olarak bulunmaktadır. Hesaplamalarda kullanılan rotor devir sayıları Tablo 4.1’de verilmektedir.

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{1}{4} m r^2 \omega^2 \quad (4.1)$$

Tablo 4.1. Devir sayılarına göre VEDS’lerde depolanan enerji değerleri

	Devir Sayısı	Enerji (J)	Enerji (Wh)
Büyük Sistem Geniş Volan	13000	27900	7,75
Büyük Sistem Dar Volan	13000	18600	5,20
Küçük Sistem Geniş Volan	24000	14500	4,00
Küçük Sistem Dar Volan	24000	9700	2,70

Üretilen VEDS’lere denk enerji depolama kapasitesine sahip Ultrakapasitör Enerji Depolama Sisteminin (UEDS) parametreleri Denklem (4.2) ile hesaplanmaktadır.

$$E_C = \frac{1}{2} C U^2 \quad (4.2)$$

Büyük sistem ile küçük sistemin enerji depolama kapasitelerinin ortalaması alındığında yaklaşık 6 Wh’lık bir değer ortaya çıkmaktadır. Depolanan enerjiyi “Joule” cinsinden yazdığımızda ise yaklaşık 21000 J değerini buluruz. Bu değerlerden yola çıkarak VEDS’e eşdeğer enerji depolama kapasitesine sahip UEDS’in kapasite ve gerilim değerleri bulunmaktadır. Deneysel çalışmalarda Maxwell marka, her biri 15 V nominal çalışma gerilimi ve 58 F kapasiteye sahip ultra-kapasitörler kullanılmaktadır. Bu kapasitörlerden kaç adet kullanılacağı Denklem (4.1) ve (4.2)’den faydalanılarak bulunmaktadır. VEDS ünitelerinde çıkış gerilimi olarak 45 V seviyesi tercih edildiğinden, ultra-kapasitörlerin de gerilim seviyesi 45 V olacak şekilde ayarlanmaktadır. Yapılan hesaplamalar sonucu kullanılması gereken ultra-kapasitör sayısı ve bağlantı şekli Tablo 4.2’de verilmektedir.

Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan ultrakapasitörlerin özellikleri Tablo 4.3’de verilmektedir. UEDS’de kullanılacak olan 15 V 58 F ultrakapasitör Şekil 4.3’de görülmektedir.

Tablo 4.2. VEDS ile denk enerji depolama kapasitesine sahip UEDS büyüklüğü

Ultrakapasitör Parametreleri	Gerilim Değeri (V)	Bağlantı şekli	Kapasite değeri (F)	Depolanan Enerji (J)
	45	3 seri	19	19200

Tablo 4.3. Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan ultrakapasitörün teknik özellikleri [67]

Parametreler	Ultrakapasitör BPAKK0058 B01
Nominal Kapasite	58 F
Kapasite Toleransı	$\pm$ % 20
Gerilim	15 V
Maksimum İşletme Gerilimi	50 V
Direnç (ESR), DA	19 m Ω
Isıl Direnç (Rth)	1,8 °C/W
Çalışma Sıcaklığı	-40 °C ~ 65 °C
Güç Yoğunluğu (Pd)	3000 W/kg
Maks. Güç Yoğunluğu (Pmak)	11200 W/kg
Enerji Yoğunluğu (Emak)	3,63 Wh/kg
Sızıntı Akımı	1 mA
Kısa Devre Akımı (Isc)	1500 A
Maksimum Sürekli Akım	20 A
Maksimum Tepe Akım	80 A
Ağırlık	560 g



Şekil 4.3. UEDS’de kullanılan ultrakapasitörler

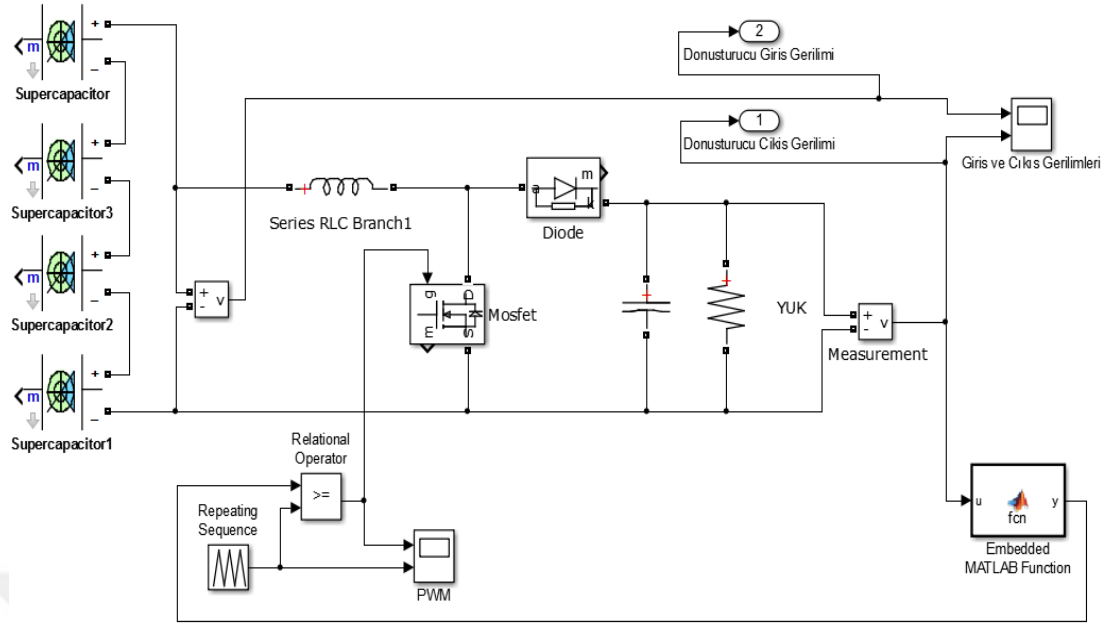
4.3. Ultra-kapasitör Enerji Depolama Sistemi Simülasyon Çalışmaları

Daha önceki çalışmalarda VEDS'in enerji depolama kapasitesi hesaplanarak ve ölçülerek belirlenmiştir. Bu bölümde, VEDS simülasyonlarındaki değere denk kapasitede bir UEDS sistemi için simülasyon çalışmaları yapılmaktadır.

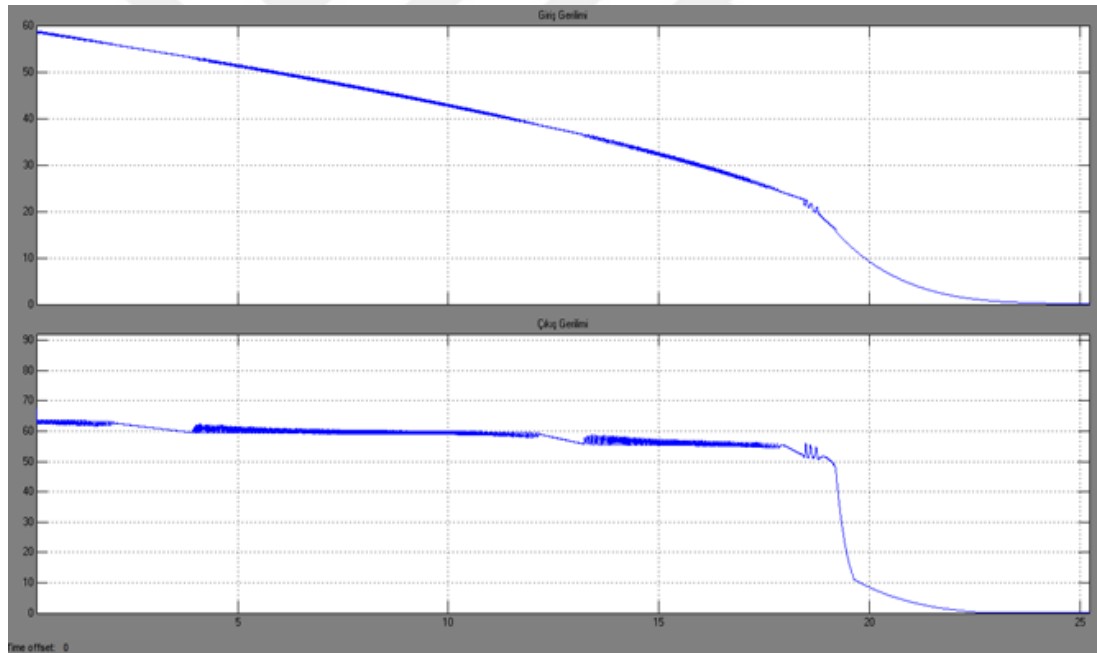
UEDS simülasyonunda MATLAB'de bulunan hazır ultra-kapasitör modeli kullanılmaktadır. Ultra-kapasitör çıkışı, VEDS modelinde de kullanılan DA/DA dönüştürücüye bağlanmaktadır. Şekil 4.4'de UEDS ünitesi ve DA/DA dönüştürücü modelinin açık hali görülmektedir.

Simülasyonda 4 adet ultrakapasitör seri bağlanmaktadır. Her bir ultra-kapasitörün gerilim değeri 15 V ve kapasite değeri 58 F olarak seçilmiştir. Toplam gerilim 60 V ve kapasite 14,5 F olmaktadır. Simülasyon çalıştırıldığında çıkışına 1200 W yük bağlanan DA/DA dönüştürücünün giriş gerilimi yaklaşık 18 saniye içinde 60 V seviyesinden 15 V seviyelerine kadar düşmektedir. Ancak sistemin çıkış gerilimi 63 V ile 55 V bandında sabit kalmaktadır. Şekil 4.5'de çıkışına DA/DA dönüştürücü bağlanmış UEDS ünitesinin gerilim grafikleri görülmektedir. Simülasyondaki model kullanılarak istenilen ölçekte bir ultra-kapasitör grubu oluşturulabilmektedir. Ayrıca sistemin çıkışına bağlanan yükün değerine göre ultra-kapasitör grubunun yükü ne kadar zaman besleyebileceği görülebilmektedir. Sistemde kullanılan DA/DA dönüştürücü sayesinde sistemin çıkış gerilimi dar bir bantta stabil şekilde kalmaktadır. Yapısı itibarıyla ultra-kapasitörlerden enerji çekildikçe çıkış gerilimleri düşmektedir. Ultra-kapasitörlerin geriliminin zamanla azalması sistemin çıkışına bağlı, sabit değerlikli yükün akımının da gerilimle orantılı bir şekilde düşmesine neden olmaktadır.

Gerilim ve akımdaki bu düşüş sistemden çekilen güç ve enerjinin de zamana bağlı azalmasına neden olmaktadır. Bu durum gerçekte sistemin kullanım amacı ile örtüşmeyen bir durumdur. Bu noktada sistemin çıkışına konulan DA/DA dönüştürücü yardımıyla ultra-kapasitör gerilimi düşse bile yüke uygulanan gerilim değeri değişmemektedir (dar bir bantta değişmektedir). Bu da sistemden çekilen gücün ve enerjinin zamana bağlı bir şekilde sabit kalmasını sağlamakta ve sistem performansını daha gerçekçi bir şekilde simüle etmeyi sağlamaktadır.



