T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İÇTEN YANMALI MOTORLU ARAÇLARDA KULLANILMAK ÜZERE ÖZELLEŞTİRİLMİŞ SÜPERKAPASİTÖR BESLEMELİ GERİLİM DÜZENLEYİCİ FONKSİYONA SAHİP BİR YEDEK GÜÇ SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet YILDIZ

Enstitü Anabilim Dalı	**:**	**ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı	**:**	**Doç. Dr. Metin VARAN**

Şubat 2021

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İÇTEN YANMALI MOTORLU ARAÇLARDA KULLANILMAK ÜZERE ÖZELLEŞTİRİLMİŞ SÜPERKAPASİTÖR BESLEMELİ GERİLİM DÜZENLEYİCİ FONKSİYONA SAHİP BİR YEDEK GÜÇ SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet YILDIZ

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 05/02/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Prof.Dr. Ali ÖZTÜRK	BAŞARILI
Üye: Doç.Dr. Metin VARAN	BAŞARILI
Üye: Doç.Dr. Akif AKGÜL	BAŞARILI

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ahmet YILDIZ

22/12/2020

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Metin VARAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları, bilgi ve birikim konusunda yardımlarını ve anlayışlarını esirgemeyen Nero Endüstri Savunma Sanayi A.Ş firmasının Yönetim Kurulu Başkanı Sn. Alican ÖKÇÜN'e ve AR-GE ekibine teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

BEYAN ..... **ii**
TEŞEKKÜR ..... **i**
İÇİNDEKİLER ..... **ii**
KISALTMALAR ..... **v**
SİMGELER ..... **vii**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **x**
ÖZET ..... **xii**
SUMMARY ..... **xiii**

BÖLÜM 1.
GİRİŞ **1**
1.1. Tezin Amacı 1
1.2. Literatür Araştırması 2

BÖLÜM 2.
SÜPERKAPASİTÖRLERİN ÖZELLİKLERİ, PERFORMANSI VE TASARIM HUSUSLARI **5**
2.1. Giriş 5
2.2. Kapasitif Enerji Depolama Yöntemi 5
2.3. Süperkapasitörler ve İç Yapıları 11
2.3.1. Elektrik Çift Katmanlı (EDL) Kapasitör Yapı 12
2.3.2. Süperkapasitörler 14
2.3.3. Süperkapasitörlerin İç Yapısı 15
2.4. Süperkapasitörlerin Temel Elektriksel Özellikleri 17
2.5. Süperkapasitörlerin Tasarım Kriterleri 19
2.5.1. Gerilim Değerlendirmesi ve Güç Gereksinimine Dayalı Kriterler 19

2.5.2. Termal Kriterler 26
2.5.3. Döngü Kriterleri 27
2.6. Süperkapasitörlerin Diğer Enerji Depolama Cihazları ile Karşılaştırılması ... 27
2.6.1. Enerji ve Güç Yoğunluğu 27
2.6.2. Şarj ve Deşarj Süresi 28
2.6.3. Döngü Ömrü 28
2.6.4. Maliyet 29
2.7. Süperkapasitörlerin Tipik Uygulamaları 29
2.7.1. Darbe Gücü Uygulamaları 30
2.7.2. Köprü Güç Uygulamaları 31
2.7.3. Güç Kalitesi Uygulamaları 33
2.7.4. Ana Güç ve Bellek Yedekleme Uygulamaları 34

BÖLÜM 3.
FONKSİYONEL BİRİMLER 35
3.1. Ana Kontrol Birimi 35
3.2. Koruma Birimi 35
3.2.1. MIL-STD-1275 35
3.2.2. MIL-STD-461 36
3.3. Ölçüm Birimi 37
3.3.1. Gerilim Değeri Ölçümü - ADC 37
3.3.2. Akım Değeri Ölçümü – Hall-Efekt Sensör 38
3.4. Güç Birimi 39
3.5. Şarj ve Deşarj Birimi (Yük ile Birlikte) 40
3.5.1. Sabit Gerilimde Şarj Etme 40
3.5.2. Sabit Akımda Şarj Etme 41
3.5.3. Sabit Gerilim – Sabit Akımda Şarj Etme 42
3.6. Gömülü Yazılım ve Donanım Geliştirilmesi 42
3.6.1. Gömülü Yazılım – CodeWarrior 42
3.6.2. Gerçek Zamanlı Hata Ayıklama - FreeMASTER 43
3.6.3. Gömülü Donanım 44

BÖLÜM 4.
SÜPER KAPASİTÖRLER İLE ÖZELLEŞTİRİLMİŞ YEDEK GÜÇ ÜNİTESİ VE KORUMA CİHAZI TASARIMI 46
4.1. Genel Sistem Tasarımı 46
4.2. Koruma Fonksiyonu 49
4.2.1. Gereksinimler 49
4.3. Güç Devrelerinin Tasarımı ve Simülasyonları 53
4.3.1. Ters Gerilim Koruma Devresi 53
4.3.2. Ani Gerilim Sıçraması ve Geçici Yüksek Gerilim Koruma Devresi 55
4.3.3. Elektromanyetik Girişim Koruma Devresi 58
4.3.4. MOSFET Sürücü Devresi 59
4.4. Fonksiyonel Devrelerin Tasarımı ve Simülasyonları 61
4.4.1. Gerilim Ölçüm Devresi 61
4.4.2. Akım Ölçüm Devresi 63
4.4.3. Akım Koruma Devresi 65
4.4.4. Süper Kapasitör Şarj Dengeleme Devresi 68
4.4.5. Sayısal Sinyal Okuma Devresi 71
4.5. Fonksiyonel Test Çıktıları 72

BÖLÜM 5.
SONUÇ VE ÖNERİLER 78
5.1. Sonuçlar ve Performans 78
5.2. Sistemin Oluşturduğu Dezavantajlar 79
5.3. Geliştirilecekler 79
5.3.1. Araçlarda Haberleşme – J1939 79
5.3.2. Masaüstü Yazılımı 80

KAYNAKLAR 82
EKLER 86
ÖZGEÇMİŞ 94

KISALTMALAR

A	: Amper
AC	: Alternatif Akım
ADC	: Analogdan Dijitale Dönüştürücüler
AMR	: Otomatik Sayaç Okuma
CAN	: Denetleyici Alan Ağı
CAN-FD	: Denetleyici Alanı Ağı Esnek Veri Hızı
DC	: Doğru Akım
EDL	: Elektrikli Çift Katman
EDLC	: Elektrikli Çift Katmanlı Kapasitörler
EMC	: Elektromanyetik Uyumluluk
EMI	: Elektromanyetik Girişim
EPR	: Eşdeğer Paralel Direnci
ESR	: Eşdeğer Seri Direnç
EUT	: Test Halindeki Ekipman
GL	: Gouy Katmanı
HL	: Helmholtz Katmanı
HTML	: Hiper Metin İşaretleme Dili
ICE	: İçten Yanmalı Motor
IDE	: Tümleşik Geliştirme Ortamı
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı
LISN	: Hat Empedansı Stabilizasyon Ağı
MCU	: Mikrodenetleyici Birimi
MOSFET	: Metal-oksit Yarı İletkenli Alan Etki Transistörü
NPN	: Negatif-Pozitif-Negatif
OEM	: Orijinal Ekipman Üreticisi
OSI	: Açık Sistem Ara Bağlantısı
PCB	: Baskılı Devre Kartı
PGN	: Parametre Grup Numarası

PNP	: Pozitif-Negatif-Pozitif
RC	: Uzaktan Kumanda
SAE	: Otomotiv Mühendisleri Topluluğu
SCL	: Uzay Yük Katmanı
SPN	: Şüpheli Parametre Numarası
UPS	: Kesintisiz Güç Kaynakları
V	: Volt
VDC	: Doğru Akım Gerilimi
YSİB	: Yangın Söndürme İnfilak Bastırma

SİMGELER

Q : Net Elektrik Yükü
V : Elektriksel Potansiyeli
C : Kapasite
A : Yüzey Alanı
Ah : Amper Saat
d : Uzunluk
ε : Geçirgenlik
D : Yük Yoğunluğu
E : Elektrik Alan Büyüklüğü
ΔE : Enerji Değişimi
V_{rated} : Kapasitörün Gerilim Derecesi
V_{bd} : Kırılma Gerilimi İfadesi
E_{ds} : Dielektrik Gerilmesi
Vol : Hacim
m : Kütle
R : Direnç
P : Güç
η : Deşarj Verimliliği
μf : Mikro Farat
mF : Mili Farat
μs : Mikro Saniye
ms : Mili Saniye
$I_{leakage}$: Kaçak Akım Parametresi
kJ : Kilo Joule
kW : Kilo Watt
kg : Kilogram
mA : Mili Amper
mΩ : Mili Ohm

ΔT : Sıcaklık Değişimi

R_{th} : Termal Direnç

Wh : Watt Saat

Hz : Hertz

Ω : Ohm

µH : Mikro Henry

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 Bazı Süperkapasitör üreticilerinin ürün bilgileri 14
Tablo 2.2 Matrisle oluşturulan süperkapasitör modüllerinin özellikleri 20
Tablo 2.3 Bazı süperkapasitör ürünlerinin çalıştırma ve saklama sıcaklık aralığı..... 26
Tablo 2.4 Süperkapasitörlerin diğer enerji depolama cihazlarıyla karşılaştırılması .. 27
Tablo 2.5 Farklı ticari enerji depolama cihazlarının cihaz maliyeti açısından karşılaştırılması.....29

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Bir Kapasitörün İç Yapısı.....6
Şekil 2.2. Deşarj Modundaki Bir Kapasitörün Elektriksel Eşdeğer Devresi.....9
Şekil 2.3. Deşarj Verimliliğine Göre Ortalama Yük Gücünün Değişimi.....11
Şekil 2.4. EDL Yapısı.....12
Şekil 2.5. EDL Yapısının Üç Katmanlı Modeli.....13
Şekil 2.6. Bir Süperkapasitörün İç Yapısı.....15
Şekil 2.7. Bir Süperkapasitörün Temel Elektriksel Eşdeğer Devresi.....17
Şekil 2.8. Bir Süperkapasitörün Ayrıntılı Elektriksel Eşdeğer Devresi.....18
Şekil 2.9. NxM Matrisinden Oluşan Süperkapasitör Modülünün Şematik Gösterimi.21
Şekil 2.10. Süperkapasitör Modülü Boyutlandırma Algoritmasının Akış Şeması.....22
Şekil 2.11. Gerilim Dengeleme Yapılarının Şematik Gösterimleri.....24
Şekil 2.12. Anahtarlamalı Direnç Kontrol Yapısının Blok Şeması.....25
Şekil 2.13. Darbe Gücü Gereksinimleri Olan Tipik Bir Yük Profili.....30
Şekil 2.14. Süperkapasitör Destekli Elektrikli Araç Uygulamasının Blok Diyagramı.31
Şekil 2.15. Süperkapasitör Destekli UPS Uygulamasının Blok Diyagramı.....32
Şekil 2.16. Süperkapasitör Destekli Bir Sistemden Geçişin Blok Diyagramı.....33
Şekil 3.1. Hall-Effect Devre Şeması.....38
Şekil 3.2. Alçak ve Yüksek Taraf MOSFET Anahtarlama Teknikleri.....39
Şekil 3.3. Sabit Gerilimde Şarj Yönteminin Zamana Göre Gerilim Ve Akım Grafiği.41
Şekil 3.4. Sabit Akımda Şarj Yönteminin Zamana Göre Gerilim Ve Akım Grafiği.....41
Şekil 3.5. Sabit Gerilim Ve Sabit Akım İle Şarj Etme Yönteminin Zamana Göre Gerilim Ve Akım Grafiği.....42
Şekil 4.1. Sistem Tasarımı Şeması.....46
Şekil 4.2. 28 VDC Araçta Marş Anı Bozulma Limitleri.....49
Şekil 4.3. 28 VDC Sistemler İçin Zarf Spike Aralığı.....50
Şekil 4.4. 28 VDC Sistemler İçin Dalgalanma Zarf Aralığı.....52
Şekil 4.5. Ters Gerilim Koruma Devresi.....54
Şekil 4.6. Ters Gerilim Koruma Devresi Simülasyon Şeması.....54
Şekil 4.7. Ters Gerilim Koruma Devresi Simülasyon Grafiği.....55
Şekil 4.8. Dalgalanma Bastırıcı Devresi.....55
Şekil 4.9. Dalgalanma Bastırıcı Devresi Simülasyon Şeması.....56
Şekil 4.10. Dalgalanma Bastırıcı Devresi Simülasyon Grafiği 0-70ms.....57

Şekil 4.11. Dalgalanma Bastırıcı Devresi Simülasyon Grafiği 0-480ms.....57
Şekil 4.12. Dalgalanma Bastırıcı Devresi Simülasyon Grafiği 0-10s.....58
Şekil 4.13. EMI Filtre Devresi.....59
Şekil 4.14. Yüksek Taraf MOSFET Sürücü Devresi.....60
Şekil 4.15. MOSFET Sürücü Devresi Simülasyon Şeması.....60
Şekil 4.16. MOSFET Sürücü Devresi Simülasyon Grafiği.....61
Şekil 4.17. Gerilim Ölçüm Devresinin Şematik Gösterimi.....62
Şekil 4.18. Giriş Gerilimi Uygulamasının Simülasyonu.....63
Şekil 4.19. Akım Ölçüm Entegresinin Şematik Diyagramı.....63
Şekil 4.20. Akım Ölçüm Devresinin Giriş-Çıkış İlişkisi.....64
Şekil 4.21. Akım Okuma Devresinin Uygulanma Simülasyonu.....65
Şekil 4.22. Akım Koruma Devresi Şematik Gösterimi.....66
Şekil 4.23. Akım Koruma Devresi Simülasyonu.....68
Şekil 4.24. TL431 Entegresinin Şematik Diyagramı.....69
Şekil 4.25. Süper Kapasitör Şarj Dengeleme Devresi Şematik Gösterimi.....69
Şekil 4.26. Süper Kapasitör Şarj Dengeleme Devresi Simülasyonu.....70
Şekil 4.27. Sayısal Sinyal Okuma Devresi Şematik Gösterimi.....71
Şekil 4.28. Sayısal Sinyal Okuma Devresi Simülasyonu.....72
Şekil 4.29. Yedek Güç Sistemi Yandan ve Üstten Görünümü…….....73
Şekil 4.30. Test Düzeneği.....73
Şekil 4.31. Ani Gerilim Düşümü 74
Şekil 4.32. Ani Gerilim Yükseklimi 75
Şekil 4.33. Sistem Çıkışının Süperkapasitörden Ana Beslemeye Geçişi.....76
Şekil 4.34. Besleme Geriliminde Dalgalanma.....77
Şekil 5.1. Örnek Masaüstü Yazılım Arayüzü.....81

İÇTEN YANMALI MOTORLU ARAÇLARDA KULLANILMAK ÜZERE ÖZELLEŞTİRİLMİŞ SÜPERKAPASİTÖR BESLEMELİ GERİLİM DÜZENLEYİCİ FONKSİYONA SAHİP BİR YEDEK GÜÇ SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu çalışmada 28 Volt akü gerilimi ile çalışan içten yanmalı araçlardaki kritik sistemleri; gerilim dalgalanmalarında, yüksek gerilim durumunda (V>32) ve düşük gerilim durumunda (V<16) sistemin çalışmasını etkilemeden yedek güç ünitesinden çalıştırabilecek, askeri standartlara uygun bir cihaz tasarlanmıştır. Cihaz DC gerilim (16V-32V) ile çalışmaktadır. Yedek güç ünitesi süper kapasitörler ile tasarlanmıştır. Süper kapasitörler sistemi besleyen güç kaynağından beslenmiştir. Süper kapasitörler, aşırı akım (A>7) ve yüksek gerilim (V>32) ile doluma karşı korunmuştur. Gerilim takibi, akım takibi, koruma ve karar mekanizması, programlanabilen akıllı bir yapı ile yapılmıştır.Gerilim dalgalanması, yüksek gerilim ve düşük gerilim durumlarında tasarlanan sistemin tepkileri gözlenmiştir. İstenilen kriterler sağlandığında (16<V<32) yedek güç ünitesinden güç kaynağına geçişleri izlenmiştir. Sistemdeki süper kapasitörlerin aşırı akım ile şarj edilme durumunda şarjı kesmesi ve şarjı geri açması durumları izlenmiştir.