Şekil 4.4. UEDS genel MATLAB modeli



Şekil 4.5. DA/DA dönüştürücü giriş ve çıkış gerilim grafikleri

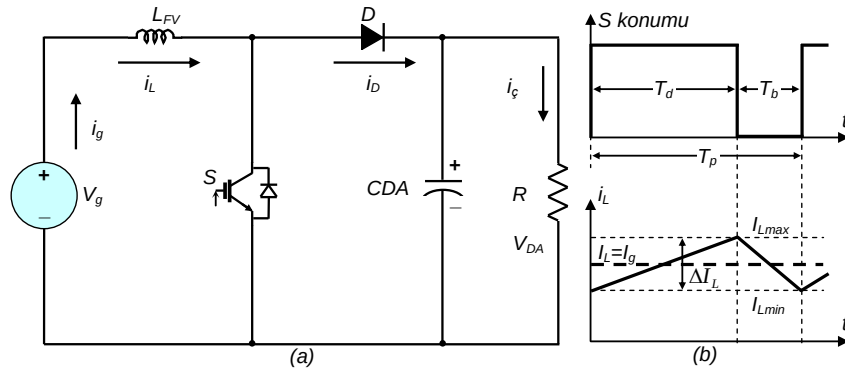
4.4. DA/DA Dönüştürücü Tasarımı ve Üretimi

VEDS'lerde enerjinin depolanması ve depolana enerjinin harcanması için M/G ünitesine ihtiyaç duyulmaktadır. Sisteme enerji depolanırken M/G ünitesi motor modunda çalışmaktadır. Sistemde depolanan enerjinin harcanması sırasında ise (VEDS'in kaynak olarak kullanılması durumu) VEDS'de yer alan M/G ünitesi generatör modda çalıştırılmaktadır. Generatör modda çalışmada motor uçlarındaki 3

fazlı AA gerilim doğrultularak DA/DA doğrultucuya verilmektedir. VEDS'den enerji çekildikçe rotorun devir sayısı azalmaktadır. Rotor M/G ünitesine direkt olarak bağlı olduğundan, generatör çıkış gerilimi de rotor devri ile aynı oranda düşecektir. Bu gerilim düşümü gücün de azalması anlamına gelmektedir. Çekilen gücün sabit kalması için düşen generatör çıkış gerilimini bir DA/DA dönüştürücü kullanarak sabit tutmak gerekmektedir. Böylece çıkış gücü de sabit kalmaktadır.

Aynı durum ultra-kapasitör grubu için de geçerli olmaktadır. Ultra-kapasitörlerden enerji çekildikçe uç geriliminde düşüş yaşanmaktadır. Buna bağlı olarak akım ve güç de azalmaktadır. Gücü sabit tutabilmek adına ultra-kapasitörlerin çıkışına bir DA/DA dönüştürücü entegre edilmektedir.

Tasarlanan DA/DA çeviricinin giriş uçlarındaki gerilim değişken olsa dahi çıkış gerilimi ayarlanan değerde sabit kalacak şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Üretilen DA/DA çeviricinin yapısı sayesinde çıkış gerilimi istenilen değere ayarlanabilmektedir. Böylelikle UEDS'in uçlarındaki gerilim hangi aralıkta değişirse değişsin DA/DA dönüştürücünün çıkış uçlarındaki gerilim ayarlanan değerde sabit kalmaktadır. Şekil 4.6'da tasarlanan yükseltici tip DA/DA dönüştürücünün güç devresi görülmektedir.



Şekil 4.6. Yükseltici tip DA/DA dönüştürücü güç devresi

DA/DA yükseltici yapısında birinci aralıkta yarı iletken anahtar iletimdedir. V_g kaynağı tarafından endüktans beslenir, endüktanstan geçen akım doğrusal olarak artar ve endüktansın enerji seviyesi de yükselir. Bu aralıkta yükün beslemesini kondansatör üstlenir. Yarı iletken anahtarın sinyalinin kesilmesiyle, enerjili olan endüktansın ürettiği emk ile D diyodu iletime geçer. İkinci aralıkta, diyot iletimdedir.

V_g kaynağı ve endüktansta biriken enerji tarafından yük beslenir, endüktanstan geçen akım doğrusal olarak azalır ve endüktansın enerji seviyesi de düşer. Ayrıca, bu devrede güç elemanları V_{ϕ} çıkış gerilimine maruz kalır. Tablo 4.4’de DA/DA dönüştürücünün parametreleri verilmektedir.

Tablo 4.4. Yükseltici tip DA/DA dönüştürücü parametreleri

λ	Doluluk oranı
f_p	Anahtarlama frekansı (kHz)
T_d	S anahtar iletim süresi (μs)
T_b	S anahtar kesim süresi (μs)
T_p	Çalışma periyodu (μs)
V_g	DA giriş gerilimi (V)
V_{DA}	DA çıkış gerilimi (V)
I_g	DA giriş akımı (A)
I_{ϕ}	DA çıkış akımı (A)
ΔI_L	Endüktans akım dalgalanması (A)

Kararlı rejimde endüktans geriliminin pozitif ve negatif alanlarının eşitliğinden, ortalama DA çıkış gerilimi Denklem (4.3) ile elde edilir. Denklem (4.4)’de doluluk oranı eşitliği verilmektedir.

$$V_{DA} = \frac{1}{1-\lambda} V_g \quad (4.3)$$

$$\lambda = \frac{T_d}{T_p} \quad (4.4)$$

Giriş ve çıkıştaki güçlerin eşitliğinden, giriş akımı Denklem (4.5)’de verilmektedir. Endüktans akımındaki dalgalanma miktarı ise Denklem (4.6)’da verilmektedir. Tasarlanan DA/DA dönüştürücü çıkışındaki akım dalgalanmasının en fazla % 10 olması istenmektedir. En fazla % 10 akım dalgalanması değerini sağlayabilmek için Denklem (4.6) kullanılarak hesaplamalar yapıldığında, kullanılması gereken endüktans değerinin 0,8 – 1 mH arasında olması gerektiği görülmektedir.

$$I_g = \frac{1}{1-\lambda} I_{\phi} \quad (4.5)$$

$$\Delta I_L = \lambda(1-\lambda) \frac{V_{DA}}{f_p L} \quad (4.6)$$

DA/DA yükseltici dönüştürücüde, sürekli, sınırdaki ve kesintili çalışmalar Denklem (4.7) ile özetlenebilir.

$$I_g \begin{cases} > \Delta I_L/2 & \text{Sürekli iletim modunda çalışma} \\ = \Delta I_L/2 & \text{Sınırdaki çalışma} \\ < \Delta I_L/2 & \text{Kesintili iletim modunda çalışma} \end{cases} \quad (4.7)$$

DA/DA yükseltici dönüştürücüde birinci aralıkta çıkış akımını tamamen kondansatör üstlenir, birinci aralıkta boşalan kondansatör ikinci aralıkta dolar. Kararlı durumda kondansatör geriliminin artma ve azalma miktarları eşit olduğundan, dalgalanma miktarı sadece birinci aralık göz önünde tutularak Denklem (4.8)'deki gibi hesaplanmaktadır. Sistem parametreleri, 750 watt yük değeri için gerilimdeki en fazla dalgalanma miktarı % 2 olacak şekilde seçilmektedir.

$$\Delta V_{DA} = \frac{\lambda I_{\phi}}{f_p C_{DA}} \quad (4.8)$$

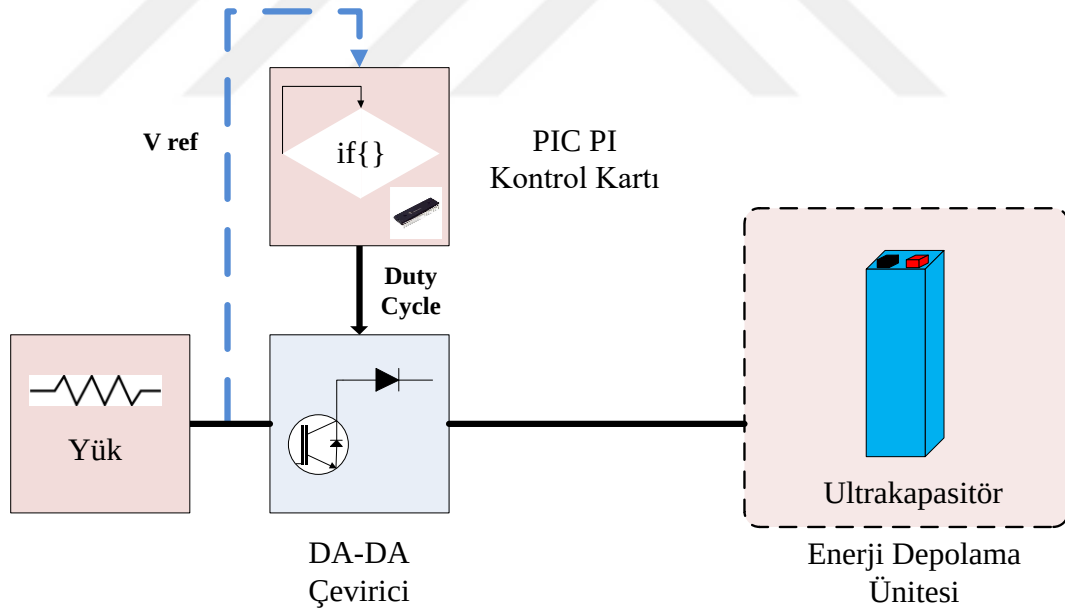
Bu çalışmada tasarlanan DA/DA yükseltici dönüştürücü verilen Denklem (4.3) – (4.8) kullanılarak gerekli olan bobin ve kondansatör değerleri hesaplanmıştır. Tasarlanan dönüştürücüde hesaplanan değerler simülasyon ortamında test edilerek sisteme uygunluğu sağlanmıştır. Tablo 4.5'de hesaplanan yükseltici tip DA/DA dönüştürücü parametreleri verilmektedir. Şekil 4.7'de tasarlanan DA/DA dönüştürücünün blok kontrol şeması verilmektedir. Şekil 4.8'de üretilen DA/DA dönüştürücü görülmektedir.

Tablo 4.5. Yükseltici tip DA/DA dönüştürücü parametreleri

Parametreler	Değeri
T_p	100 μs
f_p	10 kHz
I_{ϕ}	16 A
I_g	18-30 A
V_g	25-50 V
V_{DA}	50 V
L	> 800 μH
C_{DA}	> 100 μF

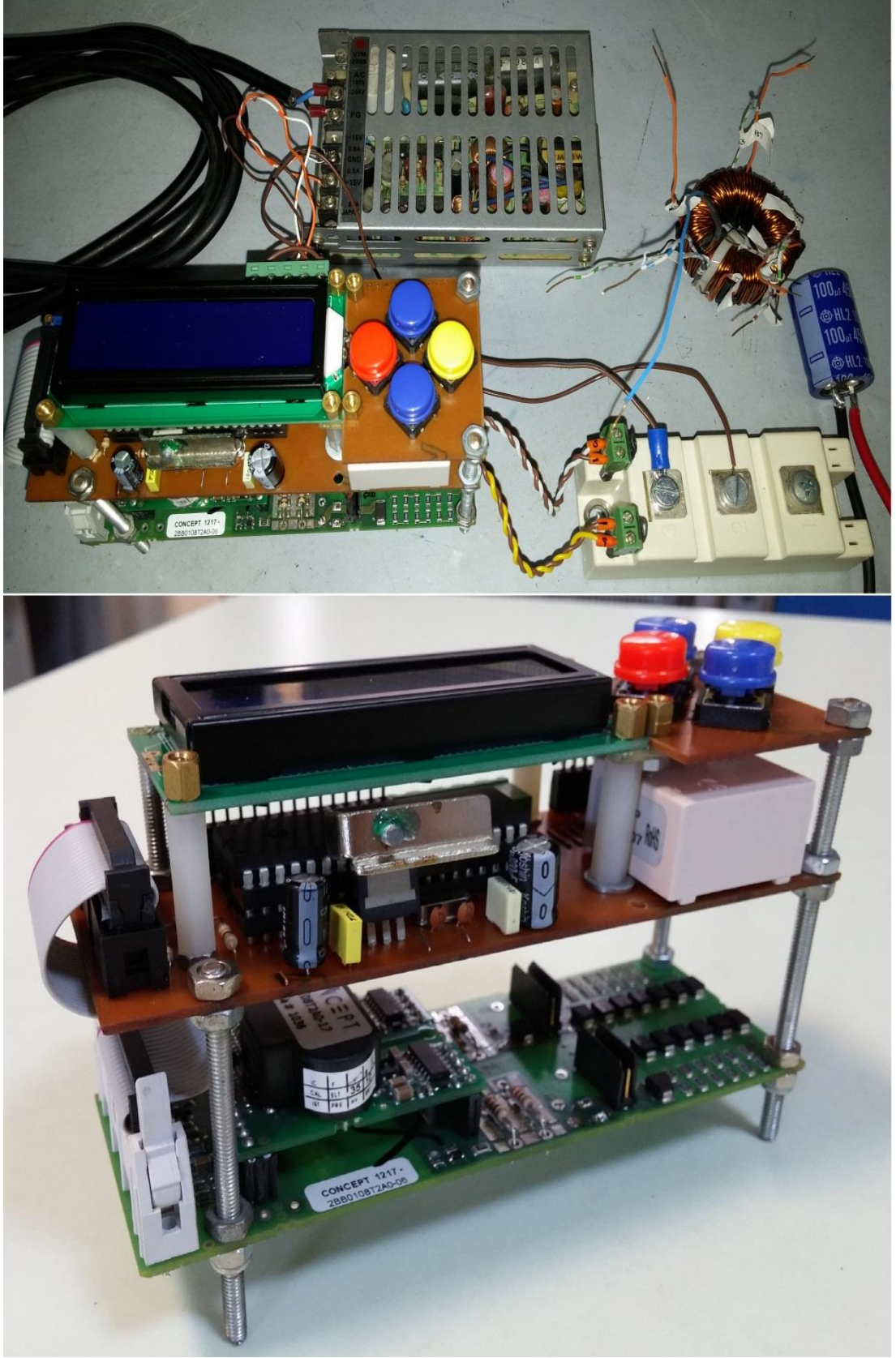
Tasarlanan sistemin gerçeklenmesinde anahtarlama elemanı olarak, Semikron SKM 75GB128D model 75 A akım ve 1200 V gerilim değerine sahip IGBT modül kullanılmaktadır. Anahtarlama elemanını sürmek için Concept marka 2SC0108T model IGBT sürücü kullanılmaktadır. Devrede akım ve gerilim dalgalanmalarının istenilen aralıktta kalmasını sağlamak adına 1 mH değerinde endüktans ve 100 μ F değerinde kondansatör kullanılmaktadır. Tasarlanan sistemde düşen giriş gerilimi çıkışta sabit tutulmak istendiğinden, hall etkili TEG NV25P, 500V, 2500:1000 dönüştürme oranına sahip gerilim sensörü kullanılmaktadır. Tüm sistemin kontrolü 16F873 kondlu PIC tarafından sağlanmaktadır.

İlk rnekke DA/DA dönüştürücünün referans çıkış gerilimi 20 V'a ayarlanmıştır. Ardından "başla" butonuna basılarak sistem çalıştırılmıştır. Giriş gerilimi 17 volta ayarlanarak sistem çıkış gerilimi ölçülmüştür. DA/DA dönüştürücü çıkış gerilimini 20 V'a yükseltmiştir. şekil 4.9'da dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimleri ile ayarlanan gerilim ekranı görülmektedir.



şekil 4.7. DA/DA dönüştürücünün kontrol blok şeması

Ardından giriş gerilimi 12 volta düşürülmüştür. DA/DA dönüştürücünün çıkış gerilimi yine 20 V olarak ölçülmüştür. şekil 4.10'da ölçüm sonuçları görülmektedir. Son olarak ise giriş gerilimi 7 volta düşürülmüş ve çıkış geriliminin ayarlanan 20 V değerinde sabit kaldığı gözlenmiştir. şekil 4.11'de ölçüm sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.8. Üretilen DA/DA dönüştürücü devresi



Şekil 4.9. DA/DA çeviriciye 17 V giriş gerilimi uygulanarak yapılan ölçüm sonucu

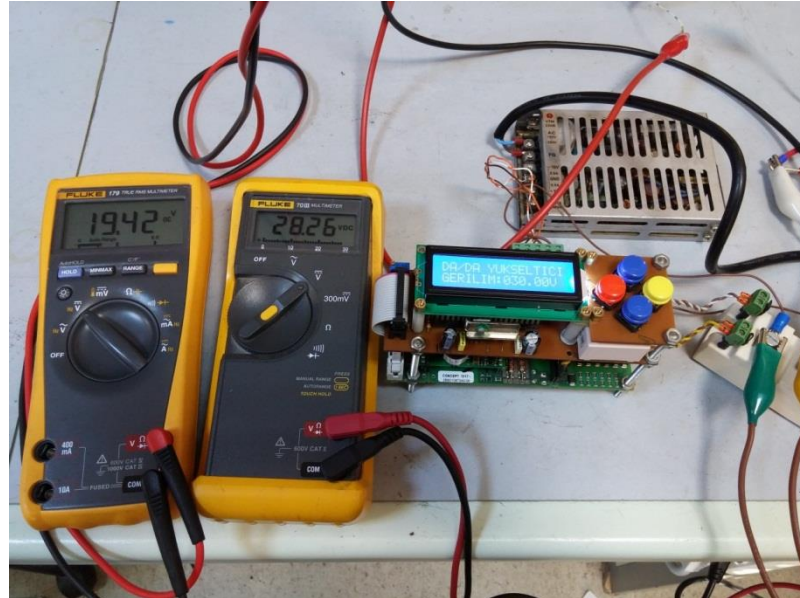


Şekil 4.10. DA/DA dönüştürücüye 12 V giriş gerilimi uygulanarak yapılan ölçüm sonucu



Şekil 4.11. DA/DA dönüştürücüye 7 V giriş gerilimi uygulanarak yapılan ölçüm sonucu

Bir diğer deneyde DA/DA dönüştürücü çıkış gerilimi ayar menüsünden 30 V'a ayarlanmıştır. Giriş gerilimi ise ilk denemede 19 V'a ayarlanmıştır. Bu durumda Şekil 4.12'de görüldüğü gibi çıkış gerilimi 28 voltta sabit kalmıştır. İkinci olarak ise giriş gerilimi 9 volta ayarlanarak çıkış gerilimi gözlenmiştir. Sonuçta çıkış geriliminin ayarlanan değerde sabit kaldığı Şekil 4.13'de görülmektedir.



Şekil 4.12. DA/DA dönüştürücüye 19 V giriş gerilimi uygulanarak yapılan ölçüm sonucu



Şekil 4.13. DA/DA dönüştürücüye 9 V giriş gerilimi uygulanarak yapılan ölçüm sonucu

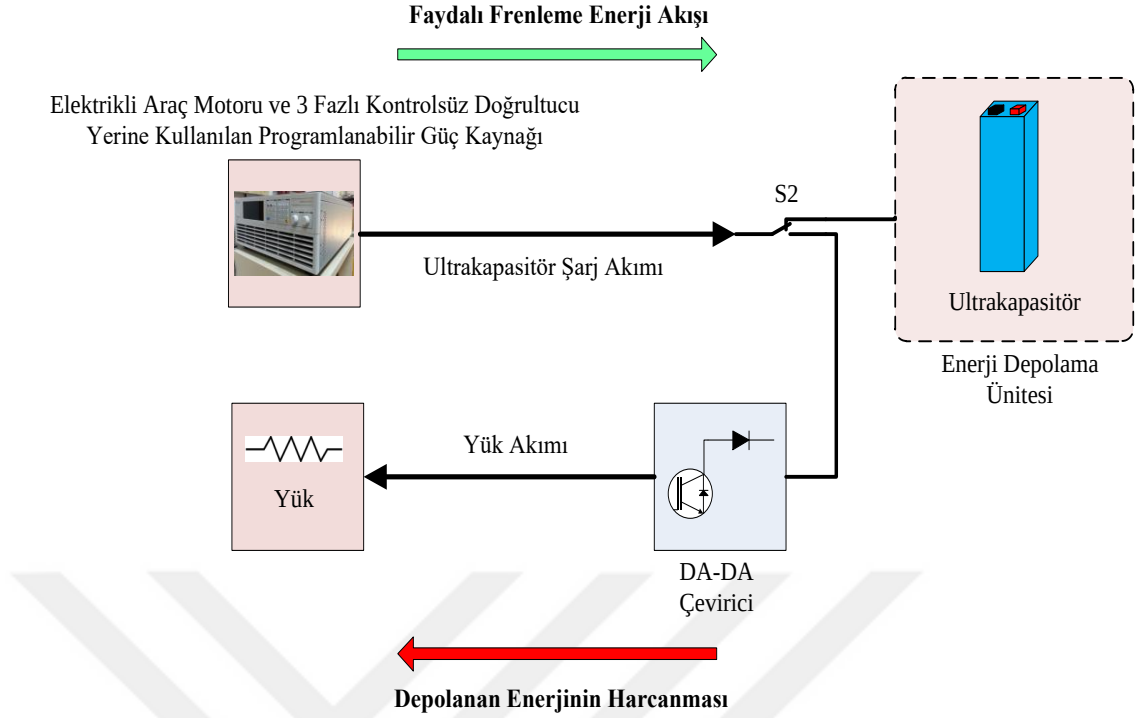
Bu deneyler neticesinde DA/DA dönüştürücünün girişine geniş bir aralıkta gerilim uygulansa bile istenildiği gibi sabit çıkış gerilimi verdiği gözlenmiştir.

4.5. Ultra-kapasitör Enerji Depolama Sistemi Performans Çalışmaları

UEDS testleri yapılırken elektrikli araç M/G ünitesi yerine “Chroma 62050H-600S” programlanabilir DA kaynak ve lityum polimer batarya kullanılarak testler gerçekleştirilmektedir. Bu yapıya ait devre şeması Şekil 4.14’de görülmektedir. Kullanılan programlanabilir DA kaynağın teknik özellikleri Tablo 4.6’da verilmektedir.