Askeri araçlarda önemli bir yere sahip olan yangın söndürme ve infilak bastırma sistemine bağlı şekilde yapılan testlerde cihazın düşük gerilim ve yüksek gerilim durumlarında 1 milisaniyeden daha kısa bir sürede sistemi yedek güç ünitesine geçirdiği gözlenmiştir. Yedek güç ünitesinden güç kaynağına geçiş süresinin 10 saniye olduğu görülmüştür. Süper kapasitörlerin 7A ve üzerindeki şarj akımlarına karşı korunduğu ve 10 saniye boyunca 7A'in altında akım olduğunda şarjı yeniden başlattığı gözlenmiştir.

Aynı testlerde güç kaynağından yedek güç ünitesine geçme durumunun çok hızlı olmasıyla, koruduğu sistemi herhangi bir enerji kesintisi olmadan yaklaşık 10 dakika çalıştırdığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Düşük gerilim, Yüksek gerilim, Yedek güç ünitesi, Geçiş süresi

DEVELOPMENT OF A SPECIALIZED BACKUP POWER SYSTEM WITH SUPERCAPACITOR SUPPLY AND VOLTAGE REGULATOR FUNCTION FOR USE IN INTERNAL COMBUSTION MOTOR VEHICLES

SUMMARY

In this study, critical systems in internal combustion vehicles operating with 28 Volt battery voltage; A device complying with military standards has been designed to operate from a backup power unit in case of voltage fluctuations, high voltage (V> 32) and low voltage (V <16) without affecting the operation of the system. The device works with DC voltage (16V-32V). The backup power unit is designed with super capacitors. Super capacitors are fed from the power supply that feeds the system. Super capacitors are protected against overcurrent (A> 7) and high voltage (V> 32) charging. Voltage monitoring, current monitoring, protection and decision mechanism are made with a programmable intelligent structure. In case of voltage fluctuations, high voltage and low voltage, their transitions to the backup power unit were observed. When the required criteria were met (16 <V <32), their transition from the backup power unit to the power supply was monitored. The situations in which the super capacitors in the system cut the charge and turn the charge back on in case of being charged with excessive current were monitored.

In the tests performed in connection with the fire extinguishing and explosion suppression system, which has an important place in military vehicles, it was observed that the device switched the system to the backup power unit in less than 1 millisecond in low voltage and high voltage situations. It has been observed that the transition time from the backup power unit to the power supply is 10 seconds. It has been observed that the super capacitors are protected against charging at 7A and above and restarts the charge when there is a current below 7A for 10 seconds.

In the same tests, it was observed that the switch from the power source to the backup power unit was very fast and the system, which it protected, operated for about 10 minutes without any power cut.

Keywords: Low voltage, High voltage, Backup power unit, Transition time

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde, görevi önemli olan sistemlerin kesintisiz ve sorunsuz bir biçimde çalışması istenmektedir. Gerilim dalgalanmaları, düşümleri, yükselimleri, aşırı akım vb. Durumlara, kullanılan cihazların maruz kalmaması istenmektedir. Eğer kullanılan cihazlar bu durumlardan birine veya birkaçına maruz kalırsa, karar mekanizmasında problemler oluşabilmekte veya cihazın bozulmasına yol açabilmektedir. Her cihazın böyle durumlardan korunması gerekmektedir. Eğer korunmaz ise askeri kara platformlarında standart almak için yapılan testlerde başarısız sonuçlar alınabilmektedir. Bu durumda ürüne standart alınamadığı için, ürünü askeri kara platformlarında kullanmak problem oluşturmaktadır. Bunun için askeri cihazları böyle durumlardan koruyabilecek cihazlara ihtiyaç vardır.

1.1. Tezin Amacı

Günümüzde elektrikli araçlar yaygınlaşmakta olsa da hala içten yanmalı motorlar askeri ve sivil araçlarda en çok kullanılan motor türüdür. İçten yanmalı motorlar, ilk hareket için marş sistemi kullamak zorundadır ve bu sistemde bulunan marş motoru ilk hareketi oluşturmak için anlık yüksek güce ihtiyaç duymaktadır. Bu güç ihtiyacı araç üzerinde bulunan akü üzerinden sağlanır. Marş motoruna bu yüksek gücün aktarılması esnasında araçtaki diğer elektronik sistemlerin bu aktarımdan etkilenmemesi beklenir. Özellikle askeri araçlarda kritik öneme sahip birçok elektronik sistem bulunmaktadır. Bu sistemlerin marş durumundaki gibi yüksek güç aktarımı yapılan durumlarda oluşan elektriksel gürültü ve dalgalanmalara karşı korunması gerekmektedir. Bu sebeple askeri araçlarda bulunan elektronik sistemler MIL-STD-1275 ve MIL-STD-461 standartlarının gerekliliklerini sağlamak zorundadır.

Askeri sistemlerde kullanılan bazı kritik sistemlerin, araçta sistemleri besleyecek herhangi bir enerji olmasa bile belirli bir süre çalışması istenmektedir. Bunlar; kule sistemleri, gözetleme sistemleri, infilak bastırma sistemleri vb. sistemlerdir. Bu

sistemlerin çalışması için yedek batarya sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler araçta enerji olmadığı zaman sistemi belirli bir süre çalıştırmakta ve sistemin çekeceği anlık yüksek güçleri karşılamaktadır. Bu sistemler, kullanıldığı sisteme gerilim dalgalanması ve gerilim düşümü oluşturmamaktadır.

Bu çalışmada gerilim düşümü, gerilim yükselimi ve gerilim dalgalanmalarına karşı kullanılacağı sistemi koruyacak ve sistemde enerji olmaması durumunda anlık olarak yüksek güç verebilecek , sistemi bir süre daha çalıştırabilecek bir yedek güç ünitesi ve koruma cihazı tasarlanmıştır. Tasarlanan cihazda yedek güç ünitesi bataryası olarak yüksek güç kapasitesine sahip süperkapasitörler kullanılmıştır. Tasarlanan cihaza düşük gerilim, yüksek gerilim ve osilasyonlu gerilim uygulanmıştır. Bu gerilimlere maruz kalan sistemi koruma amacıyla geçilen yedek güç ünitesine geçiş süreleri incelenmiştir. Yedek güç ünitesinde kullanılan süperkapasitörlerin şarj işlemi esnasında aşırı akıma ve yüksek gerilim gibi durumlara maruz kalmasına karşı alınacak önlemler, tasarım aşamasında göz önüne alınmıştır. Bir yangın söndürme ve infilak bastırma sistemi üzerinde cihazın çalışma fonksiyonları test edilmiştir.

1.2. Literatür Araştırması

Süperkapasitörler, en yüksek güç uygulamalarının güç ve enerji gereksinimlerini karşılayabilen nispeten yeni enerji depolama cihazlarıdır. Süperkapasitör, yüksek kapasitanslı, düşük eşdeğer seri dirençli (ESR) ve düşük anma gerilimi değerlerine sahip özel bir kapasitör türüdür. Süperkapasitörlerin en çekici özelliği, süperkapasitör ürün veri sayfalarında bin farad ölçeği ile ifade edilen yüksek kapasite değeridir [1,2]. Süperkapasitörlerin yüksek kapasitans değerleri, genellikle mikro farad veya mili farad aralığında olan geleneksel kondansatörlerin kapasitans değerleri ile karşılaştırıldığında, süperkapasitörlerin kapasitansının, geleneksel kondansatörlerin kapasitansından en az bin kat daha büyük olduğu görülmektedir. Süperkapasitörlerin düşük ESR değerleri, enerji depolama uygulamaları için süperkapasitörlerin diğer bir avantajıdır, çünkü bir enerji depolama cihazından çekilebilecek maksimum güç ESR değeri ile sınırlı olmaktadır. Süperkapasitör ürün veri sayfalarında, süperkapasitörlerin ESR değerlerinin bir mili ohm'dan küçük olduğu bildirilmektedir [1,2]. Süperkapasitörlerin ESR değerleri de geleneksel kapasitörlerin ESR değerleri ile karşılaştırıldığında düşük seviyelerdedir [3]. Süperkapasitörlerin ana dezavantajı ise, organik elektrolitlere sahip ticari süperkapasitör ürünlerinin çoğu için 2.5V düzeyinde

olan düşük anma gerilim değerleridir. Bu nedenle, daha yüksek gerilim oranlarına sahip süperkapasitör modülleri elde etmek için süperkapasitörler seri olarak bağlanmaktadır [4].

Pil özelliklerini etkileyen ana faktörler; pilin termal, elektrokimyasal reaksiyonu, pil tasarımı ve uygulaması, ortamlar ve çalışma durumu olarak belirtilmektedir. Ayrıca, pil ömrünün uzaması önemli bir konudur. Bu nedenle sızdırmaz bir kurşun asit akünün yeterli elektrolite ihtiyacı olmaktadır çünkü elektrolit kaybı elektrolit kapasitesinin azalmasına neden olmaktadır. Akü şarjı için büyük gerilimlerin kullanılması uygun olmamaktadır çünkü havalandırma hızı, büyük gerilim koşulları altında elektrolitin emiş hızını aşmaktadır. Pilin aşırı şarj olmasını önlemek için şarj gerilimi ve süresinin dikkate alınması gerekmektedir [5].

Akü şarj cihazı devre topolojileri için temel hususlar; pil tipini seçmek, şarj yönteminin tasarımını yapmak ve hızlı şarjın tasarımı olarak belirtilmiştir. Geleneksel şarj yöntemleri arasında sabit akım yöntemi, sabit gerilim yöntemi ve sabit akım-sabit gerilim yöntemi bulunmaktadır. Hua ve Lin'in yaptığı çalışmada, farklı şarj yöntemlerinin şarj özellikleri (şarj süresi, şarj akımı, sıcaklık, anahtarlama frekansı ve darbe süresi) analiz edilmiştir. Seri olarak dört adet 26 Ah kurşun-asit akü için akü şarj cihazının performansı araştırılmıştır. Pil şarj süresini kısaltmak ve pil şarj cihazı için daha büyük bir şarj akımının gerekli olduğu belirtilmiştir [5].

Masserant ve Stuart, çıkış gücünü en üst düzeye çıkarmak için çevrimiçi mikrodenetleyici kullanan bir pil şarj cihazı üzerinde çalışmışlardır. Deney, ya izin verilen maksimum giriş akımında ya da şarj cihazının kendisi tarafından uygulanan termal sınırda çalışılarak yapılmıştır. Bu durumda termal sınır, iki ana yalıtımlı geçit çift kutuplu transistörünün bağlantı sıcaklıkları tarafından belirlenmektedir. Bu sıcaklıkların doğrudan ölçümü pratik olmadığından, çeşitli çevrimiçi ölçümleri kullanan bir bilgisayar algoritması ile hesaplanmaları gerekmektedir. 8 kW'lık bir şarj cihazı için deneysel sonuçlar, bir NiFe pil seti ile kullanıldığında toplu şarj süresinde yaklaşık %26 azalma olduğunu göstermiştir [6].

Modern süper kapasitörlerin kullanılması, maksimum anlık çıkış gücünü artırmak için normal pillerin tamamlanmasına izin vermektedir. Bir süper kapasitör cihazındaki gerilimi artırmak içinse bir seri bağlantı gerekmektedir. Pittet ve Rufer'in yaptıkları bir çalışmada 5 süperkapasitör için, herhangi bir süperkapasitör üzerinde aşırı gerilim

olmadan optimum bir depolanmış enerji değeri ve optimum bir verimlilik sağlayan aktif bir gerilim paylaşım cihazı tanımlamışlardır. Aktif cihazı ile 5 süper kapasitörden oluşan her bir yığın, bir seri bağlantıdaki diğer yığınlarla ilişkilendirilebilen temel bir hücre haline gelmiştir. Bu sayede, yüksek çıkış gerilimi seviyesine sahip bir enerji depolama sistemi tanımlanmıştır [7].

Shah ve arkadaşları, oluşturdukları bir simülasyonla süperkapasitörde depolanan optimum enerji değerinin kullanılabileceğini göstermişlerdir. Pasif süperkapasitör ve pil modeline kıyasla, en yüksek güç talebi sırasında küçük dalgalanma ile pilin akım paylaşımı büyük ölçüde azaltılabilmiştir ve aynı yük için akü boyutlandırması optimize edilebilmiştir. Aküden çekilen akım küçük olduğundan, daha düşük sıcaklık artışı ve daha uzun ömür sağlanmıştır. Bu sonuçlara göre süperkapasitörler, çeşitli uygulamalar ve hibrit enerji depolama sistemi geliştirmek için en iyi aday olarak gösterilmektedir [8].

Süperkapasitörler, yüksek güç dağıtımı veya elektrik enerjisi depolamanın gerekli olduğu her yerde kullanılabilmektedir. Bu nedenle çok sayıda uygulama alanı bulmak mümkündür. Süperkapasitörlerin kullanılması normal pillerin tamamlanmasına izin vermekte ve pillerle birlikte maksimum anlık çıkış gücünü ve pil ömrünü iyileştirmektedir. Süperkapasitör gelişimi dünya çapında devam etmekte ve performanslarının iyileştirilmesinde iyi bir ilerleme kaydedilmektedir.