Tablo 4.6. M/G ünitesi yerine kullanılan “Chroma 62050H-600S” programlanabilir DA güç kaynağı teknik özellikleri [68]

Parametreler	Chroma FV Simülasyon 62050H-600S
Çıkış Gerilimi	0-600 V
Çıkış Akımı	0-8,5 A
Çıkış Gücü	5000 W
Gerilim Dalgalanması	600 mV
Akım Dalgalanması	15 mA
Tepki Süresi (Tam Yükle)	60 mS
Gerilim Ölçme Hassasiyeti	10 mV
Akım Ölçme Hassasiyeti	1 mA

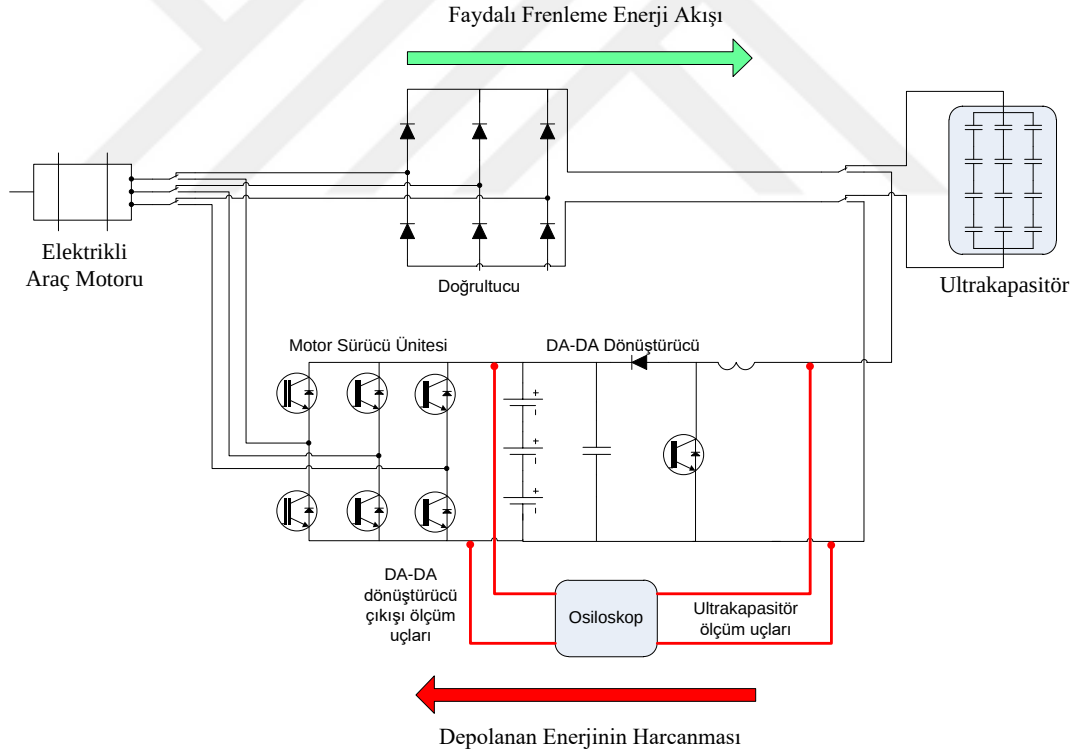


Şekil 4.14. UEDS için elektrikli araç M/G ünitesi (DA kaynak) gibi davranan programlanabilir güç kaynaklı devre şeması

Ultrakapasitör enerji depolama sistemi ve volan enerji depolama sistemlerinin depoladıkları enerji sabit bir yük kullanılarak tüketilmektedir. Böylece enerji depolama sistemlerinin kapasiteleri ölçülebilmektedir. Ölçümün sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için yükün çektiği gücün zamana, sıcaklığa ve diğer etkenlere göre değişmemesi gerekmektedir.

Deneysel çalışmalarda 58 farad 15 volt değerinde 3 adet ultrakapasitör kullanılmaktadır. Kapasitörler seri bağlanarak toplamda 45 V değerinde bir grup oluşturulmaktadır. DA/DA dönüştürücünün girişine ultrakapasitörlerden elde edilen 45 V gerilim uygulanmaktadır. DA/DA dönüştürücünün çıkışı ise 50 V değerine ayarlanmaktadır. Denklem (4.2) kullanılarak hesaplamalar yapıldığında, Ultrakapasitörlere yaklaşık 19000 J'lük enerji depolanmaktadır. Depolanan bu enerji DA/DA dönüştürücü kullanılarak yük üzerinde harcanmaktadır. Şekil 4.15'de sistem şeması ve ölçümlerin hangi noktalardan alındığını gösteren şema görülmektedir. Bu deneyin sonucunda elde edilen osiloskop grafikleri Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilmektedir.

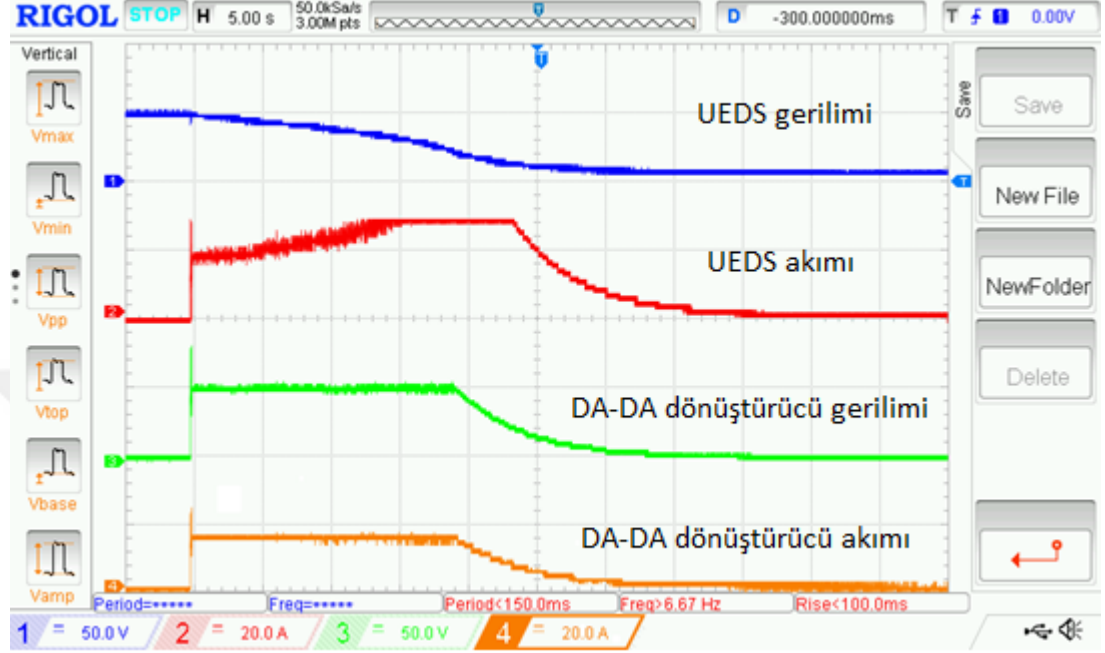
Şekil 4.16’da mavi renk ile gösterilen grafik ultrakapasitör grubunun gerilim değerinin zaman bağlı değişimini göstermektedir. Ultra-kapasitör uç gerilimi dolu iken yaklaşık 47 V gerilim seviyesindedir. Yüğü besledikçe uç gerilimi 10 V seviyesine kadar düşmektedir. Kırmızı renk ile gösterilen grafikte ise ultrakapasitörlerden çekilen akımın zamana bağlı değişimi görülmektedir. Başlangıçta 20 A olan akım değeri, uç geriliminin düşmesiyle ve sistemin sabit güç modunda olmasından dolayı 30 A seviyesine yükselmektedir. Yeşil renk ile gösterilen grafikte DA/DA dönüştürücünün çıkış gerilimi yani yük gerilimi görülmektedir. DA/DA dönüştürücü çıkış gerilimi 50 V değerine ayarlandığından, giriş gerilimi düşse bile çıkış gerilimi ayarlanan 50 V değerinde sabit kalmaktadır. Turuncu renkli grafikte ise DA/DA dönüştürücünün çıkış akımı yani yük akımı görülmektedir. Sistem sabit güç modunda çalıştırıldığından çıkış akımı 16 A seviyesinde sabit kalmaktadır.



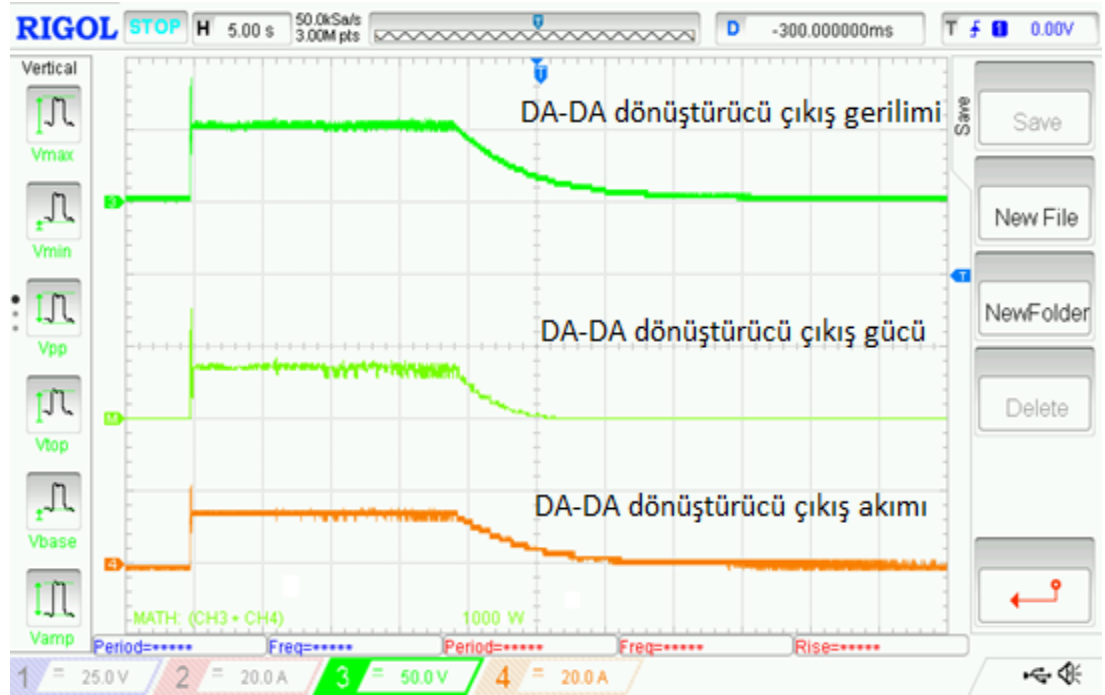
Şekil 4.15. UEDS ünitesi devre şeması ve ölçüm uçları

Şekil 4.17’de DA/DA dönüştürücünün çıkışından okunan akım ve gerilim bilgileri kullanılarak osiloskobun güç modülüne hesaplatılan güç grafiği yer almaktadır (açık yeşil renkli grafik). DA/DA dönüştürücü çıkış gerilimi ve akımı sabit olduğundan sistemin çıkış gücü 750 W değerinde sabit olmaktadır (açık yeşil renkli grafik).

Şekil 4.18’de ise ultra-kapasitörlerden çekilen güç değeri (DA/DA dönüştürücü giriş gücü), yine ultrakapasitör akım ve gerilim değerleri kullanılarak, osiloskobun güç modülü tarafından hesaplanmıştır (açık yeşil renkli grafik).

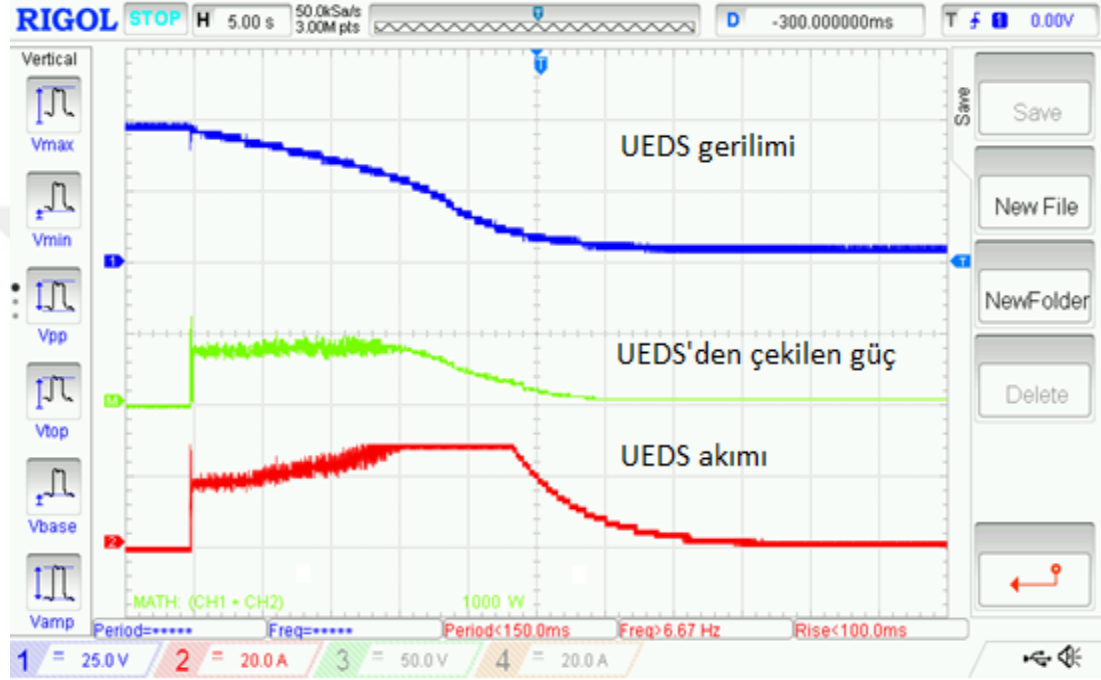


Şekil 4.16. DA/DA dönüştürücü giriş ve çıkış akım-gerilim grafikleri



Şekil 4.17. DA/DA dönüştürücü çıkış akım, gerilim ve güç grafikleri

UEDS uç gerilimi düşmesine rağmen sistemin çıkış akımı zamanla arttığından, sistemden çekilen güç değeri sabit olmaktadır. UEDS ünitesinden yaklaşık olarak 800 W güç çekilmektedir. Bu grafiklerden yola çıkıldığında, DA/DA dönüştürücünün giriş gücü ve çıkış gücü arasındaki oran hesaplanabilmektedir. Bu oran DA/DA dönüştürücünün verimini göstermektedir. DA/DA dönüştürücünün yaklaşık olarak % 95 verimle çalıştığı söylenebilir.



Şekil 4.18. DA/DA dönüştürücü giriş akım, gerilim ve güç grafikleri

UEDS ünitesinin şarj ve deşarj deneylerinde oldukça yüksek verimler elde edilmektedir. Bunun en önemli nedeni UEDS'in enerjiyi hiçbir hareketli parça içermeyen statik olarak depolamasıdır. Tablo 4.7'de UEDS ünitesinin verimlilik analizine ait değerler verilmektedir. Toplam sistem verimi (DA/DA dönüştürücü ile birlikte) % 85 olarak elde edilmektedir. Bu değer UEDS teknolojisine göre daha yüksek verimlere ulaşabildiğini göstermektedir.

Tablo 4.7. UEDS ünitesi performans değerleri

	Şarj Enerjisi (W.saniye)	Deşarj Enerjisi (W.saniye)	Sistem Verimi (%)	Deşarj gücü (W)
UEDS ünitesi	19000	16250	85	750

5. VEDS VE UEDS ÜNİTELERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

(3.1) ve (3.2) formülleri ile hesaplamalar yapıldığında Tablo 5.1’de verilen enerji yoğunlukları elde edilmektedir. Ayrıca sistemlerin araç içerisinde kaplayacakları fiziksel boyutları da Tablo 5.1’de verilmektedir.

Tablo 5.1. Enerji depolama sistemlerinin enerji yoğunlukları

Ultra-kapasitör Enerji Depolama Sistemi				Volan Enerji Depolama Sistemi				
Fiyat (\$)	Enerji Kapasitesi (wh)	Hacim (lt)	Toplam Ağırlık (kg)	Fiyat (\$)	Enerji Kapasitesi (wh)	Hacim (lt)	Toplam Ağırlık (kg)	Devir Sayısı (d/d)
675	8,1	4	2,25	300	8	10	20	13500
2000	42	16	10	500	41	10	20	30000
4800	115	46	30	700	115	10	20	50000

Tablo 5.1 incelendiğinde, VEDS ünitesinin yüksek devirlerde enerjiyi üstel olarak depoladığı görülmektedir. VEDS ünitesinin hacmi ve ağırlığı aynı kaldığı halde, devir sayısı artırılarak sistemin depoladığı enerji de artırılabilir. Bu da VEDS ünitesinin enerji yoğunluğunun birim hacim ve birim ağırlığa bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir. Ancak UEDS ünitesi incelendiğinde, depolanan enerjinin hacim ve ağırlıkla doğru orantılı bir şekilde değiştiği görülmektedir. Bu da UEDS ünitesinin birim hacim ve birim ağırlığa göre, enerji yoğunluğunun sabit olduğunu göstermektedir.

Aynı VEDS ve UEDS ünitelerinin enerji kapasitelerine göre maliyet karşılaştırmaları yapıldığında, VEDS’in UEDS’e göre 1/3-1/4 maliyette olduğu görülmektedir. Aynı zamanda VEDS’in çıkış gücü, sistemde kullanılan motor/generatör ünitesinin gücüne bağlı olarak artırılabilir. Ancak UEDS’in verebileceği maksimum güç teknik verilerinde belirtilmektedir. Sistemden, belirtilen bu değer üzerinde güç çekmek tehlikeli arz etmekte ve teknik olarak mümkün olmamaktadır.

İki sistem ağırlık olarak kıyaslandığında ise yüksek devirli bir VEDS’in UEDS’den 1/2 kadar daha hafif olabileceği görülmektedir. Ayrıca VEDS’te kullanılan rotor kompozit malzemelerden üretilirse (karbon elyaf, cam elyaf vb.) ağırlık daha da

aşağılara çekilebilmektedir. Hacim olarak değerlendirildiğinde ise yüksek devirli VEDS ünitesi UEDS'in 1/3-1/4 oranında yer kaplamaktadır.

VEDS ünitesinin devri 25000 – 30000 d/d bandının üzerine çıktığında UEDS'e göre daha yüksek güç ve enerji yoğunlukları elde edilebilmektedir. Ancak bu devir bandının aşağısında kalındığında UEDS'in enerji ve güç yoğunluğu VEDS'in önüne geçmektedir.

Üretim maliyeti olarak bakıldığında ise yüksek devirli VEDS ünitesi UEDS ünitesinden 1/4 - 1/8 oranından daha ucuza mal olabilmektedir. Ancak bu değer çelik rotorlu VEDS ünitesi için geçerlidir. Yüksek devirlerde daha çok karbon rotorlu sistemler tercih edildiğinden, VEDS üretim maliyetleri de yükselmektedir. Bu durumda bile VEDS ünitesi UEDS ünitesinden 1/3-1/4 oranında daha uygun fiyatlara mal olmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında önerilen ve enerji aktarımını M/G ünitesi yardımıyla elektriksel olarak gerçekleştiren VEDS ile enerji aktarımını CVT şanzıman kullanarak mekanik olarak gerçekleştiren VEDS teknolojilerinin karşılaştırmalı analizi Tablo 5.2'de verilmektedir.

Tablo 5.2. Farklı tipte VEDS ünitelerinin karşılaştırması

Sistemde Yer Alan Bileşenler	CVT VEDS	M/G VEDS
Rotor Malzemesi	Karbon Kevlar	Yüksek Mukavemetli Çelik
Rotor Maliyeti	35 \$/kg	1 \$/kg
Rotor Ağırlığı	5 kg	10 kg
CVT	1000 \$	-
M/G	-	500 \$
Hacim	70 lt (CVT ile)	10 lt (M/G ile)
Toplam Ağırlık	25 kg	20 kg

CVT'li VEDS'de kullanılan karbon kevlar rotor malzeme, özellikleri dolayısıyla çok daha yüksek hızlara çıkmaya olanak sağlamaktadır. Ancak karbon kevların çeliğe göre daha hafif olması depolanan enerji için olumsuzluk teşkil etmektedir. Bu duruma ilave olarak karbon kevlar malzeme çelik malzemeden 35 kat daha pahalıya mal olmaktadır. Bu durum maliyetlerin fazlasıyla önem arz ettiği otomotiv sektöründe büyük bir dezavantaj olmaktadır. Bununla birlikte karbon kevlar malzemenin işlenmesi, şekillendirilmesi ve balansının alınması da çeliğe göre daha

zor olmaktadır. Bu dezavantajlarının yanında hafif olması ve yüksek hızlara gösterdiği mukavemet karbon kevlar malzemenin önemli avantajlarındanır.

Bir diğer husus ise CVT'li VEDS'in M/G'li VEDS'e göre daha fazla yer kaplamasıdır. Bu durum sistemde yer alan CVT ünitesinden kaynaklanmaktadır. CVT hidrolik olarak kontrol edilen bir yapıdır. Yüksek tork değerlerinde kaydırma yapmadan, kayıpsız bir şekilde enerji iletimi yapabilecek CVT ünitesinin boyutları (enerji ve güç bakımından) eş kapasiteye sahip M/G ünitesine göre daha büyük olmaktadır. Özellikle otomotiv uygulamalarında araç içi hacim büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle büyük hacimli bir sistem kullanıma engel teşkil edecektir.

Toplam maliyetlere baktığımızda CVT'li VEDS'in M/G'li VEDS'e göre 2 – 3 kat daha yüksek maliyetli olduğu görülmektedir. Bu durumun en temel sebebi CVT ünitesinin maliyeti ve karbon kevlar rotor malzemesinin yüksek fiyatlı bir bileşen olmasıdır.

CVT, verimliliği % 50 – 90 arasında değişen bir teknolojidir. CVT'nin girişindeki devir sayısı ile çıkış devri arasındaki fark arttıkça dönüştürme oranı da artacağından, sistem verimi ciddi oranda azalmaktadır. Bir araç 100 km/h (60 mph) hız ile giderken tekerlek devri yaklaşık 850 d/d olmaktadır. Araçlarda kullanılan VEDS ünitelerinin devir sayıları 20000 – 50000 d/d arasında değişmektedir. 100 km/h (60 mph) hızla giden bir aracın frenleme yaparak enerjisini VEDS'e depolaması sırasında kullanılan CVT'nin çevirme oranı 23:1 ile 59:1 arasında değişmektedir. VEDS'e enerji depolanması durumunda, CVT devir yükseltici olarak görev yapmaktadır. Bu durumda sistemin atalet momentinden dolayı kayıplar daha da artmaktadır.

Önerilen sistemde ise enerji transferi mekanik CVT yerine elektriksel olarak sağlanmaktadır. EV veya HEV'in M/G ünitesi generatör olarak kullanıldığında, nominal devirde aracın DA bara gerilimini üretmektedir. VEDS ünitesinde yer alan M/G ise VEDS'in maksimum hızı için optimize edildiğinden her iki M/G ünitesi de yüksek verimle çalıştırılabilmektedir. Böylece sistemdeki CVT bileşeni ortadan kaldırılarak CVT kaynaklı mekanik kayıplar ortadan kaldırılmakta ve güvenilirlik artırılmaktadır.