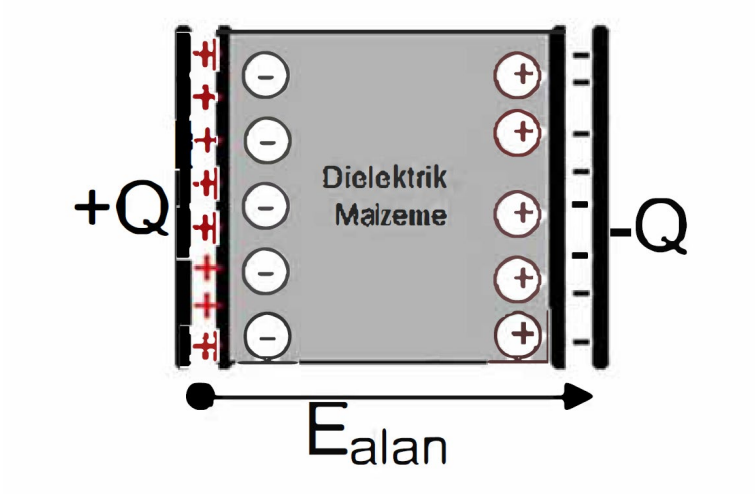
BÖLÜM 2. SÜPERKAPASİTÖRLERİN ÖZELLİKLERİ, PERFORMANSI VE TASARIM HUSUSLARI

2.1. Giriş

Süperkapasitör, elektrikli çift katmanlı (EDL) mekanizmaya dayanan özel bir kapasitör türüdür. Süperkapasitörlerin depolama mekanizması, hiçbir elektrokimyasal reaksiyonun dahil olmadığı elektrostatik bir süreçtir [4]. EDL tabanlı enerji depolama mekanizması, süperkapasitörlerin benzersiz dahili yapısı ile birlikte çok yüksek kapasitans değerleri ile sonuçlanır. Öte yandan, cihaz içerisinde kullanılan malzemelerin özellikleri, nominal gerilim ve eşdeğer seri direnç (ESR) gibi durumlar süperkapasitör özelliklerini etkilemektedir [9]. Bu nedenle, süperkapasitör destekli bir enerji depolama uygulaması tasarlamak için, süperkapasitörlerin enerji depolama mekanizmasını ve iç yapısını araştırmak gerekmektedir. Böylelikle enerji depolama uygulamaları için kritik olan süperkapasitörlerin temel tasarım kriterleri kolayca anlaşılabilmektedir.

2.2. Kapasitif Enerji Depolama Yöntemi

Süperkapasitörlerin enerji depolama mekanizması, matematiksel formüller açısından geleneksel kapasitörlerle aynı özelliklere sahiptir [10]. Bu nedenle süperkapasitörlerin detaylarına geçmeden önce kapasitif enerji depolama yöntemini gözden geçirmek doğru olacaktır. Kapasitif depolama yöntemi, elektrik enerjisinin kapasitör adı verilen bir cihazda tutulduğu en yaygın elektrik enerjisi depolama biçimlerinden biridir. Bir kapasitörün iç yapısı Şekil 2.1.'de gösterilmektedir. Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi, bir kapasitör, dielektrik malzeme adı verilen bir yalıtkan bileşenle ayrılmış iki iletken plakadan oluşmaktadır.



Şekil 2.1. Bir Kapasitörün İç Yapısı.

Terminaller arasına elektrik potansiyeli uygulandığında, cihaz içindeki elektrik yükleri uygulanan potansiyelin polaritesine göre plakaların yakınında birikmeye başlamakta ve bu şekilde kondansatörün içinde bir elektrik alanı oluşturulmaktadır. Plakalarda (Q) biriken net elektrik yükü ve buna karşılık gelen elektriksel potansiyel (V), (2.1) 'de kapasite (C) adı verilen bir parametre ile ilişkilidir.

$$C = \frac{Q}{V} \tag{2.1}$$

Kapasitansı, cihazın boyutları cinsinden ifade etmek için, plakaların yüzey alanı (A) dielektrik malzemenin (d) uzunluğundan çok daha büyük olduğundan, cihaz içindeki tek tip elektrik alanı yaklaşımı kullanılabilmektedir. Bu yaklaşımla, dielektrik malzemenin geçirgenliğinin (ε), cihaz içindeki elektrik alanın büyüklüğünü belirlenmektedir. Öte yandan, bir malzemenin geçirgenliği, (2.2)'de verildiği gibi havanın geçirgenliğine (ε_o) göre göreceli geçirgenlik (ε_r) olarak ifade edilen ve birim elektrik alanlı bir elektrik yükünün geçtiği mesafe olarak bilinmektedir.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r \tag{2.2}$$

Cihazın plakaları üzerindeki elektrik yükünün dağılımı, tek tip elektrik alanı yaklaşımına ek olarak tek tip kabul edilirse, elektrik alanın büyüklüğü, (2.3)'de verildiği gibi yük yoğunluğu (D) ve geçirgenlik cinsinden ifade edilebilmektedir.

$$E = \frac{D}{\varepsilon} = \frac{\frac{Q}{A}}{\varepsilon} = \frac{Q}{A \times \varepsilon} \tag{2.3}$$

Elektrik alan ifadesini çıkardıktan sonra, cihazın içindeki elektrik potansiyeli, (2.4)'te verildiği gibi dielektrik uzunluk (d) içindeki elektrik alanın çizgi integrali olarak ifade edilebilmektedir.

$$V = \int_0^d \frac{D}{\varepsilon} \times dz = \frac{D \times d}{\varepsilon} = \frac{Q \times d}{\varepsilon \times A} \tag{2.4}$$

(2.1) ve (2.4) birlikte değerlendirilirse, (2.5)'de verilen cihazın kapasitansının plakaların yüzey alanı, geçirgenliği ve yalıtım malzemesinin dielektrik uzunluğu ile ilişkili olduğu görülmektedir.

$$C = \frac{\varepsilon \times A}{d} \tag{2.5}$$

Bir kondansatör içindeki enerji değişim ifadesini (ΔE) elde etmek için (2.1), (2.6) 'da verildiği gibi düzenlenmelidir.

$$Q = C \, x \, V \tag{2.6}$$

(2.6)'nın her iki tarafı zamana göre farklılaştırılırsa, mevcut ifade (2.7)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$i(t) = C \times \frac{dV(t)}{dt} \tag{2.7}$$

Bir sonraki adımda, anlık güç ifadesi, akım ifadesinin (2.8)'de verilen kapasitör gerilimi ile çarpılmasıyla elde edilmektedir.

$$P(t) = C \times \frac{dV(t)}{dt} \times V(t) \tag{2.8}$$

Son adım olarak, (2.9)'da verildiği gibi bu zaman aralığında kapasitörün enerji değişim ifadesini elde etmek için bir zaman aralığında (t_0-t_1) zamana göre anlık güç ifadesi entegre edilmektedir.

$$\Delta E = \frac{1}{2} \times C \times \left[(V(t_1)^2 - V(t_0)^2 \right] \tag{2.9}$$

Enerji değişimi ifadesi yardımıyla, bir kondansatörde anlık olarak depolanan enerji de (2.10) 'da verildiği gibi ifade edilebilmektedir.

$$E(t) = \frac{1}{2} \times C \times V(t)^2 \tag{2.10}$$

(2.10) 'da verilen depolanmış enerji ifadesi, bir kondansatör içinde anlık olarak depolanan enerjinin, cihazın kapasitansı ve anlık gerilimi ile ilgili olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, bir kondansatör içerisinde depolanabilecek maksimum enerji, cihaz içerisinde ulaşılabilen maksimum gerilim ile ilgilidir. Bu maksimum seviye, yaygın olarak, dielektrik malzemenin bozulma gerilimi ile sınırlı olan bir kapasitörün gerilim derecesi (V_{rated}) olarak bilinmektedir. Bir dielektrik malzemenin kırılma gerilimi ifadesi (V_{bd}) (2.11) 'de verilmiştir.

$$V_{bd} = E_{ds} \times d \tag{2.11}$$

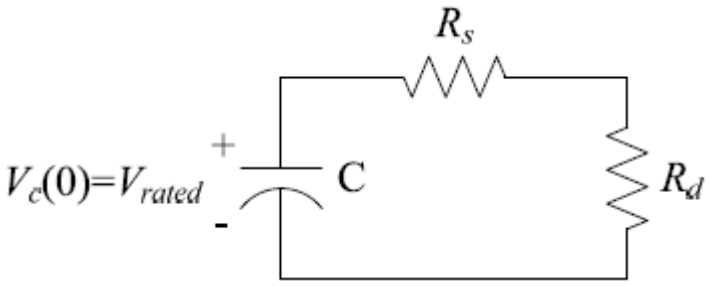
(2.11)'e göre, bir yalıtım malzemesini tamamen iletken hale getirmek için, kırılma geriliminin elektrik alanın büyüklüğü olarak tanımlanan malzemenin dielektrik uzunluğu ve dielektrik gerilmesi (E_{ds}) ile ilişkili olduğu görülmektedir. (2.5), (2.10) ve (2.11) birlikte değerlendirildiğinde, daha büyük boyutlu kondansatörlerin daha büyük enerji depolama kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç, kapasitörlerin, enerji yoğunluğunun (Ed_{vol}, Ed_m) (2.12) ve (2.13)'te verilen cihazın hacmine (Vol) veya

kütlesine (m) göre tanımlanabildiği düşük bir enerji yoğunluğu eğilimine sahip olduğunu göstermektedir.

$$Ed_{vol} = \frac{\frac{1}{2} \times C \times V_{rated}^2}{Vol} \tag{2.12}$$

$$Ed_{m} = \frac{\frac{1}{2} \times C \times V_{rated}^2}{m} \tag{2.13}$$

Kapasitörler maksimum güç kapasitesi açısından incelendiğinde en önemli terimin omik kaybı temsil eden cihazların eşdeğer seri direnci (ESR) olduğu görülmektedir. Deşarj modundaki bir kapasitörün eşdeğer devre modeli Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Deşarj Modundaki Bir Kapasitörün Elektriksel Eşdeğer Devresi.

Şekil 2.2.'de, R_s, cihazın ESR'sini temsil ederken, R_d deşarj direncini temsil etmektedir. Bir kondansatörden çekilebilecek maksimum güç, Şekil 2.2.'de gösterilen devreye maksimum güç aktarımı prensibi uygulanarak elde edilebilmektedir. Maksimum güç ifadesi (2.14) 'te verilmiştir.

$$P_{\max} = \frac{V_{rated}^{\ 2}}{4 \times R_s} \tag{2.14}$$

Şekil 2.2.'de gösterilen devre, Gallay'ın çalışmasında gösterildiği gibi deşarj verimliliği (η) hususlarına göre de analiz edilebilmektedir [11]. Deşarj verimliliği, deşarj direncinde

(P_L) harcanan gücün kapasitör (P_c) tarafından sağlanan güce oranının (2.15) 'de verildiği gibi tanımlanmasıdır.

$$\eta = \frac{P_L}{P_c} = \frac{\left(V_c \times \frac{R_d}{R_d + R_s}\right)^2}{\frac{V_c^{\,2}}{R_d + R_s}} = \frac{R_d}{R_d + R_s} \tag{2.15}$$

Yeniden düzenleyerek (2.15), deşarj direncinde harcanan güç, kapasitör gerilimi (V_c), ESR ve (2.16) 'da verildiği gibi deşarj verimi cinsinden ifade edilebilmektedir.

$$P_L(\eta) = \eta \times (1-\eta) \times \frac{V_c^{\,2}}{R_s} \tag{2.16}$$

(2.16) 'da verilen yük gücü ifadesi, (2.17) ve (2.18)' de verilen cihazın hacmine (Vol) ve kütlesine (m) göre yeniden düzenlenebilmektedir.

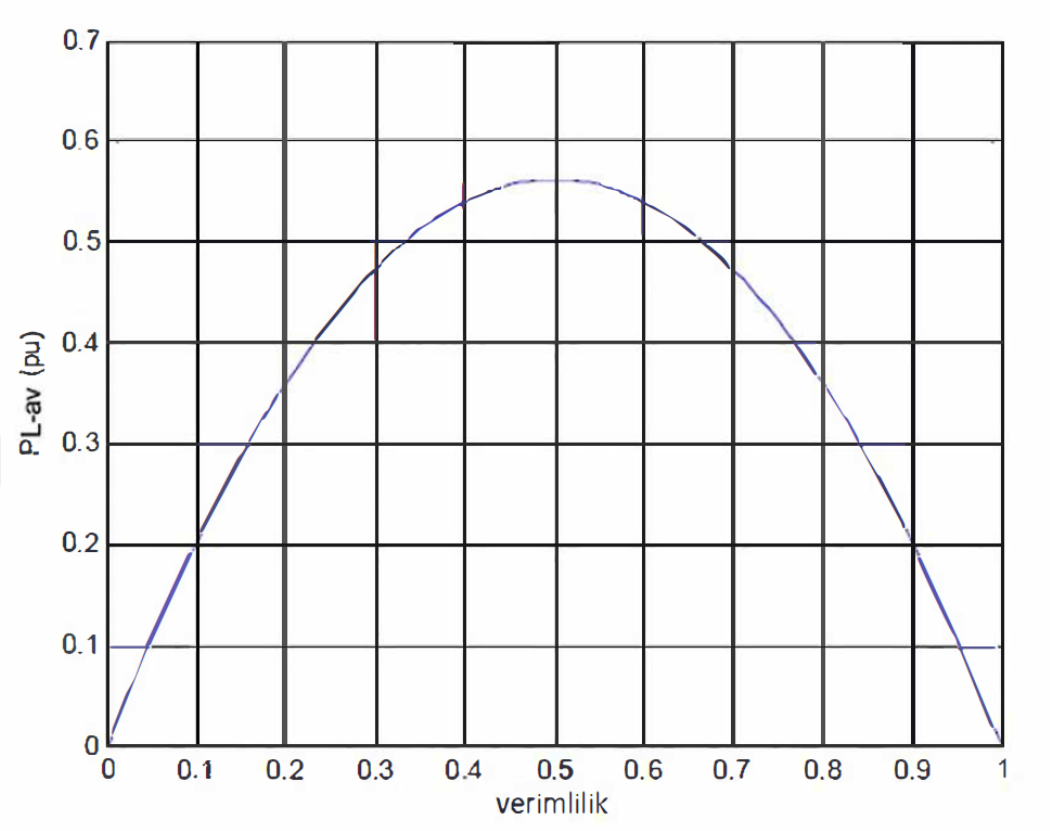
$$P_{Lvol}(\eta) = \frac{\eta \times (1-\eta) \times \frac{V_c^{\,2}}{R_s}}{Vol} \tag{2.17}$$

$$P_{Lm}(\eta) = \frac{\eta \times (1-\eta) \times \frac{V_c^{\,2}}{R_s}}{m} \tag{2.18}$$

(2.16) 'da verilen yük gücü ifadesinin, bu varsayım altında kapasitörün geriliminin zamana göre doğrusal olarak V_{rated} düzeyinden V_{rated} / 2 düzeyine düştüğü sabit akım deşarj varsayımına göre ortalaması alınabilmektedir. Bu yaklaşım sonucunda elde edilen ortalama yük gücü (P_{L_av}) ifadesi (2.19) 'da verilmiştir.

$$P_{L_av}(\eta) = \frac{9}{16} \times \eta \times (1-\eta) \times \frac{V_{rated}^{\,2}}{R_s} \tag{2.19}$$

Ortalama yük gücünün deşarj verimliliğine göre değişimi, (2.14) 'de verilen maksimum güç ifadesinin referans olarak alındığı Şekil 2.3.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Deşarj Verimliliğine Göre Ortalama Yük Gücünün Değişimi.