Önerilen sistemin bir diğer önemli avantajı ise elektriksel iletim sayesinde VEDS ünitesinin aracın istenilen noktasına konumlandırılabilmesidir. Bu da tasarımda esneklik sağlamaktadır. Araç bünyesinde atıl konumda olan boşluklar, VEDS sisteminin yerleştirilmesi için kullanılabilir. Bununla birlikte önerilen VEDS ünitesi daha az parça barındırdığından hacimsel ve mali olarak da CVT'li VEDS'e göre avantajlı olmaktadır. Tablo 5.3 'de CVT VEDS, M/G VEDS ve UEDS üniteleri maliyet, hacim, ağırlık ve verim yönünden birim olarak karşılaştırılmaktadır. Tablo 5.3'de verilen birim cinsinden değerler, Tablo 5.1'deki en yüksek enerji ve güç yoğunluğu değerleri dikkate alınarak oluşturulmuştur. M/G VEDS ve CVT VEDS'in birim cinsinden karşılaştırılmasında kullanılan veriler ise Tablo 5.2'deki değerler kullanılarak oluşturulmaktadır.

Elde edilen sonuçlar EA ve HEA uygulamalarında, maliyetin önemli olduğu durumlarda M/G VEDS'in kullanılabileceğini ancak performans odaklı durumlarda UEDS ünitesinin kullanılması ile yüksek verim değerlerine ulaşılabileceğini göstermektedir.

Tablo 5.3. Enerji depolama teknolojilerinin birim cinsinden karşılaştırılması

Araç uygulaması için kriterler	CVT VEDS	M/G VEDS	UEDS
Maliyet	5 br	2 br	12 br
Hacim	7 br	1 br	4 br
Ağırlık	1,2 br	1 br	1,5 br
Verim	% 75	% 55	% 85
Enerji Yoğunluğu	1-3 br	1-2 br	2 br
Güç Yoğunluğu	2-4 br	1-2 br	2 br

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

EA ve HEA'lar sundukları verimli ve çevreci sürüş deneyimiyle günümüzde giderek yaygınlaşmaktadır. Bu araçlar ile ilgili geliştirme çalışmaları büyük bir hızla devam etmektedir. Hibrit ve elektrikli araçların baş etmesi gereken en büyük problem menzile sorundur. Uzun menzile söz konusu olduğunda elektrikli araçların aşması gereken batarya problemleri bulunmaktadır. Hibrit araçlar açısından değerlendirildiğinde ise, uzun menzilde bu araçlar hibrit olma özelliklerini yitirmektedirler. Bu araçların sahip oldukları bataryalar ancak şehir içi kullanım olarak adlandırılabilen kısa menzilde hibrit yapıya destek olabilmektedirler.

Tüm bunlar değerlendirildiğinde, araç menzilin artırılması için daha farklı teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır. Geri kazanımlı frenleme bu teknolojilerin başında gelmektedir. Geri kazanımlı frenleme teknolojisinin çeşitli uygulama tipleri mevcuttur. Geri kazanımlı frenleme enerjisini aracın yüksek gerilim bataryasına depolamak bunlardan en bilinenidir. Ancak bu uygulama bataryaların yapısı gereği verimsizdir. Frenleme enerjisini kısa süre içerisinde bataryalara depolamak bataryaların kimyasal reaksiyon neticesinde enerji depolamasından dolayı yalnızca düşük verim değerleriyle mümkün olmaktadır. Bu nedenle geri kazanımlı frenleme enerjisini depolamak üzere farklı teknolojiler geliştirilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında elektrikli ve hibrit elektrikli araçlarda geri kazanımlı frenleme enerjisinin bataryaya alternatif olabilecek UEDS ve VEDS teknolojilerine depolanması üzerinde çalışılmaktadır. UEDS ve VEDS yüksek güç yoğunlukları ile öne çıkmaktadırlar. Özellikle maliyet olarak sağladığı avantajlar göz önüne alınarak VEDS ünitesi üzerinde durulmuştur. Sistemde özgünlük olarak literatürdeki uygulamalardan farklı şekilde elektriksel enerji aktarımı sağlayan, farklı enerji depolama kapasitelerine, devir sayılarına ve rotor boyutlarına sahip VEDS ünitelerinin prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Mevcutta üzerinde çalışılan VEDS uygulamalarına bakıldığında, sistemin araca entegrasyonunun CVT kullanılarak yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmada ise mekanik CVT kullanan geleneksel VEDS

ünitelerine alternatif olarak volana direkt bağlı M/G ünitesi kullanılması ve elektriksel enerji aktarımı yapan bir sistem entegrasyonu önerilmektedir. Böylece hareketli parça sayısı azaltılmakta, sistem basitleşmekte ve maliyetler aşağı çekilmektedir. CVT'li VEDS enerji aktarımını mekanik olarak gerçekleştirdiğinden ünite aracın hareket organlarının yakınında konumlandırılmalıdır. Fakat M/G'li VEDS ünitesinde enerji aktarımı kablolar vasıtasıyla yapıldığından ünite araçta bulunan uygun bir kısma yerleştirilebilmektedir. Maliyet olarak bakıldığında ise CVT'li VEDS çok sayıda parça içerir ve kompleks bir yapıya sahiptir. Hidrolik olarak kontrol edilmektedir. Bu durum üretim maliyetini ciddi oranda artırmaktadır. Ancak M/G'li VEDS bir M/G ünitesi ve sürücünden oluşmaktadır. Bu nedenle maliyeti daha düşüktür ve kontrolü daha basittir.

Deneyisel ölçümler sonucunda üretilen küçük boyutlu VEDS ile 24000 d/d'ye, büyük boyutlu VEDS ile ise 13000 d/d değerine ulaşılmıştır. VEDS ünitesi ile yapılan deneyler sonucunda çift yönlü enerji akışı başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bir EA veya HEA'nın verimliliğini artırmada faydası olabilecek nitelikteki (boyuttaki) bir VEDS'in enerji depolama kapasitesi 10 Wh'in üzerinde olmalıdır. Bu değer 36 kW's değerine eşittir. Diğer bir değişle bu ünite ana tahrik motoruna ilave olarak 5 saniye süre ile 7,2 kW'lık bir güç desteği sağlayabilmektedir. 7,2 kW güç değeri küçük sınıf 2 kişilik bir elektrikli aracın 4 kW'lık motor gücünün 2 katına yakın bir değerdir. Bu veriler, prototiplerin 1/3 - 1/4 ölçekte üretilmelerine rağmen küçük sınıf EA ve HEA'larda etkin bir biçimde kullanılabileceğini göstermektedir.

Mekanik enerji aktarımı ile çalışan (CVT) VEDS'in maliyeti CVT ünitesinden dolayı önerilen M/G'li VEDS'e göre çok daha yüksektir. Ayrıca CVT sisteminin yüksek devirlerde sorunsuz çalışması için iyi bir şekilde balansının yapılması gerekmektedir. İlave olarak CVT sistemi hidrolik olarak kontrol edildiğinden, bu sistemin de ilave maliyetinin göz önünde bulundurulması ve güvenilirliğinin test edilmesi gerekmektedir. Halbuki önerilen VEDS ünitesinde volan ile M/G'nin doğrudan bağlı olması sistemin üretimi basitleşmektedir. Buna paralel olarak maliyet düşmekte, sistem güvenilirliği de artmaktadır.

VEDS ve UEDS üniteleri arasında farklı bakımlardan bağıntılar kurulabilmektedir. Özellikle maliyet bakımından UEDS'in VEDS'e göre 3 – 4 kat daha pahalı bir

teknoloji olduğu gör÷lmektedir. Bunun yanında UEDS'ler enerji yoğunlukları ve güç yoğunlukları sınırlı teknolojilerdir. Ancak VEDS'ler rotor ve M/G kısmında kullanılan malzemenin özelliğine göre aynı hacim ve ağırlık değerleri baz alındığında istenilen güç ve enerji yoğunluğu değerlerinde üretilebilmektedirler. Bu VEDS'in bir avantajıdır. Burada öne çıkan en önemli unsur VEDS'in dönüş hızı olmaktadır. VEDS yüksek hızlara çıkarıldığında UEDS'den daha efektif ve daha düşük maliyetli olmaktadır. Ancak VEDS yüksek hızlara çıkarılmazsa, UEDS daha yüksek güç yoğunluklarına daha küçük hacimler ile ulaşabilmektedir.

UEDS'in maliyetinin VEDS'den daha yüksek olmasına karşın hareketli bir parçasının olmaması, güvenlik ve uygulanabilirlik bakımından avantajlar getirmektedir. Ayrıca UEDS yüksek güç yoğunluğuna sahip olsa da, düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Ancak VEDS ile hem yüksek güç hem de yüksek enerji yoğunluklarına ulaşabilmek mümkündür.

Elde edilen veriler, VEDS'in elektrikli ve hibrit elektrikli araçlarda, aracın kinetik enerjisini depolamak üzere kullanılabileceğini göstermektedir. CVT VEDS, M/G VEDS ve UEDS teknolojileri maliyet, hacim, ağırlık, verim, enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu bakımından karşılaştırıldıklarında en düşük maliyete sahip ünitenin M/G VEDS olduğu gör÷lmektedir. Ardından CVT VEDS ve UEDS teknolojileri gelmektedir. M/G VEDS CVT VEDS'e göre yaklaşık yarı maliyettedir. UEDS ise CVT VEDS'den ortalama iki kat daha pahalı bir teknoloji olmaktadır.

Hacim ve ağırlık olarak değerlendirildiğinde ise, bir araç için gerekli enerjiyi M/G VEDS 10 lt hacim ve 20 kg ağırlık ile, CVT VEDS 70 lt hacim 25 kg ağırlık ile UEDS ise 40 lt hacim 30 kg ağırlık ile sağlayabilmektedir.

Enerji ve güç yoğunlukları bakımından değerlendirildiğinde ise tüm sistemler kısa süreli yüksek güç değerlerini sağlama özelliğiyle ön plana çıkmaktadır. Prototip üretimi yapılan sistemler nominalde 4,8 kW ve 7,2 kW güç değerlerine sahip olsalar da anlık olarak 12 kW güç çıkışı sağlayabilmektedirler. Benzer şekilde ultra-kapasitör üniteleri de nominalde 3000 W/kg olan güç yoğunluk değerlerini kısa süreliğine 12000 W/kg değerine çıkarabilmektedir. Bu özellikleriyle UEDS ve VEDS, kısa süreli ve yüksek enerji taleplerinin karşılanması için önerilmektedir.

Verimlilik bakımından değerlendirildiğinde ise en avantajlı depolama ünitesi UEDS olmaktadır. Enerjiyi herhangi bir mekanik parça olmadan veya kimyasal bir reaksiyona ihtiyaç duymadan statik olarak depoladığı için, UEDS'in komponent verimi % 95 seviyesine, sistem verimi ise % 85 değerine çıkmaktadır. CVT VEDS ise yüksek hassasiyeti ile sistem verimi olarak % 75'e ulaşabilmektedir. Prototiplenen M/G VEDS ünitesi ise daha uygun fiyatlı malzemeler ile % 55 sistem verimine ulaşabilmektedir.

Sonuç olarak UEDS ve VEDS teknolojileri kullanılacakları yere ve sistem parametrelerine göre farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar için düşünüldüğünde, VEDS düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir depolama teknolojisi olarak öne çıkmaktadır. Gelecekte hibrit ve elektrikli araçlarda VEDS teknolojisinin daha fazla kullanılabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Erhan K., Aktas A., Özdemir E., Analysis of a Hybrid Energy Storage System Composed from Battery and Ultra-capacitor, *7th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, Uşak, Türkiye, 18-20 Haziran 2014.
- [2] Erhan K., Varol G., Özdemir E., Regenerative Braking System Improvement for Electric Vehicle, *3rd EJONS Conference*, Mardin, Tükiye, 21-22 Nisan 2018.
- [3] Simon P., Gogotsi Y., Dunn B., Where Do Batteries End and Supercapacitors Begin?, *Science Magazine*, 2014, **343**, 1210-1211.
- [4] Yoong M.K., Gan Y.H., Gan G.D., Leong C.K., Phuan Z.Y., Cheah B.K., Chew K.W., Studies of Regenerative Braking in Electric Vehicle, *Proceedings of the 2010 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology*, Kuala Lumpur, Malaysia, 20-21 Kasım 2010.
- [5] Ostadi A., Kazerani M., A Comparative Analysis of Optimal Sizing of Battery-Only, Ultracapacitor-Only, and Battery–Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for a City Bus, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, **60**(10), 4449-4460.
- [6] Zou Z., Cao J., Cao B., Chen W., Evaluation Strategy of Regenerative Braking Energy for Supercapacitor Vehicle, *ISA Transactions*, 2015, **55**, 234-240.
- [7] Esfahanian M., Safaei A., Nehzati H., Esfahanian V., Tehrani M. M., Matlab Based Modeling, Simulation and Design Package for Electric, Hydraulic and Flywheel Hybrid Powertrains of a City Bus, *International Journal of Automotive Technology*, 2014, **15**(6), 1001-1013.
- [8] Hannan M. A., Hoque M. M., Mohamed A., Ayob A., Review of Energy Storage Systems for Electric Vehicle Applications: Issues and Challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **69**, 771-789.
- [9] Buchroithner A., Brandstatter A., Recheis M., Mobile Flywheel Energy Storage Systems: Determining Rolling Element Bearing Loads to Expand Possibilities, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2017, **12**(3), 83-94.
- [10] Brockbank, C. and Greenwood, C., Fuel Economy Benefits of a Flywheel & CVT Based Mechanical Hybrid for City Bus and Commercial Vehicle Applications, *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 2010, **2**(2), 115-122.

- [11] Brockbank C., Application of a Variable Drive to Supercharger & Turbo Compounder Applications, *SAE Technical Paper*, 2009-01-1465, 2009
- [12] Cross D., Brockbank C., Mechanical Hybrid System Comprising a Flywheel and CVT for Motorsport and Mainstream Automotive Applications, *SAE Technical Paper*, 2009-01-1312, 2009.
- [13] <http://www.torotrak.com> (Ziyaret Tarihi: 22 Mayıs 2015).
- [14] Qian X., Application Research of Flywheel Battery in the Wind and Solar Complementary Power Generation, *International Conference on Computer Application and System Modeling*, Taiyuan, China, 2010.
- [15] Cao Q., Song Y. D., Guerrero J. M., Tian S., Coordinated Control for Flywheel Energy Storage Matrix Systems for Wind Farm Based on Charging/Discharging Ratio Consensus Algorithms, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(3), 1259-1267.
- [16] Ghosh S., Kamalasadan S., An Energy Function-Based Optimal Control Strategy for Output Stabilization of Integrated DFIG-Flywheel Energy Storage System, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(4), 1922-1931.
- [17] Sebastian R., Alzola R. P., Qesada J., Simulation of a Wind Diesel Power System with Flywheel Energy Storage, *Electric Power Systems Research*, 2011, 81(2), 677-686.
- [18] Lui H., Jaing J., Flywheel Energy Storage - an Upswing Technology for Energy Sustainability, *Energy and Buildings*, 2007, 39(5), 599-604.
- [19] Siostrzonek T., Piróg S., Baszyński M., The High-speed Flywheel Energy Storage System, *Energy and Storage*, IntechOpen, 37-68, 2010.
- [20] Kato S., Tsujino T., Cheng M., Sumitani H., Shimada R., Inverter-Less Flywheel Applications for Voltage Sags and Blackouts Compensation, *Power Electronics and Applications Conference*, Barcelona, Spain, 8-10 Eylül 2009.
- [21] Arghandeh R., Pipattanasomporn M., Rahman S., Flywheel Energy Storage Systems for Ride-through Applications in a Facility Microgrid, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(4), 1955-1962.
- [22] Arani A. A. K., Karami H., Gharehpetian G. B., Hejazi M. S. A., Review of Flywheel Energy Storage Systems Structures and Applications in Power Systems and Microgrids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 69, 9-18.
- [23] Zakeri B., Syri S., Electrical Energy Storage Systems: A Comparative Life Cycle Cost Analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42, 569-596.

- [24] Coelho V. N., Coelho I. M., Coelho B. N., Cohen M. W., Reis A. J. R., Silva S. M., Souza M. J. F., Fleming P. J., Guimaraes F. G., Multi-objective Energy Storage Power Dispatching Using Plug- In Vehicles in a Smart-Microgrid, *Renewable Energy*, 2016, **89**, 730-742.
- [25] Guney M. Ş., Tepe Y., Classification and Assessment of Energy Storage Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **75**, 1187-1197.
- [26] <http://beaconpower.com/> (Ziyaret Tarihi: 24 Nisan 2018).
- [27] Bourzac K., Powering Change, White M., *Nature*, 545, Macmillan Publishers Limited, Part of Springer Nature, San Francisco, California, 13-14, 2017.
- [28] Sun B., Dragicevic T., Freijedo F. D., Vasquez J. C., Guerrero J. M., A Control Algorithm for Electric Vehicle Fast Charging Stations Equipped With Flywheel Energy Storage Systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, **31**(9), 6674-6685.
- [29] Hawkins L., McMullen P., Vuong V., Development and Testing of The Backup Bearing System for an AMB Energy Storage Flywheel, *Turbo Expo 2007: Power for Land , Sea and Air Conference*, Montreal, Canada, 14-17 May 2007.
- [30] Hawkins L., McMullen P., An AMB Energy Storage Flywheel for Industrial Applications, <http://www.calnetix.com/resources> (Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2016).
- [31] Miyazaki Y., Mizuno K., Yamashita T., Ogata M., Hasegawa H., Nagashima K., Mukoyama S., Matsuoka T., Nakao K., Horiuchi S., Maeda T., Shimizu H., Development of Superconducting Magnetic Bearing for Flywheel Energy Storage System, *Cryogenics*, 2016, **80**, 234-237.
- [32] Hawkins L., McMullen P., Larssonneur R., Development of an AMB Energy Storage Flywheel for Commercial Application, <http://www.calnetix.com/resources> (Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2016).
- [33] Mousavi S. M., Faraji F., Majazi A., Haddad K. A., A Comprehensive Review of Flywheel Energy Storage System Technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **67**, 477-490.
- [34] Cross D., Hilton J., High Speed Flywheel Based Hybrid Systems for Low Carbon Vehicles, *Hybrid and Eco-Friendly Vehicle Conference*, Coventry, United Kingdom, 8-9 December 2008.
- [35] Erhan K., Ayaz M., Özdemir E., Application of Flywheel and Ultra-capacitor Energy Storage Systems in Hybrid and Electric Vehicles in Regenerative Braking Mode, 8th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, Türkiye, 19-22 Ekim 2017.
- [36] Rupp A., Baier H., Mertiny P., Secanell M., Analysis of a Flywheel Energy Storage System for Light Rail Transit, *Energy*, 2016, **107**, 625-638.

- [37] Wicki S., Hansen E. G., Clean Energy Storage Technology in the Making: An Innovation Systems Perspective on Flywheel Energy Storage, *Journal of Cleaner Production*, 2017, **162**, 1118-1134.
- [38] Chemali E., Preindl M., Malysz P., Emadi A., Electrochemical and Electrostatic Energy Storage and Management Systems for Electric Drive Vehicles: State-of-the-Art Review and Future Trends, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2016, **4**(3), 1117-1134.
- [39] Qian Y., Sun J., Yuan Z., Jia D., Li P., Zhang Y., Flywheel Energy Storage UPS Power Supply Vehicle and Its Application in Beijing Security of Power Supply, *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference*, Xi'an, China, 25-28 Ekim 2016.
- [40] Nagorny A. S., Dravid N. V., Jansen R. H., Kenny B. H., Design Aspects of a High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor/Generator for Flywheel Applications, *NASA*, TM-2005-213651, 1-7, 2005.
- [41] Aydın M., Aydemir M. T., A Control Algorithm for a Simple Flywheel Energy Storage System to be Used in Space Applications, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2013, **21**, 1328-1339.
- [42] Aydın K., Aydemir M. T., Sizing Design and Implementation of a Flywheel Energy Storage System for Space Applications, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2016, **24**, 793-806.
- [43] Bender D., Flywheels, *Sandia National Laboratories*, SAND2015-3976, 1-30, 2015.
- [44] Erhan K., Ayaz M., Özdemir E., Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Güç Kalitesi Üzerine Etkileri, Akıllı Şebekeler ve Türkiye Elektrik Şebekesinin Geleceği Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 26-27 Nisan 2013.
- [45] Segundo H. B. S., Energy Storage Systems Integration PV Power Plants, PhD Thesis, University of Polytechnic Catalunya, Department of Electrical Engineering, Spain, 2011.
- [46] Akhil A., Huff G., Currier B., Kaun B. C., Rastler M., Chen S. B., Cotter A. L., Bradshaw D. T., Gauntlett W. D., DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA, *SANDIA Report*, SANDIA2013-5131, 1-150, 2013.
- [47] Elzinga D., Heinen S., Munuera L., Remme U., Energy Storage Technology Roadmap, *International Energy Agency*, IEA-2014, 1-46, 2014.
- [48] Genta G., *Kinetic Energy Storage*, 1, Butterworths, Cambridge, Great Britain, 1960.
- [49] Ahn K., Rakha H., Trani A., Aerde M. V., Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels, *Journal of Transportation Engineering*, 2002, **128**(2), 182-190.

- [50] Andre M., The ARTEMIS European Driving Cycles for Measuring Car Pollutant Emissions, *Journal of the Total Environment*, 2004, **334**(335), 73-84.
- [51] Özoğuz B., Estimation of Turkish Road Transport Emissions and Emission Reduction Scenarios, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2008, **26**(3), 198-205.
- [52] Ntziachristos L., Samaras Z., Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport, *European Environment Agency Technical Report*, No: 49, 1-86, 2000.
- [53] https://hobbyking.com/en_us/turnigy-sk3-90mm-8s-3000w-fandrive-brushless-edf-motor-3968-1500kv.html?store=en_us (Ziyaret Tarihi: 20 Nisan 2018).
- [54] https://hobbyking.com/en_us/turnigy-aquastar-120a-water-cooled-esc.html, (Ziyaret Tarihi: 20 Nisan 2018).
- [55] <http://www.skf.com/> (Ziyaret Tarihi: 20 Nisan 2018).
- [56] <https://www.kdedirect.com/products/kde700xf-295-g3> (Ziyaret Tarihi: 12 Aralık 2016).
- [57] http://www.scorpionsystem.com/catalog/helicopter/motors_4/hk-45_1/HK4530_540/ (Ziyaret Tarihi: 12 Aralık 2016).
- [58] <http://www.rchobby-avenues.co.uk/Hifei-KingKongIII-Pro-200A-HV> (Ziyaret Tarihi: 12 Aralık 2016).
- [59] http://www.eagletreesystems.com/index.php?route=product/product&product_id=54 (Ziyaret Tarihi: 12 Aralık 2016).
- [60] Chroma A. I., Programmable DC Electronic Load 6310A Series Operation & Programming Manual, Chroma Ate Inc., 6310A, 1-7, 2013.
- [61] Aktaş A., Erhan K., Özdemir Ş., Özdemir E., Experimental Investigation of a New Smart Energy Management algorithm for a Hybrid Energy Storage System in Smart Gridapplications, *Electric Power Systems Research*, 2017, **144**, 185-196.
- [62] Ahmadi S., Bathaee S. M. T., Hosseinpour A. H., Improving Fuel Economy and Performance of a Fuel-Cell Hybrid Electric Vehicle (Fuel-Cell, Battery, and Ultra-Capacitor) Using Optimized Energy Management Strategy, *Energy Conversion and Management*, 2018, **160**, 74-84.
- [63] Khaligh A., Li Z., Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, **59**(6), 2806-2814.