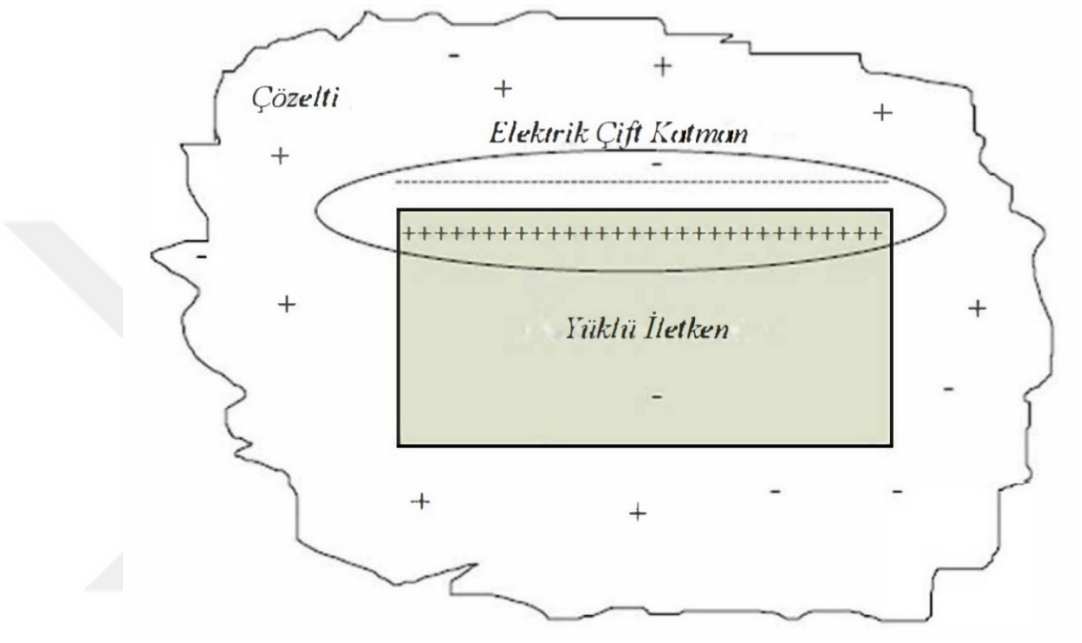
Şekil 2.3.'e göre, yük direncinin cihazın ESR'sine eşit olduğu %50 verimlilik durumu için maksimum deşarj gücü durumunun oluştuğu görülmektedir. Deşarj verimi arttıkça deşarj gücünün azaldığı da gözlenmektedir. Bu nedenle verimliliğin önemli olduğu uygulamalarda deşarj gücünün sınırlandırılması gerektiği sonucuna varılmaktadır.

2.3. Süperkapasitörler ve İç Yapıları

Kapasitif enerji depolama mekanizmasını genel bir bakış açısıyla inceledikten sonra süperkapasitörlerin özelliklerine devam etmek uygun olacaktır. Süperkapasitörlerin iç yapısı elektrikli çift katman (EDL) mekanizmasına dayanmaktadır. Bu nedenle, Süperkapasitörler genellikle elektrikli çift katmanlı kapasitörler (EDLC) olarak bilinmektedirler. Bu cihazların davranışını anlamak için EDL yapısını araştırmak gerekmektedir.

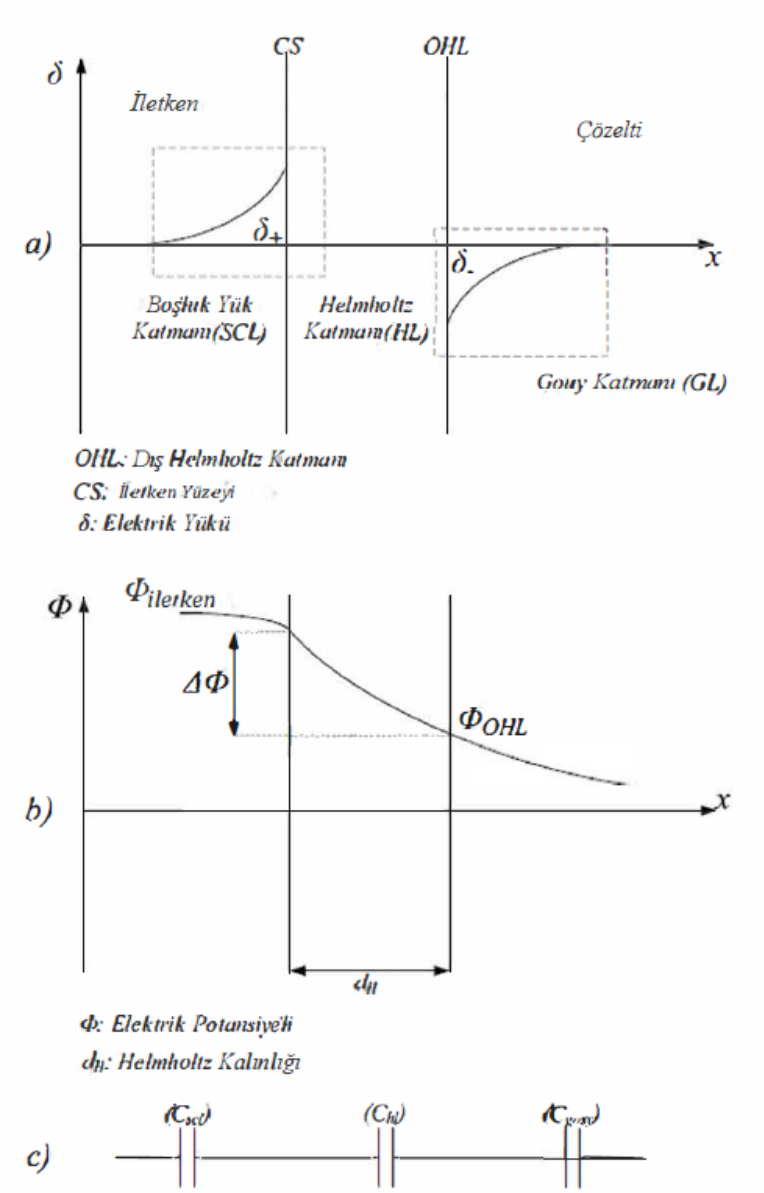
2.3.1. Elektrik Çift Katmanlı (EDL) Kapasitör Yapı

Yüklü bir iletken bir çözelti içine daldırıldığında, iletkenin elektronları ve delikleri ile çözelti içindeki iyonların taşıdığı elektrik yükü, iletken ve çözeltinin temas yüzeylerinde birikmeye başlamaktadır. İletken ve çözelti taraflarında biriken yük, Şekil 2.4.'te gösterilen EDL yapısını oluşturmaktadır.



Şekil 2.4. EDL Yapısı.

Şekil 2.4.'teki EDL yapısı, Şekil 2.5.'te gösterilen üç katmanlı bir modelle açıklanabilmektedir. Bu modelde birinci katman, çözelti içindeki iyonlar tarafından iletken içerisindeki fazla taşıyıcıların oluşturduğu uzay yük katmanı (SCL), ikinci katman absorbe edilen sıvı moleküllerin oluşturduğu Helmholtz katmanı (HL), üçüncü katman ise oluşan Gouy katmanı (GL) olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.5.(a)'da, yük taşıyıcılarının SCL ve GL sınırında en yüksek konsantrasyonda olduğu görülmektedir. SCL ve GL sınırlarından olan mesafe arttıkça taşıyıcı konsantrasyonu azalmaktadır. Şekil 2.5 (b)'de EDL yapısı içerisindeki iç potansiyelin SCL'de en yüksek seviyede olduğu ve sırasıyla HL ve GL'de azalan bir özellik gösterdiği görülmektedir. Bu modelin çalışma prensibi, Şekil 2.5.(c)'de gösterildiği gibi seri olarak bağlanmış üç kapasitörden oluşan pasif bir elektrik bileşenine benzemektedir [12].



Şekil 2.5. EDL Yapısının Üç Katmanlı Modeli: (A) Aşırı Yük Yoğunluğunun Değişimi, (B) İç Potansiyelin Değişimi, (C) Kapasitör Modeli [12].

Sato, yaptığı çalışmada HL (d_H) kalınlığının sıvı moleküllerin boyutu ile ilişkili olduğu ve genellikle bu mesafenin 0.5-1 nm arasında olduğunu belirtmiştir. Öte yandan, SCL ve GL kalınlıkları, artan taşıyıcı konsantrasyonu ile kalınlıklarının azaldığı yük taşıyıcı konsantrasyonu ile ilgili görünmektedir. SCL ve GL kalınlığı, HL kalınlığından en az 10 kat daha fazladır [12]. Bu nedenle, kapasitans dielektrik malzemenin kalınlığı ile ters orantılı olduğundan, HL'nin kapasitansı, Şekil 2.5.(c)'de gösterilen seri olarak yapılandırılmış kapasitör konfigürasyonunda baskın olmaktadır. HL'nin baskın kapasitif

karakteristiğine göre, EDL yapısı, kapasitans değerinin HL tarafından baskın olduğu tek bir kapasitör ile temsil edilmektedir [12]. Sonuç olarak, EDL yapısının nanometrik dielektrik uzunluk özelliğinin, kapasitif enerji depolama bölümü denklemleri tekrar gözden geçirildiğinde çok yüksek kapasitans değerleri ve düşük gerilim değerleri ile sonuçlandığı görülmektedir.

2.3.2. Süperkapasitörler

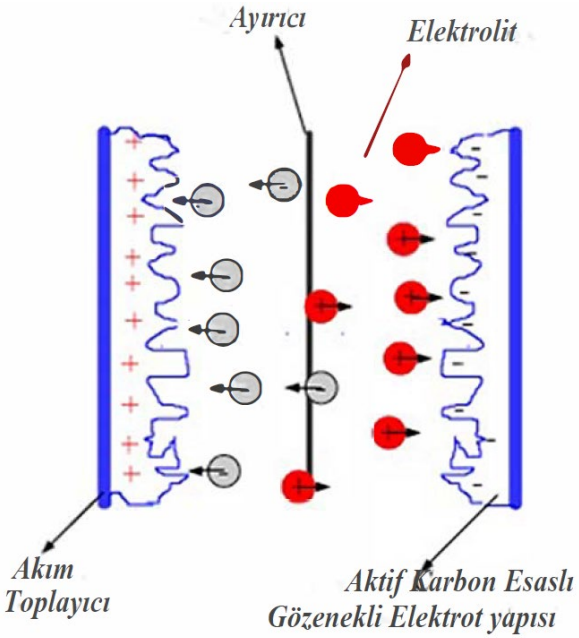
Süperkapasitör, EDL mekanizmasına dayalı özel bir kapasitör türüdür ve birçok EDL yapısının bir bileşimi olarak düşünülebilmektedir. Bazı ticari Süperkapasitör ürünlerinin kapasitans ve gerilim derecelendirme bilgileri Tablo 2.1.'de gösterilmektedir. Tablo 2.1'de görüldüğü gibi, ticari Süperkapasitör ürünlerinin kapasitans aralığının birkaç farad seviyesi ile binlerce farad seviyesi arasında değiştiği görülmekte ve bu kapasitans değerlerinin genellikle μF ve mF ölçeğinde olan (örneğin alüminyum elektrolitik kapasitörler) geleneksel kapasitörlerin kapasitans değerleriyle karşılaştırıldığında son derece yüksek olduğu sonucuna varılmaktadır. Öte yandan bin farad ölçeğindeki kapasitans değerlerine sahip cihazlar (örn. Maxwell, Nesscap, ext.) ve nominal gerilim seviyesi için ticari süperkapasitör ürünlerinin gerilim derecelendirme seviyelerinin 2.3-2.7V arasında değiştiği de görülmektedir. Daha düşük kapasitans değerlerine sahip cihazlar için (Cap XX, Nec-Tokin) 5.5V seviyesine ulaşır.

Tablo 2.1. Bazı Süperkapasitör Üreticilerinin Ürün Bilgileri.

Şirket	Ülke	Kapasitans Aralığı (F)	Gerilim Aralığı (V)
Maxwell Technologies	USA	10-3000	2.5-2.7
Nesscap Co.Ltd.	Korea	5-5000	2.3-2.7
LS Mtron Ltd.	Korea	3-3000	2.5-2.8
Ioxus Inc.	USA	100-5000	2.7
Tecate Industries	USA	0.5-300	2.7
Vinatech Co.	Korea	3-350	2.5-2.7
Cap-XX Ltd.	Australia	0.075-2.4	2.3-2.5
United Chemicon	Japan	350-3200	2.3-2.5
Nec-Tokin Corp.	Japan	0.047-1	3.5-5.5

2.3.3. Süperkapasitörlerin İç Yapısı

Süperkapasitörler iki elektrottan, bir ayırıcıdan ve cihazın içindeki boşluğu dolduran bir elektrolitten oluşmaktadır [9]. Bir süperkapasitörün iç yapısı Şekil 2.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Bir Süperkapasitörün İç Yapısı. [9]

Bir süperkapasitörün elektrotları, yüksek iletken metalik akım toplayıcılardan ve gözenekli bir yapıya sahip bir aktif karbon parçasından oluşmaktadır. Aktif karbonun gözenekli yapısı, elektrotların yüzey alanı ile kapasitans arttığı için çok yüksek kapasitans değerlerine neden olan elektrotlar ile elektrolit arasındaki temas yüzeyini arttırmaktadır. Temel olarak, paralel plaka kapasitör teorisine göre bir süperkapasitörün kapasitansının, aktif karbon ve elektrolit arasındaki artan temas yüzeyi ile doğrusal olarak arttığı düşünülmektedir. Ancak pratikte elektrotların gözenek boyutları dikkate alınmalıdır. Çünkü çok küçük gözenek boyutuna sahip cihazların etkin yüzey alanı, elektrolit ile aktif karbonun küçük gözenekleri arasındaki yetersiz elektrostatik etki nedeniyle orijinal yüzey alanından daha düşük olmaktadır [9,12,13].