- [64] Zhang S., Xiong R., Sun F., Model Predictive Control for Power Management in a Plug-in Hybrid Electric Vehicle with a Hybrid Energy Storage System, *Applied Energy*, 2017, **185**, 1654-1662.
- [65] Doucette R. T., McCulloch M. D., A Comparison of High-Speed Flywheels, Batteries, and Ultracapacitors on the Bases of Cost and Fuel Economy as the Energy Storage System in a Fuel Cell Based Hybrid Electric Vehicle, *Journal of Power Sources*, 2011, **196**, 1163-1170.
- [66] Dixon J., Nakashima I., Arcos E. F., Ortuzar M., Electric Vehicle Using a Combination of Ultracapacitors and ZEBRA Battery, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, **57**(3), 943-949.
- [67] http://www.maxwell.com/images/documents/160vmodule_ds_3000246-5.pdf (Ziyaret tarihi: 08 Ağustos 2016).
- [68] Chroma A. I., Programmable DC Power Supply (with Solar Array Simulation) 62000H Series Operation & Programming Manual, Chroma Ate Inc., 62000H, 1-10, 2013.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] Aktaş A., **Erhan K.**, Özdemir Ş., Özdemir E., Experimental Investigation of a New Smart Energy Management Algorithm for a Hybrid Energy Storage System in Smart Grid Applications, *Electric Power System Research*, 2017, **144**, 185-196.
- [2] Özdemir E., Özdemir Ş., **Erhan K.**, Aktaş A., Akıllı Şebekelerde Enerji Depolama Uygulamalarının Önündeki Fırsatlar ve Karşılaşılan Zorluklar, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2017, **32(2)**, 499-506.
- [3] **Erhan K.**, Ayaz M., İçer Y., Conceptual Design of a Smart Parking Lot System for Electric and Hybrid Electric Vehicles, *Balkan Journal Of Electrical & Computer Engineering*, 2018, Special Issue, 27-32.
- [4] Ayaz M., **Erhan K.**, Aktaş A., Özdemir E., Salihoğlu H., Araç Yakıt Tankı Montajı için Otomasyon Sistem Tasarımı ve Uygulaması, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2015, **3**, 357-366.
- [5] Ayaz M., **Erhan K.**, Taşdemirci E., Karaçor M., Bir Katı Atık Bertaraf Tesisi için Otomasyon Sistem Tasarımı ve Uygulaması, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2014, **2**, 178-190.
- [6] Ayaz M., **Erhan K.**, Özdemir E., Çilliş Y., Animasyon Tabanlı PLC ve Operatör Panel Eğitim Seti, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2014, **30**, 156-161.
- [7] Ayaz M., **Erhan K.**, Özdemir E., Otomasyon Sistemleri Eğitiminde Animasyon Tabanlı Uygulamaların Yeri ve Önemi, *Otomasyon Dergisi*, 2014, **262**, 96-104.
- [8] **Erhan K.**, Aktas A., Ozdemir E., Analysis of a Hybrid Energy Storage System Composed from Battery and Ultra-capacitor, *7th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, Usak, Turkey, 18-20 June 2014.
- [9] **Erhan K.**, Ozdemir E., Aktas A., Design and Analysis of Ultra-Capacitor Regenerative Braking Energy Storage System for Hybrid and Electrical Vehicles, *8th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, Afyonkarahisar, Turkey, 11-13 May 2016.
- [10] **Erhan K.**, Ozdemir E., Aktas A., Design and Analysis of Flywheel Regenerative Braking Energy Storage System for Hybrid and Electrical Vehicles, *8th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, Afyonkarahisar, Turkey, 11-13 May 2016.

- [11] Aktas A., Ozdemir E., **Erhan K.**, Ozdemir S., Design and Analysis of Hybrid Energy Storage System Supplied from Photovoltaic Power Source, *8th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, Afyonkarahisar, Turkey, 11-13 May 2016.
- [12] Aktas A., **Erhan K.**, Ozdemir E., Ozdemir S., Development of a Hybrid Energy Storage System Composed Battery and Ultracapacitor Supplied from Photovoltaic Power Source for 3-phase 4-wire Smart Micro Grid Structure, *SolarTR 2014*, Izmir, Turkey, 19-21 November 2014.
- [13] Koç İ. M., **Erhan K.**, Aktaş A., Özdemir E., Özdemir Ş., Akıllı Şebeke Standartlarında Enerji Depolama Uygulamalarının İncelenmesi, 6. *Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi*, Sakarya, Türkiye, 04-06 Haziran 2015.
- [14] Erkurt S., Özdemir E., Koç İ. M., Aktaş A., **Erhan K.**, Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Elektrik Üretim Sistemlerinin Güç Kalitesine Etkileri ve Performans Analizi, 6. *Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi*, Sakarya, Türkiye, 04-06 Haziran 2015.
- [15] Aktaş A., **Erhan K.**, Koç İ. M., Özdemir E., Özdemir Ş., Uçar M., Akıllı Şebekelerde Hibrit Enerji Depolama Çözümleri, *Enerjide AR-GE Çalıştayı*, İstanbul, Türkiye, 30 Kasım 2015.
- [16] Aktaş A., Özdemir E., Özdemir Ş., Uçar M., Koç İ. M., **Erhan K.**, Fotovoltaik Kaynaktan Beslenen 3-Fazlı 4-Telli Akıllı Mikro Şebeke Yapısının Batarya ve Ultra-Kapasitörden Oluşan Hibrit Enerji Depolama Sistemi ile Geliştirilmesi, *Doğu Marmara Genel Sanayi ve Teknoloji Fuarı SANTEK'16*, Kocaeli, Türkiye, 2016.
- [17] Özdemir E., Özdemir Ş., Aktaş A., Koç İ. M., **Erhan K.**, Fotovoltaik Kaynaktan Beslenen 3-Fazlı 4-Telli Akıllı Mikro Şebeke Yapısının Batarya ve Ultra-Kapasitörden Oluşan Hibrit Enerji Depolama Sistemi ile Geliştirilmesi, *Doğu Marmara Genel Sanayi ve Teknoloji Fuarı SANTEK'14*, Kocaeli, Türkiye, 25-28 Eylül 2014.
- [18] Ozdemir E., Ozdemir S., **Erhan K.**, Aktas A., Energy Storage Technologies, Opportunities and Challenges in Smart Grids, *International Smart Grid Workshop and Certificate Program*, Istanbul, Turkey, 21-25 March 2016.
- [19] Ozdemir E., Koc I. M., **Erhan K.**, Aktas A., Energy Storage Technologies, Opportunities and Challenges in Smart Grids, *Smart Grids Workshop*, Istanbul, Turkey, 22-23 January 2015.
- [20] **Erhan K.**, Ayaz M., Özdemir E., Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Güç Kalitesi Üzerine Etkileri, *Akıllı Şebekeler ve Türkiye Elektrik Şebekesinin Geleceği Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 26-27 Nisan 2013.
- [21] **Erhan K.**, Usta Ö., Yumak K., Borbuev A., Gerilim Çentiği Tesbiti için Yeni Bir Algoritma Tasarımı, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 29 Kasım-1 Aralık 2012.

- [22] Aktaş A., **Erhan K.**, Özdemir E., Özdemir Ş., A Case Study for Hybrid Energy Storage System Supplied from Grid Connected Photovoltaic Power, *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress*, Adana, Turkey, 26-28 October, 2016.
- [23] **Erhan K.**, Ayaz M., Özdemir E., Design Consideration on Flywheel Energy Storage System for New Generation Elevators, *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress*, Adana, Turkey, 26-28 October, 2016.
- [24] Ayaz M., **Erhan K.**, Özdemir E., Harmonic Effects of Driver Unit on Gearless Elevator Systems and Power Grid, *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress*, Adana, Turkey, 26-28 October, 2016.
- [25] **Erhan K.**, Ayaz M., Taşıtlar İçin Su Sızdırmazlık Testi ve Otomasyon Sistem Tasarımı, *2. Uluslararası Enerji ve Mühendislik Konferansı*, Gaziantep, Türkiye, 12-13 Ekim 2017.
- [26] Ayaz M., **Erhan K.**, Kundakçı İ. M., Ertunç H. M., Automation System Design for Fault Detection in Street Lighting, *International Conference on Technology, Engineering and Science*, Antalya, Turkey, 26-29 October 2017.
- [27] **Erhan K.**, Ayaz M., Özdemir E., Application of Flywheel and Ultra-capacitor Energy Storage Systems in Hybrid and Electric Vehicles in Regenerative Braking Mode, *8th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, Turkey, 19-22 October 2017
- [28] Erhan I. T., **Erhan K.**, Uğur M., The Importance of Lighting Automation Systems in Intelligent Buildings: A Case Study, *2nd International Conference on Computer Science, Engineering and Applied Science*, Paris, France, 28-29 November 2017.
- [29] **Erhan K.**, Ayaz M., Aktaş A., Özdemir E., An Energy Storage System Including Ultra-capacitor Unit for Extended Driving Range of EVs, *2nd International Conference on Computer Science, Engineering and Applied Science*, Paris, France, 28-29 November 2017.
- [30] **Erhan K.**, Varol G., Özdemir E., Regenerative Braking System Improvement for Electric Vehicle, *3rd EJONS Conference*, Mardin, Türkiye, 21-22 Nisan 2018.
- [31] Özdemir E., **Erhan K.**, Altunkaya M., Development of Personal Driving Mode Algorithm for Hybrid Electric Vehicles to Increase Efficiency, *3rd EJONS Conference*, Mardin, Türkiye, 21-22 Nisan 2018.
- [32] Yücel U., Ayaz M., **Erhan K.**, Comparative Study on Energy Efficiency in Lighting Control Systems for Indoors, *3rd EJONS Conference*, Mardin, Türkiye, 21-22 Nisan 2018.

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Ankara’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara’da tamamladı. 2005 yılında girdiği Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden 2010 yılında mezun oldu. 2010-2013 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Eğitimini tamamladı. Aynı dönemde İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak görev aldı. 2010-2012 yılları arasında TÜBİTAK’ın Yüksek Lisans bursiyeri oldu. 2013-2015 yılları arasında 113E143 no’lu TÜBİTAK 1001 araştırma projesinde bursiyer olarak görev aldı. 2016-2018 yılları arasında ASELSAN’ın Türk Akademisyenler için Yurtiçi Doktora bursiyeri oldu. 2013-2018 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Eğitimi aldı. 2013 yılından itibaren Kocaeli Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği’nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.