Elektrolit tipi, süperkapasitörlerin ESR parametresini etkilemekte ve cihazın gerilim değerini belirlemektedir. Süperkapasitörlerde kullanılan en yaygın elektrolit türleri sulu (KOH, H_2SO_4) ve organik türlerdir [13]. ESR ve cihazın gerilim derecesi açısından sulu

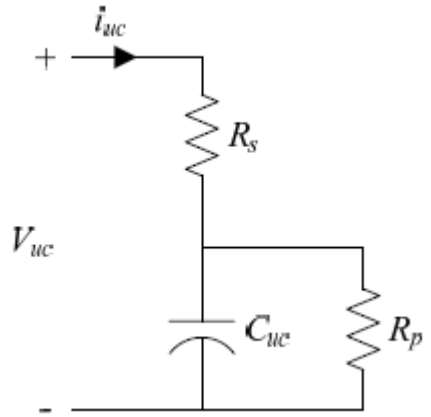
ve organik elektrolitlerin kullanımı arasında bir denge bulunmaktadır. İki elektrolit türü, iyon iletkenliğine göre karşılaştırıldığında sulu elektrolitlerin iletkenliklerinin organik elektrolitlere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle, sulu elektrolitli cihazların ESR'si organik elektrolitli cihazların ESR'sinden daha düşüktür [9]. Bununla birlikte, gerilim derecelendirme perspektifinden, organik elektrolitlerin ayrışma geriliminin (~ 2.5V) sulu elektrolitlerin ayrışma geriliminden (~ 1.25V) daha yüksek olduğu görülmektedir [9]. Bu nedenle, organik elektrolitli süperkapasitörler, (2.10) 'da gösterilen depolanmış enerji ifadesi yeniden değerlendirildiğinde sulu elektrolitli süperkapasitörlere kıyasla daha yüksek bir enerji yoğunluğuna sahip olma eğilimindedir. Bu nedenle, ticari süperkapasitör ürünlerinin çoğunda organik elektrolitler kullanılmaktadır [1,2].

Süperkapasitörlerin elektrot ve elektrolit özellikleri birlikte düşünüldüğünde, sulu elektrolit tiplerine sahip süperkapasitörlerin kapasitansının, organik elektrolitlerle aynı süperkapasitörler için daha yüksek bir kapasitans değerine sahip olma eğiliminde olduğu görülmektedir. Burke, bu durumun nedenini organik elektrolitlerdeki iyonların sulu elektrolitlerdeki iyonlara kıyasla daha büyük boyutuna göre açıklamaktadır [14]. Bu nedenle, elektrot ve elektrolit yapısı arasındaki elektrostatik etkinin, büyük iyon boyutundan dolayı organik elektrolit durumunda daha düşük olduğu sonucuna varılmaktadır.

Seperatör, cihazın iki elektrotu arasındaki elektriksel iletkenliği engelleyen bir yapı olmakla birlikte, iyonik iletkenliğe de izin vermektedir. Bu nedenle, elektrolit özelliklerine göre uygun bir ayırıcı malzeme seçmek önemlidir çünkü ayırıcı elektrolitin, içinden iyon geçişine izin vermesi gerekmektedir. Sulu elektrolitler için cam elyaf veya seramik ayırıcılar kullanılırken, organik elektrolitli cihazlar için polimer veya kağıt bazlı ayırıcılar kullanılmaktadır [9]. Maxwell Technologies, süperkapasitör ürünleri için polipropilen veya selüloz ayırıcılar kullanmaktadır [15].

2.4. Süperkapasitörlerin Temel Elektriksel Özellikleri

Süperkapasitörlerin terminal elektrik davranışını modellemek, karmaşık iç yapıları nedeniyle zor olmaktadır. Bununla birlikte, süperkapasitörleri tam avantajla kullanmak için, cihazın en tutarlı elektrik devresi modelini ortaya koymak gerekmektedir [16]. Bu çalışmada, güç elektroniği dönüştürücüleri kullanılarak süperkapasitörlerin temel elektrik davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, yalnızca Şekil 2.7.'de gösterilen temel RC eşdeğer devresi dikkate alınmaktadır.

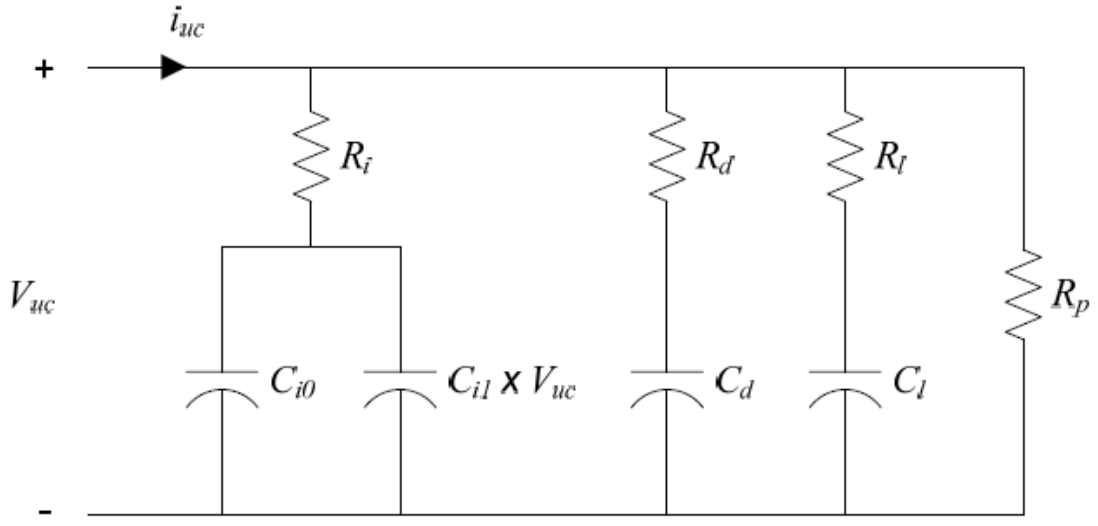


Şekil 2.7. Bir Süperkapasitörün Temel Elektriksel Eşdeğer Devresi. [17,18]

Şekil 2.7.'de C_{uc}, cihaz kapasitansını, R_s ESR'yi ve R_p, süperkapasitörün eşdeğer paralel direncini (EPR) temsil etmektedir. Süperkapasitörlerin kapasitans değerleri, cihazın enerji yoğunluğunun yüksek olduğunu gösteren geleneksel kapasitörlere göre çok yüksektir [1,3]. Öte yandan ESR, cihazdaki omik kaybı temsil etmektedir ve elektrotlar ile elektrolitin temas direncinin bir sonuç değeridir. Bir süperkapasitörün ESR'si, cihazın maksimum güç oranını belirtmektedir ve ürün veri föylerinden DC ve AC (100Hz veya 1kHz) durumları için bilgiler verilmektedir [1,2]. Şarj etme ve deşarj işlemleri başlatıldığında veya durdurulduğunda bir süperkapasitörün terminal geriliminin ani yükselişi ve düşüşü de cihazın ESR'sinden kaynaklanmaktadır [17]. Cihazın kaçak akımından kaynaklanan statik kaybı temsil etmekte ve dinlenme durumunda kendi kendine deşarj oranını belirlemektedir. EPR değerleri, cihazın gerilim derecesini (V_{rated}) kaçak akım parametresine ($I_{leakage}$) bölerek (2.20), Miller ve Burke'nin hazırladığı ürün veri sayfalarından elde edilebilmektedir [18].

$$EPR = \frac{V_{rated}}{I_{leakage}} \tag{2.20}$$

Birçok çalışmada, Şekil 2.7.'de gösterilen modelin süperkapasitörlerin terminal elektrik davranışını doğru bir şekilde temsil etmediği bildirilmektedir [16,19,20]. Zubieta ve Bonert, şarj ve deşarj işlemleri durdurulduğunda veya başlatıldığında süperkapasitörlerin gerçek terminal elektrik davranışı ile süperkapasitörlerin temel elektriksel eşdeğer devre modelinin terminal elektrik tepkisi arasında önemli farklar olduğunu belirtmişlerdir ve bu devre Şekil 2.8.'de gösterilmiştir [19]. Süperkapasitör terminali elektrik davranışını ifade edilmesi için elektrik devresi modeli ortaya konmuştur.



Şekil 2.8. Bir Süperkapasitörün Ayrıntılı Elektriksel Eşdeğer Devresi.

Şekil 2.8.'de gösterilen her RC dalı, süperkapasitörlerin farklı zaman ölçeklerindeki elektrik davranışını temsil etmektedir. İlk dal, bir seri dirençten (R_i) ve ardından bu dalın saniye cinsinden bir zaman ölçeğinde etkili olduğu iki paralel kapasitörden (C_{i0}, C_{i1} x V_{uc}) oluşmaktadır. Şekil 2.7.'de gösterilen modelden farklı olarak, bu dal gerilime bağlı bir kapasitör (C_{i1} x V_{uc}) içermektedir. Cihazın terminal gerilimi arttıkça bu bileşenin kapasitansı artmaktadır. Bu gerilime bağımlı bileşen, şarj ve deşarj işlemleri başlatıldığında veya durdurulduğunda süperkapasitör terminal geriliminin hızlı yükselme ve düşme davranışını yansıtmak için modele konulmuştur. İkinci (R_d, C_d) ve üçüncü (R_l, C_l) dalları, sırasıyla dakika ölçeğinde ve on dakikadan uzun ölçekte süperkapasitör

davranışını temsil eden farklı zaman sabitlerine sahip seri RC konfigürasyonlarından oluşmaktadır. Son bileşenin (R_p) işlevi, Şekil 2.7.'de gösterilen model için tanımlanan EPR'nin işlevi ile aynıdır.

Şekil 2.7. ve Şekil 2.8.'de gösterilen modeller karşılaştırıldığında, Şekil 2.7.'de gösterilen modelin süperkapasitörlerin sadece temel elektrik davranışını temsil ettiği ve Şekil 2.8.'de gösterilen modelin süperkapasitör davranışını daha doğru temsil ettiği görülmektedir. Bununla birlikte, Şekil 2.7.'de gösterilen modelin basitliğinin analiz ve hesaplama perspektiflerinden, bir avantaj olarak göründüğü sonucuna da varılmaktadır [16].

2.5. Süperkapasitörlerin Tasarım Kriterleri

2.5.1. Gerilim Değerlendirmesi ve Güç Gereksinimine Dayalı Kriterler

2.5.1.1. Gerilim Penceresi

Miller ve Burke, gerilim penceresini kapasitörün çalıştırılabileceği gerilim aralığı olarak tanımlamaktadırlar [17]. Süperkapasitör tabanlı tasarımlarda gerilim penceresini dikkate almanın iki nedeni bulunmaktadır. Birincisi nominal gerilim, ikincisi ise tasarımda kullanılacak minimum gerilim seviyesidir. Gerilim derecelendirme kriteri tasarımların anahtar parametresidir çünkü süperkapasitörlerin terminal gerilimi nominal seviyenin üzerine çıktığında arızalar görülmeye başlanmaktadır. Maxwell Technologies, bir süperkapasitörün terminal geriliminin uzun süre nominal seviyenin üzerine çıkması durumunda, cihazın kapasitanstaki azalma ve ESR'deki artış açısından olumsuz etkilenmeye başladığını bildirmiştir. Öte yandan, kısa süreli gerilim yükselmelerinin süperkapasitörler tarafından tolere edildiğinden de bahsedilmektedir [4].

Pratik bir bakış açısıyla, süperkapasitörlerin sabit bir güç deşarj uygulamasında kullanıldıklarında sıfır volta boşaltılması mümkün olmamaktadır. Barrade vd. bu durumu, sabit bir güç deşarj uygulaması üzerinden düşünerek, sabit güç deşarj işlemi sırasında cihazın terminal gerilimi düştükçe süperkapasitör tarafından sağlanan akımın arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, deşarj işlemi altındaki süperkapasitörler için bir minimum gerilim seviyesi belirlenerek deşarj akımının sınırlandırılması gerektiğini vurgulamışlardır [21].

2.5.1.2. Polarite

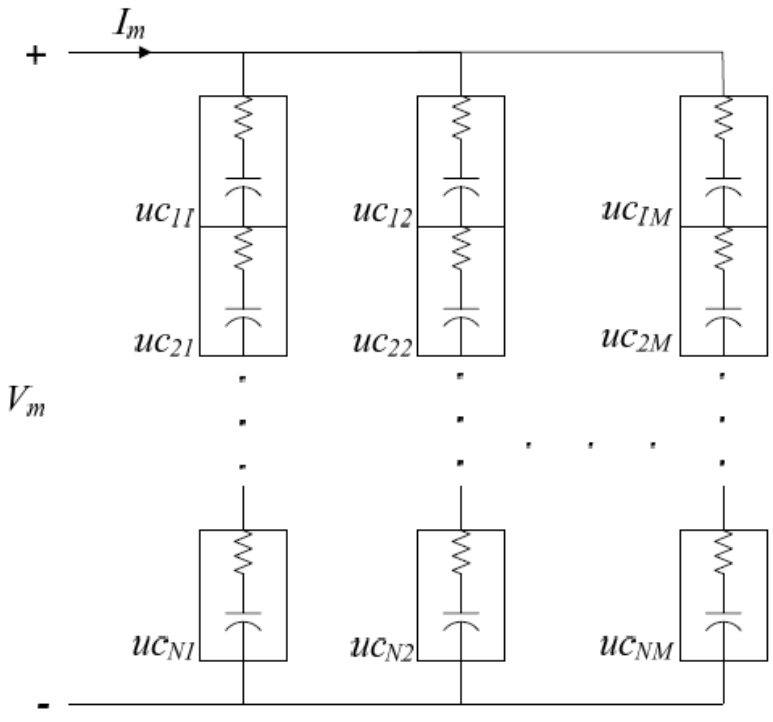
Süperkapasitörlerin pozitif ve negatif terminalleri aynı malzemelerden yapılmıştır. Bu nedenle teorik olarak, süperkapasitörler için pozitif ve negatif terminallerin tanımlanmasına gerek olmadığı söylenebilmektedir [22]. Bununla birlikte, pozitif ve negatif terminaller tüm ticari ürünlerde açıkça ifade edilmiştir ve cihazın zıt kutuplarda kullanılmaması tavsiye edilmektedir [1,2]. Bu tavsiyenin nedeni Maxwell Technologies'in bir uygulama notunda "Süperkapasitör belirli bir yönde şarj için koşullandırılmışsa ve sonra değiştirilmişse, bu koşullandırma nedeniyle ömrü kısalabilir." olarak açıklanmıştır [22].

2.5.1.3. Süperkapasitörlerin Uygulama Gereksinimlerine Göre Boyutlandırılması

Genellikle tek bir cihazın nominal geriliminden çok daha yüksek olan uygulamaların gerilim derecelendirme gereksinimini elde etmek için süperkapasitörler seri olarak bağlanmalıdır. Öte yandan seri bağlantı ile oluşturulan süperkapasitör modülleri bazı uygulamaların enerji depolama ihtiyaçları için yetersiz kalabilmektedir. Bahsedilen gereksinimin çözümü, seri olarak yapılandırılmış modülleri, önceki modüle paralel olarak aynı sayıda cihaza bağlamaktır. Bu şekilde NxM matris oluşturulmuş bir modül elde edilir. Nx1 ve NxM formlarındaki modüller, arıza göz önünde bulundurularak karşılaştırıldığında, NxM formlu modüllerin daha güvenilir olduğu görülmektedir. Çünkü Nx1 formlu modüllerde en kötü koşullandırılmış süperkapasitör baskın hale gelmektedir. Örneğin, bir süperkapasitör hücresi arızalanırsa ve açık devre olursa, Nx1 formundaki tüm modül açık devre davranışı gösterecektir. Diğer yandan, kalan M-1 dalları, NxM oluşturulmuş bir modülde, bir dal için açık devre durumu meydana gelirse etkili olacaktır. NxM matris formundaki bir modülün şematik temsili Şekil 2.9.'da gösterilmiş ve süperkapasitör modüllerinin özellikleri Tablo 2.2.'te özetlenmiştir.

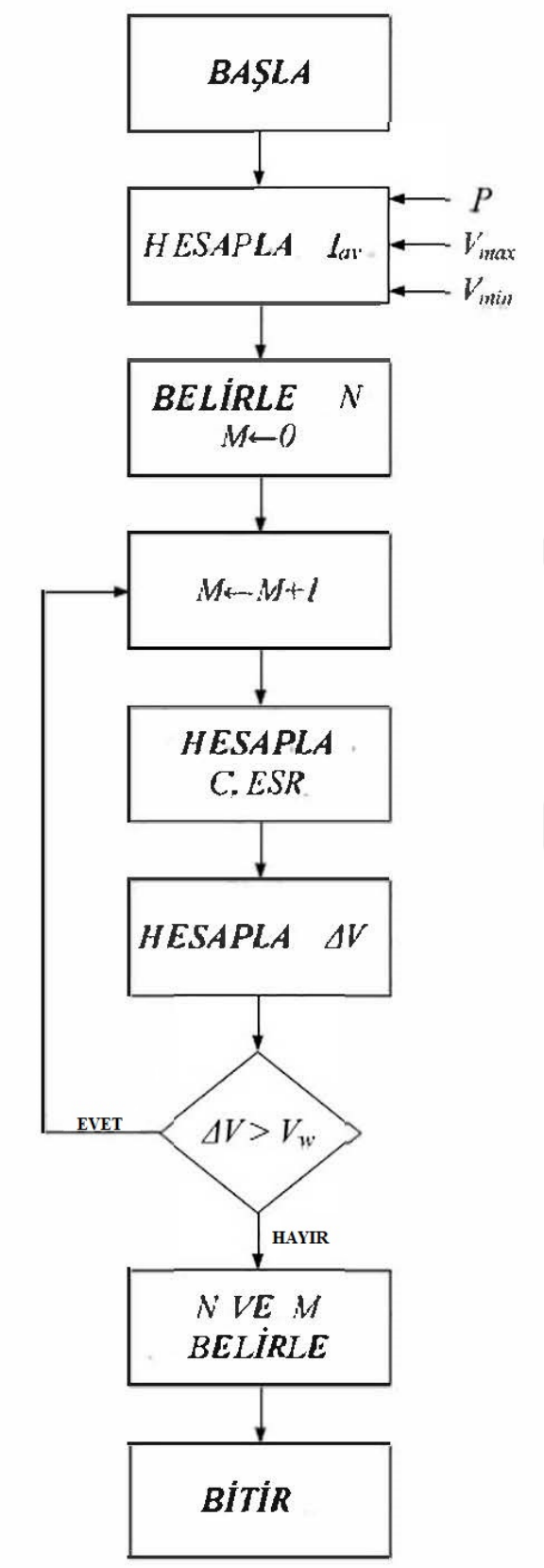
Tablo 2.2. Matrisle Oluşturulan Süperkapasitör Modüllerinin Özellikleri.

	Süperkapasitör (1x1)	*Modül (Nx1)*	*Modül (NxM)*
Gerilim Değeri	*V*	*VxN*	*VxN*
Kapasitans	*C*	*C/N*	*CxM/N*
ESR	R_S	R_S*xN*	R_S*xN/M*
Depolanan Enerji	*E*	*ExN*	*ExNxM*



Şekil 2.9. NxM Matrisinden Oluşan Süperkapasitör Modülünün Şematik Gösterimi.

Birçok çalışmada ve üreticilerin uygulama notlarında, boyutlandırma algoritmaları ve yöntemleri, NxM ile oluşturulmuş süperkapasitör modüllerinin uygun boyutunun belirlenmesi için verilmiştir [23,24]. Gerilim penceresi, güç darbelerinin genliği ve süresi süperkapasitör anahtar parametreleri olarak boyutlandırma yöntemine ve uygulama ihtiyaçlarına göre rapor edilmektedir. Bir süperkapasitör modülü boyutlandırma algoritmasının akış şeması Şekil 2.10.'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Süperkapasitör Modülü Boyutlandırma Algoritmasının Akış Şeması.

Bu algoritmadaki ilk adım, (2.21) - (2.24) 'de verildiği gibi, güç darbesinin (P) genliği ve uygulamanın gerilim penceresi (V_w) ile ilgili ortalama deşarj akımının (I_{av}) hesaplanmasıdır.

$$V_w = V_{\max} - V_{\min} \tag{2.21}$$

$$I_{\max} = \frac{P}{V_{\min}} \tag{2.22}$$

$$I_{\min} = \frac{P}{V_{\max}} \tag{2.23}$$

$$I_{av} = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} \tag{2.24}$$

I_{av} hesaplandıktan sonra, bir süperkapasitör modülünün bir dalındaki seri bileşenlerin sayısını temsil eden N parametresi, uygulamanın nominal gerilimine (V_{app}) ve (2.25) 'de verildiği gibi tek bir süperkapasitör hücresine (V_{rated}) göre hesaplanmaktadır.

$$N = \frac{V_{app}}{V_{rated}} \tag{2.25}$$

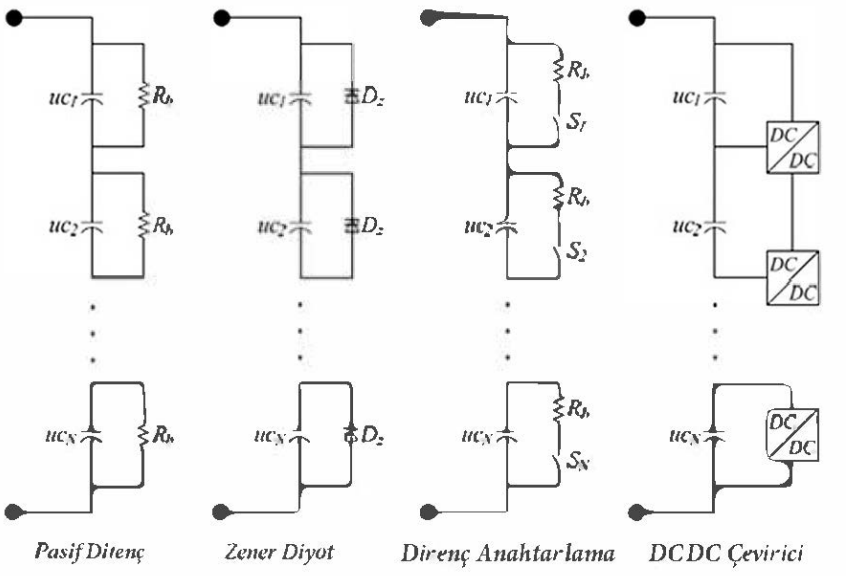
Sonraki adımda paralel dalların sayısını temsil eden M tek olarak başlatılmakta ve modülün gerilim değişimi (ΔV) darbe süresi (Δt) ve I_{av} (2.26)'da verildiği gibi Tablo 2.3'de gösterilen değerlere göre modülün kapasitansı ve ESR parametresi dikkate alınarak hesaplanmaktadır.

$$\Delta V = \frac{I_{av} \times \Delta t}{C} + I_{av} \times R_s \tag{2.26}$$

Bu hesaplamadan sonra ΔV, V_w ile karşılaştırılır. ΔV, V_w'den yüksekse, M bir artar ve aynı prosedür devam eder. Öte yandan, ΔV, V_w'den küçük veya ona eşit ise, o zaman N ve M'nin akım değerleri, matrisle oluşturulan süperkapasitör modülünün boyutları olarak kabul edilmektedir.

2.5.1.4. Gerilim Dengeleme Yapıları

Süperkapasitörler, seri olarak bağlanmış cihazlardan oluşan bir modül formunda kullanıldığında, her bir cihazın kapasitans ve EPR'sindeki farklılıklar nedeniyle tek tek süperkapasitörlerin gerilimi çeşitlilik göstermektedir [7,25,26]. Linzen vd. süperkapasitör modülü için uzun bir ömür beklentisi sağlamak amacıyla, tek tek süperkapasitör hücreleri arasındaki gerilim farklılıklarının gerilim eşitleme devreleri kullanılarak en aza indirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir [26]. Aynı referansa göre, gerilim dengeleme yapıları paralel direnç, zener diyot, anahtarlamalı direnç ve DC-DC dönüştürücü tabanlı dengeleme yapıları olarak dört gruba ayrılmaktadır [26]. Dengeleme yapılarının şematik gösterimleri Şekil 2.11.'de gösterilmektedir.



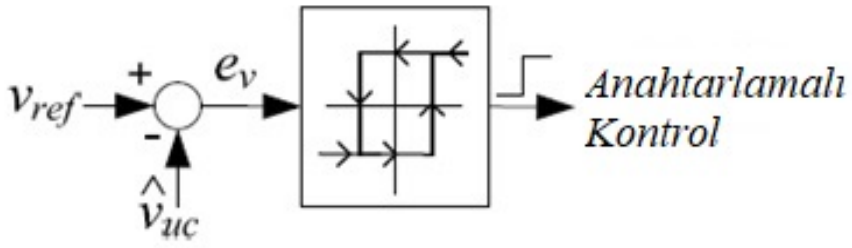
Şekil 2.11. Gerilim Dengeleme Yapılarının Şematik Gösterimleri.

İlk gerilim dengeleme devresi paralel direnç yapısıdır ve çalışması, dinlenme durumundaki bireysel süperkapasitörlerden mevcut sapmaya dayanmaktadır. Bu nedenle, süperkapasitör modülünün terminal gerilimi, paralel dirençler tarafından çekilen akıma göre ayrı süperkapasitörler arasında dağıtılmaktadır. Bu dirençlerin değerleri eşit ise modülün terminal gerilimi eşit olarak dağıtılacaktır. Dengeleme dirençlerinin seçimi, gerilim dengeleme işleminin hızını belirlemektedir. Düşük değerli dengeleme dirençleri ile hızlı kendi kendine deşarj oranları elde edilmektedir. Bu nedenle, bağımsız

süperkapasitörlerin terminal geriliminin eşitlenmesi hızlı olacaktır. Düşük değerli dengeleme dirençleri ise modülün güç kaybını artırmaktadır. Bu nedenle, modülün dengeleme hızı ile güç kaybı arasında bir ticaret olduğu sonucuna varılabilmektedir [27].

İkinci dengeleme yapısı, zener diyotlara dayanmaktadır. Bu yapıda, ayrı bir süperkapasitörün gerilimi, zener diyodunun gerilim değerinin üzerine çıktığında, gerilim regülasyonu, ilgili zener diyot tarafından, ayrı süperkapasitörden akım yönlendirme yoluyla sağlanmaktadır. Bu yapı da güç kaybına dayanmakta ve zener diyotların sıcaklığa bağımlılığı bu yapının bir dezavantajı olarak bildirilmektedir [26].

Anahtarlamalı direnç yapılandırması, üçüncü dengeleme yapısıdır. Bu yapının çalışma prensibi, gerilimleri önceden belirlenmiş bir seviyenin üzerine çıktığında bireysel süperkapasitörlerden akımın yönlendirilmesine dayanmaktadır [28]. Bu yapının kontrolünü gerçekleştirmek için Şekil 2.12.'de gösterilen histerez bazlı gerilim kontrol mekanizması uygulanmaktadır.



Şekil 2.12. Anahtarlamalı Direnç Kontrol Yapısının Blok Şeması.

Anahtarlamalı direnç yapısı, paralel direnç yapısı ile karşılaştırıldığında daha verimli bir konfigürasyondur. Ancak, gerilim ölçümü ve anahtar kontrol gereksinimleri bu yapının dezavantajları olmaktadır [26].

Son gerilim dengeleme konfigürasyonu, DC-DC dönüştürücü tabanlı yapıdır. Bu yöntemde gerilim eşitleme, gerilim seviyelerine göre ayrı süperkapasitörler arasında enerji aktarımı yoluyla elde edilmektedir. Bu yapının öncekilere göre en belirgin avantajı, daha yüksek verimliliktir, çünkü güç kayıpları yalnızca DC-DC dönüştürücülere maruz kalmaktadır. Öte yandan, DC-DC dönüştürücülerin modüle entegre edilmesi sisteme ekstra bir maliyet katmaktadır ve bu yöntemi uygulamak önceki yapılara göre zor olmaktadır [26].

2.5.2. Termal Kriterler

Enerji depolama mekanizmaları elektrokimyasal reaksiyonlara dayanmadığı için süperkapasitörler geniş bir sıcaklık aralığında kullanılmaktadırlar [4,22]. Organik elektrolitli bazı ticari ürünlerin çalışma ve saklama sıcaklık aralığı Tablo 2.3.'de özetlenmiştir.

Tablo 2.3. Bazı Süperkapasitör Ürünlerinin Çalıştırma Ve Saklama Sıcaklık Aralığı.

Üretici	*Ürün Parça Kodu*	*Çalışma Sıcaklık Aralığı*	*Depolama Sıcaklık Aralığı*
Maxwell	*BCAP1500*	*-40 °C to 65 °C*	*-40 °C to 70 °C*
Nesscap	*ESHSR-1200C0-002R7A5*	*-40 °C to 65 °C*	*-40 °C to 70 °C*
LS Mtron	*HV Series*	*-40 °C to 60 °C*	*-40 °C to 70 °C*
Ioxus	*RSC2R7508SP*	*-40 °C to 70 °C*	*-40 °C to 70 °C*

Maxwell Technologies ürün kılavuzunda, ürünlerinin kapasitansının tam sıcaklık aralığında sabit kaldığı ve sıcaklık düştükçe ürünlerinin ESR'sinin arttığı bildirilmektedir. Düşük sıcaklıklar için ESR'deki artış, düşük sıcaklıklarda iyonların hareketliliğindeki azalmadan kaynaklanmaktadır [4].

Bildirilen sıcaklık etkilerine göre, süperkapasitörlerin sıcaklığının uzun süre yüksek sıcaklık sınırına çok yakın tutulmaması gerektiği sonucuna varılmaktadır. Bu nedenle, süperkapasitörler termal yönetimle birlikte kullanılmalıdır. Termal yönetimde kullanılabilecek süperkapasitörlerin temel parametresi, ürün veri sayfalarında verilen termal direnç (R_{th}) değeridir. Cihazın sıcaklık artışı (ΔT), (2.27)'de verildiği gibi uygulanan akımın R_{th}, ESR (R_s), büyüklüğü (I) ve görev döngüsünün (d) bir fonksiyonu olarak ifade edilmekte ve süperkapasitör tabanlı enerji depolama sistemlerinin termal tasarımı bu denklem için dikkate alınmalıdır [4].

$$\Delta T = I^2 \times R_s \times R_{th} \times d \tag{2.27}$$

2.5.3. Döngü Kriterleri

Maxwell Technologies süperkapasitör ürünleri için bir milyon şarj ve deşarj döngüsünde kapasitansta %20 azalma ile karşılaşılacağı bildirilmiştir [4]. Kapasitanstaki bu azalma, cihazların ömürlerinin sonu olarak kabul edilmektedir [1]. Süperkapasitörler çok sayıda döngü işlemi için kullanılabildiğinden, bu cihazlar çok sayıda şarj ve deşarj döngüsü gerektiren uygulamalara kolayca entegre edilebilmektedir.

2.6. Süperkapasitörlerin Diğer Enerji Depolama Cihazları ile Karşılaştırılması

Süperkapasitörler nispeten yeni cihazlar olduğundan, bunları diğer enerji depolama cihazlarıyla karşılaştırmak mümkündür. Süperkapasitörler ile diğer enerji depolama cihazları arasında karşılaştırma yapan çalışmaların çoğunda enerji ve güç yoğunluğu, şarj ve deşarj süresi ve çevrim ömrü parametreleri dikkate alınmaktadır. Maliyete göre süperkapasitörleri farklı enerji depolama cihazlarıyla karşılaştırmak da önemlidir. Süperkapasitörler, Maxwell Technologies tarafından verilen bilgiler kullanılarak Tablo 2.4.'teki kurşun asit piller ve geleneksel kapasitörlerle karşılaştırılmıştır [29].

Tablo 2.4. Süperkapasitörlerin Diğer Enerji Depolama Cihazlarıyla Karşılaştırılması.

Parametre	*Kurşun Asit Batarya*	*Süperkapasitör*	*Elektrolitik Kapasitör*
Şarj Süresi	*1-5 saat*	*0.3-30 saniye*	*10^{-6} - 10^{-3} saniye*
Deşarj Süresi	*0.3-3 saat*	*0.3-30 saniye*	*10^{-6} - 10^{-3} saniye*
Şarj/Deşarj Verimliliği	*0.7-0.9 saat*	*0.85-0.98*	*>0.95*
Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	*10-100*	*1-10*	*<0.1*
Güç Yoğunluğu (Wh/kg)	*<1000*	*<10000*	*<100000*
Döngü Sayısı	*<1000*	*>500000*	*>500000*

2.6.1. Enerji ve Güç Yoğunluğu

Enerji yoğunluğu açısından farklı enerji depolama cihazları karşılaştırıldığında ve sunulan enerji yoğunluklarına göre sıralandıklarında süperkapasitörlerin pil teknolojisine alternatif olmadığı görülmektedir. Öte yandan, süperkapasitörlerin enerji yoğunluğunun geleneksel kapasitörlerden (örneğin elektrolitik kapasitörler) daha yüksek olduğu da görülmektedir. Güç yoğunluğu açısından, süperkapasitörlerin güç yoğunluğunun pillerden daha yüksek olduğu açıktır. Konvansiyonel kondansatör tarafında, süperkapasitörlerin güç yoğunluğunun konvansiyonel kondansatörlerin güç

yoğunluğundan daha düşük olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, süperkapasitörlerin uzun süre yüksek güç darbeleri gerektiren uygulamalar için uygun olduğu söylenebilmektedir.

Ayrıca, yüksek enerji yoğunluğuna sahip büyük enerji depolama cihazlarının gerekli olduğu bazı uygulamalarda süperkapasitörlerin uygun olmayabileceği sonucuna varılmaktadır. NaS piller, li-ion piller, yakıt pilleri gibi enerji depolama cihazı türleri, büyük enerji depolama uygulamaları için iyi seçeneklerdir. Öte yandan, süperkapasitörlerin yüksek güç yoğunluğu düşünüldüğünde, süperkapasitörler enerji depolama uygulamaları için tamamlayıcı bir teknoloji olarak görülmektedir.

2.6.2. Şarj ve Deşarj Süresi

Süperkapasitörler ve piller, şarj ve deşarj süreleri açısından karşılaştırıldığında, süperkapasitörlerin daha kısa ve simetrik şarj ve deşarj süresi değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle süperkapasitörlerin piller için mümkün olmayan yüksek akım seviyeleri ile hem şarj edilebileceği hem de deşarj edilebileceği söylenebilmektedir. Klasik kondansatör tarafında düşük enerji ve yüksek güç yoğunluğu nedeniyle bu cihazların şarj ve deşarj sürelerinin süperkapasitörlere ve bataryalara göre son derece düşük olduğu görülmektedir.

2.6.3. Döngü Ömrü

Akülerin şarj ve deşarj işlemleri elektrokimyasal reaksiyonlarla sürdürülmektedir. Bu nedenle, elektrokimyasal reaksiyonların oksidasyonu ve termal etkileri nedeniyle pillerde deformasyon etkilerine sıklıkla rastlanmaktadır. Bu deformasyon etkileri ile pillerin enerji depolama parametreleri kullanıldıkça bozulmaya başlamaktadır [14]. Öte yandan, şarj ve deşarj işleminden kaynaklanan deformasyon etkileri, bu cihazların enerji depolama mekanizmalarının elektrokimyasal reaksiyonlara dayanmaması nedeniyle süperkapasitörlerde pillere göre daha düşüktür. Bu nedenle, süperkapasitörlerin çevrim ömrü parametresi pillerden daha yüksektir. Benzer açıklama, döngü ömrü açısından geleneksel kapasitörler için de doğru olmaktadır.

2.6.4. Maliyet

Enerji depolama cihazlarının birim enerji depolama kapasitesi başına maliyeti, enerji depolama cihazlarının pratik kullanımı için çok önemlidir. Bu anlamda, Digi-Key Corporation web sitesinden temin edilen cihazların birim maliyeti ve enerji depolama kapasitesi açısından dört farklı ticari enerji depolama cihazının karşılaştırması Tablo 2.5.'de gösterilmiştir.

Tablo 2.5. Farklı Ticari Enerji Depolama Cihazlarının Cihaz Maliyeti Açısından Karşılaştırılması. (* www.Digikey.Com)

Tür	*Üretici*	*Parça No*	*Enerji (kJ)*	*Fiyat ($)*	*Fiyat/Enerji*
LA Batarya	*Panasonic*	*LC-R127R2P*	*311.040*	*35.51*	*0.114*
Li-Ion Batarya	*Panasonic*	*BR-CSSP*	*54*	*10.2*	*0.19*
Süperkapasitör	*United Chemicon*	*DDSC2R5LGN242KS4BS*	*7.5*	*137.5*	*18.33*
Al.Elektrolitik Kapasitör	*United Chemicon*	*ESMH101V5N682MA50T*	*0.034*	*6.1*	*179.41*

Tablo 2.5.'ye göre en ucuz enerji depolama cihazının kurşun asit batarya olduğu görülmekte ve bu sonuç kurşun asit batarya kullanımının birçok enerji depolama uygulamasında neden çok yaygın olduğunu açıklamaktadır. Birim enerji depolama kapasitesi başına süperkapasitörün maliyetinin, birim enerji depolama kapasitesi başına pil maliyetinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle, enerji depolama uygulamalarında süperkapasitörlerin kullanımının, cihazın maliyeti düşerse yaygın olacağı sonucuna varılmaktadır. Öte yandan, birim enerji depolama kapasitesi başına süperkapasitörün maliyetinin, alüminyum elektrolitik kondansatörden neredeyse on kat daha düşük olduğu da görülmektedir. Bu nedenle, enerji depolama uygulamalarında süperkapasitör kullanımının alüminyum elektrolitik kapasitörlerin kullanımından daha ucuz olduğu sonucuna varılmaktadır.

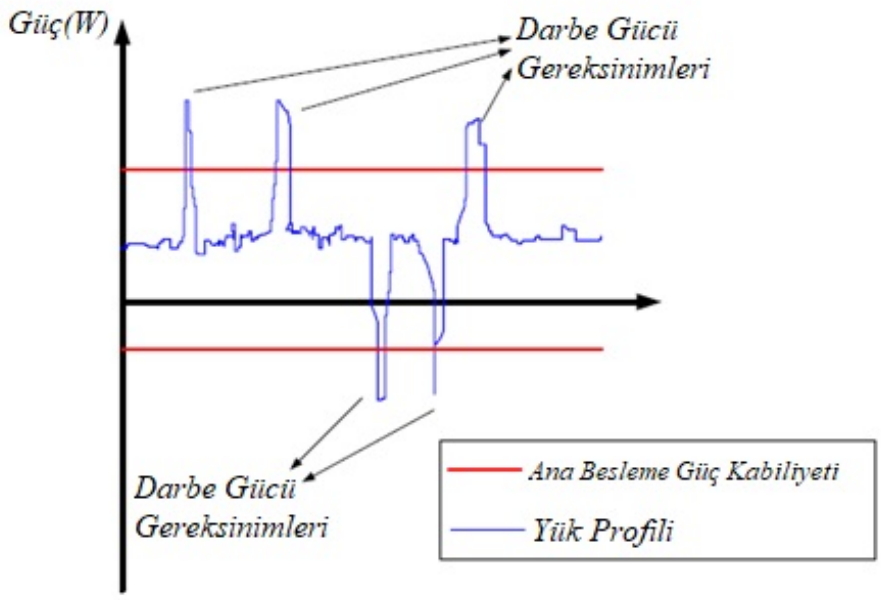
2.7. Süperkapasitörlerin Tipik Uygulamaları

Günümüzde uygulamaların güç ve enerji ihtiyacının tamamını veya bir kısmını sağlamak için süperkapasitörler sistemlere uygun boyutlandırma ile entegre edilmeye başlamıştır.

Bakım gerektirmeyen yapısı ve diğer sistem bileşenleri için darbe gücü gereksinimlerini karşılayarak ömür artırıcı etkisi nedeniyle süperkapasitörler, sistemlerin güvenilirliğini ve performansını artıran cihazlar olarak görülmektedirler. Bu nedenle, tüketici elektroniği, endüstriyel sistemler, ulaşım mühendisliği vb. uygulamalarda süperkapasitörler kullanılmaya başlanmıştır [4]. Genel olarak, süperkapasitörlerin tipik uygulamaları darbe gücü, köprü gücü, güç kalitesi, ana güç ve bellek yedekleme uygulamaları olarak sınıflandırılmaktadır [4].

2.7.1. Darbe Gücü Uygulamaları

Süperkapasitörler düşük ESR ve yüksek kapasitans değerlerine sahip cihazlar olduğu için bu cihazlar, önceki bölümlerde bahsedildiği gibi uygulamaların uzun süreli darbe güç ihtiyaçlarını karşılayabilmektedir. Bir darbeli güç uygulamasının tipik bir yük profili Şekil 2.13.'te gösterilmektedir.

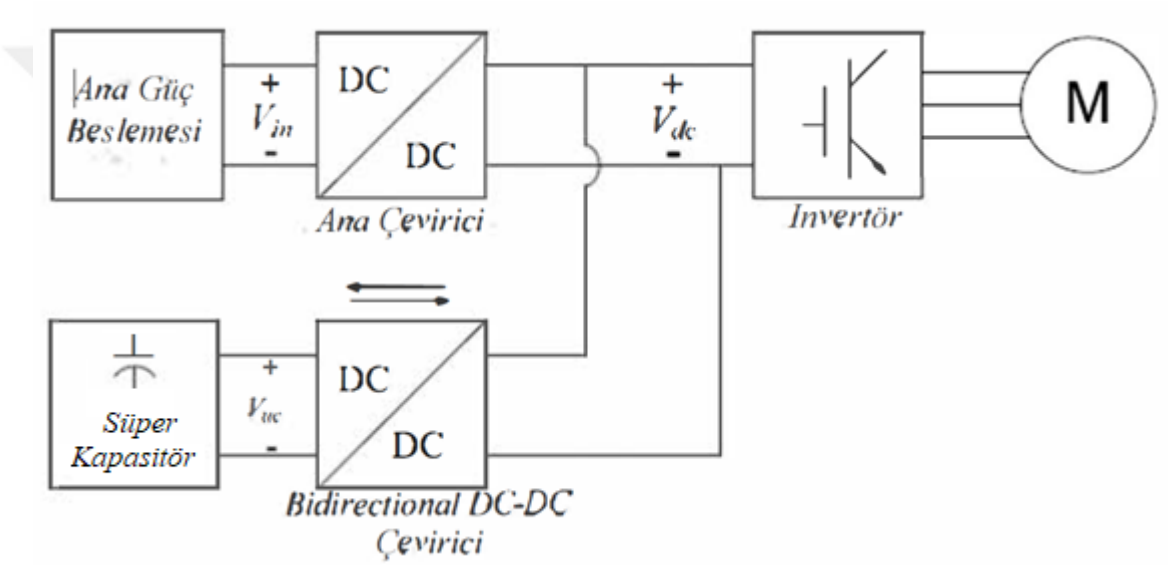


Şekil 2.13. Darbe Gücü Gereksinimleri Olan Tipik Bir Yük Profili.

Şekil 2.13.'te gösterilene benzer bir yük profiline sahip uygulamalarda, piller, jeneratörler veya yakıt hücreleri gibi cihazlardan ortalama güç gereksinimlerini ve süperkapasitörlerden darbe güç gereksinimlerini sağlamak yaygın olarak uygulanmaktadır [14]. Darbe güç gereksinimlerini sağlamak için süperkapasitörlerin

kullanılması, ortalama güç gereksinimlerini sağlayan cihazların eskimesini önlemektedir [4].

Hızlanma durumunda elektrikli bir aracın darbe gücü ihtiyacının sağlanması ve frenleme durumunda ortaya çıkan rejeneratif enerjinin depolanması, darbe güç alanındaki süperkapasitörlerin en çekici uygulamalarındandır [4]. Süperkapasitörlerin bu uygulamalarda kullanımı, iki yönlü DC-DC dönüştürücüler aracılığıyla sağlanmaktadır [30,31]. Bu uygulamalarda çift yönlü DC-DC dönüştürücüler, süperkapasitörlerin hem şarj hem de deşarj işlemlerini sağlamaktadır. Süperkapasitör destekli elektrikli araç uygulamasının blok diyagramı Şekil 2.14.'te gösterilmektedir.



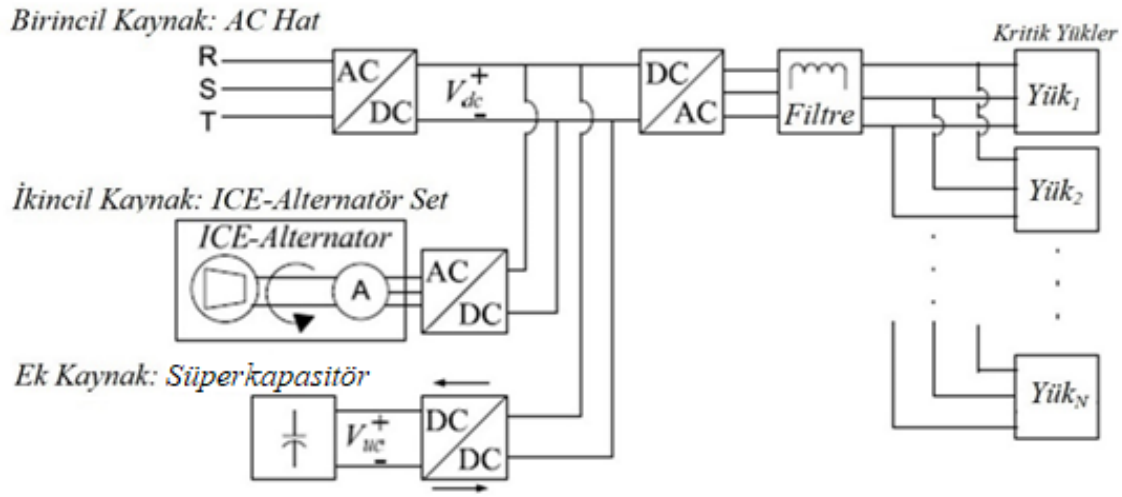
Şekil 2.14. Süperkapasitör Destekli Elektrikli Araç Uygulamasının Blok Diyagramı.

Süperkapasitörler, bahsedilen elektrikli araç uygulamasından ziyade çeşitli darbeli güç uygulamalarında da kullanılabilmektedir. Taşınabilir elektronik cihazların darbe gücü gereksinimlerini karşılayan, içten yanmalı motorların çalıştırılması, darbe güç alanındaki diğer süperkapasitör uygulamalarından bazılarıdır [4,32].

2.7.2. Köprü Güç Uygulamaları

Köprü gücü, birincil ve ikincil kaynaklar arasındaki bir geçiş döneminde yardımcı bir kaynaktan güç sağlamaya ilişkin bir kavramdır. Bu geçiş döneminde yardımcı malzemeler köprü benzeri bir işlem gerçekleştirmektedir. Süperkapasitörlerin enerji ve güç yoğunluğu dikkate alındığında bu cihazların, uygulamaların köprü güç

gereksinimlerini karşılayabildiği görülmektedir. Kesintisiz güç kaynaklarında (UPS) süperkapasitörlerin kullanılması bu alandaki en yaygın uygulamalardan biridir [4]. Şekil 2.15.'te, içten yanmalı motor (ICE) alternatör setinin ikincil kaynak olarak kullanıldığı ve yardımcı kaynak olarak süperkapasitör modülünün kullanıldığı bir UPS topolojisi gösterilmektedir [33].



Şekil 2.15. Süperkapasitör Destekli UPS Uygulamasının Blok Diyagramı.

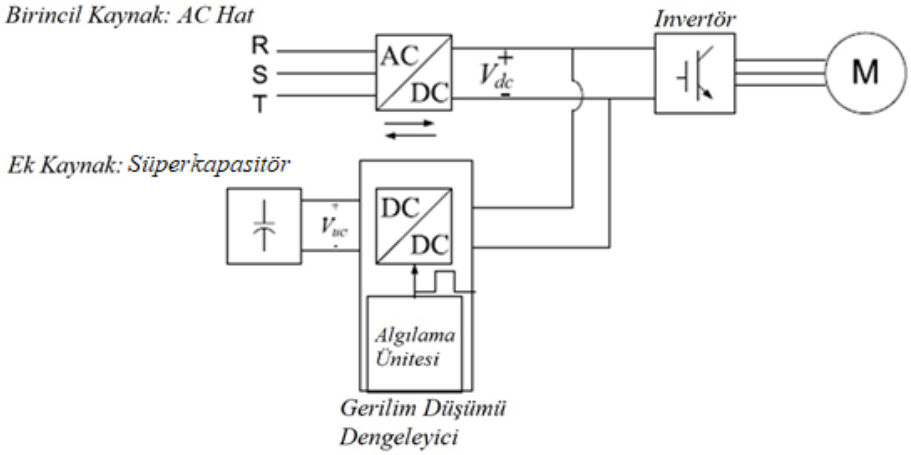
Şekil 2.15.'de gösterilen UPS yapısında AC hattı kesintiye uğradığında, ICE alternator seti etkin hale gelmekte ve kritik yükleri beslemektedir. Ancak, ICE alternatör setinin sistemi tam olarak düzenleyebilmesi için bir yanıt süresi gereklidir. Bu topolojide ICE alternator setinin kritik yanıt süresinde sistemin güç gereksinimi, daha hızlı yanıt süresine sahip süperkapasitör modülü ile sağlanmaktadır.

Geleneksel UPS sistemlerinde, köprü güç ihtiyacı akü blokları aracılığıyla sağlanmaktadır. Bununla birlikte, bu cihazların enerji depolama mekanizması elektrokimyasal reaksiyonlara dayandığından, pil bloklarının önceden belirlenmiş zaman aralıklarında muhafaza edilmesi gerekmektedir. Bu durum uzun süreli perspektifte UPS sisteminin hizmet maliyetini artırmaktadır [34]. Öte yandan, süperkapasitör destekli bir UPS sisteminin hizmet maliyeti, süperkapasitörlerin yaşlanma davranışının akülerden önemli ölçüde daha yavaş olması nedeniyle azalmaktadır.

2.7.3. Güç Kalitesi Uygulamaları

Günümüzde, inverter tabanlı motor sürücü sistemleri, endüstriyel süreçlerin çoğunda yaygın olarak kullanılmaktadır [35,36]. Endüstriyel proseslerin çıktılarından yüksek kaliteli ürünler elde etmek için motor sürücü sistemlerine sağlanan elektrik gücünün, güç kalitesi standartlarını karşılaması gerekmektedir. Bu alandaki en yaygın sorunlardan biri, IEEE Standardı 1159-1995 "Elektrik Enerjisi Kalitesi için Önerilen Uygulama" da, besleme geriliminin yarım periyodunda besleme geriliminde bir dakikadaki %10-90 azalma olarak tanımlanan gerilim düşüş durumudur. Bu durumla, motor çalıştırma işlemleri harekete geçtiğinde endüstriyel alanlarda sıklıkla karşılaşılmaktadır [37]. Besleme gerilimindeki söz konusu kısa vadeli düşüş, üretim çıktılarının kalitesini düşürmektedir. Örneğin tekstil fabrikalarında gerilim düşmelerinden dolayı arızalı ürünler üretilmektedir [37].

Hatalı imalat çıktılarını önlemek için gerilim sarkmaları telafi edilmelidir. Bu kompanzasyon kavramı, genel olarak "Gerilim Düşüşlerinde Sürme" olarak bilinmektedir. Bu nedenle, motor sürücü sistemi bir sürüş üzerinden dengeleme sistemi ile entegre edilirse, daha iyi üretim sonuçları elde edilebilmektedir. Sürme sistemi, bir gerilim düşüşü algılama birimi ve bir güç elektroniği dönüştürücüsü tarafından kontrol edilen bir yardımcı kaynaktan oluşmaktadır [37]. Süperkapasitörler bu perspektifte yardımcı kaynaklar olarak kullanılabilmektedirler [32]. Süperkapasitör destekli sürme sistemin blok diyagramı Şekil 2.16.'da gösterilmektedir; burada DC bara gerilimi, gerilim düşüşü durumunda bir süperkapasitör modülü tarafından düzenlenmektedir.



Şekil 2.16. Süperkapasitör Destekli Bir Sistemden Geçişin Blok Diyagramı.

2.7.4. Ana Güç ve Bellek Yedekleme Uygulamaları

Süperkapasitörler, şarj ve deşarj zaman değerlerinin küçük olduğu ve kısa süreler için güç gerektiren uygulamalarda birincil kaynak olarak kullanılabilmektedir. Bu alandaki yaygın örnekler oyuncaklara, el fenerlerine ve acil kapı güç uygulamalarına güç sağlamaktır [4]. Süperkapasitörlerin birincil enerji kaynağı olarak kullanılmasının yanı sıra, bir diğer önemli alan da süperkapasitörlerin bellek yedekleme uygulamalarında kullanılmasıdır. Süperkapasitörler, kritik koşullarda bellek birimlerini beslemek için tam şarjlı durumda tutularak bir bellek yedekleme amacıyla kullanılabilmektedir. Bu anlamda, süperkapasitörler otomatik sayaç okuma (AMR), mikrodenetleyici ve kart bellek alanlarında uygulama bulmaya başlamıştır [4,32].

BÖLÜM 3. FONKSİYONEL BİRİMLER

3.1. Ana Kontrol Birimi

Sistem, anlık olarak alternatör veya akümülatör gibi kaynaklarının durumunu kontrol etmektedir. Amaç, bağlı olan yük sistemin araçtaki güç kaynağı arızası, kesintisi gibi durumlarda yedek gücün gerekli süre boyunca sağlanmasıdır. Bunun denetimi Ana Kontrol Birimi tarafından sağlanmaktadır. Bu denetimler bir mikrokontrolcü yardımı ile yazılımların ve donanımların eşlenik çalışması ile mümkün olmaktadır.

- Donanım
- Yazılım
- Mekanik

3.2. Koruma Birimi

Askeri araçlar için hazırlanan elektrik ve elektronik güç sağlayıcı ekipmanlarda uygunluğu gösterilmesi gereken 2 önemli askeri standart vardır;

- MIL-STD-1275
- MIL-STD-461

3.2.1. MIL-STD-1275

MIL-STD-1275, askeri araçlardaki 28-VDC elektrik sistemlerinin özelliklerini kapsayan ve askeri yer platformu elektrik sistemleri için ayrıntılı gereksinimleri sağlayan askeri bir standarttır [38]. Bu standart;

- Elektromanyetik uyumluluk (EMC),
- Başlatma modu,

- Normal çalışma modu,
- Yalnızca jeneratör modu işletimi ve bunlarla ilişkili artışlar,
- Dalgalanmalar ve çalışma sınırları gibi konuları kapsamaktadır.

MIL-STD 1275 uyumlu güç kaynağının, kendisine veya onun bu kaynak tarafından beslemesi yapılan elektronik donanımlara zarar vermeden standartta belirtilen geçici gerilimlere dayanması gerekmektedir. Beslemesi yapılan bu elektronik donanımların Ani gerilim yükselmeleri ve dalgalanmaların da zarar görmeden dayanım sağlamasının yanı sıra, bu gerilim sinyalinin sivri uçları(spike signals) ve dalgalanmaları eşik gerilim değerleri üzerinde olması durumunda bile kaynağın yüklerine temiz ve iyi düzenlenmiş güç sağlamaya devam ettirmesi önemlidir.

Askeri ortamlardaki bilgisayarlar, güçlü radyo, radar ve mikrodalga vericiler gibi diğer ekipmanların yanı sıra oldukça hassas alıcılar ile bir arada bulunmaları gerektiğinden, MIL-STD-1275 askeri EMI/EMC standardı MIL-STD-461'in gerekliliklerini içermektedir. Bu standart, yayılan ve iletilen emisyonları ve duyarlılığı yönetmektedir. Bu şekilde, elektrik sistemleri üretebilecekleri gürültü miktarı ve hangi tür ve seviyelerde paraziti tolere ettikleri ile sınırlı kalmaktadırlar. MIL-STD-461 duyarlılık gereksinimlerini karşılamanın bir parçası olarak, MIL-STD-1275, cihazın dayanabilmesi ve yine de düzgün şekilde çalışması gereken iletilen RF enerjisi miktarını belirlemektedir. Örneğin, 30 Hz ila 5 kHz arasında, cihaz, DC besleme geriliminin üstüne eklenen 126 dBµV'ye (yaklaşık 2 Vrms) dayanabilmelidir.

3.2.2. MIL-STD-461

MIL-STD-461, askeri teçhizat için elektromanyetik girişim (EMI) limitlerini ve test prosedürlerini belirleyen askeri bir standarttır [39].

EMI, elektronik ekipman tarafından üretilen herhangi bir istenmeyen sinyalden, "gürültüden" oluşmaktadır. EMI'yi kontrol altında tutmak, askeri uygulamalar için çok önemlidir çünkü diğer ekipmanlarla etkileşime neden olabilmekte ve düşman tarafından tespit edilebilmektedir.

Standart, ekipman tarafından üretilen emisyonların yanı sıra ekipmanın harici emisyonların varlığında bozulmuş çalışmaya karşı duyarlılığını ele almaktadır. Yürütülen

ve yayılan yollarla aktarılan EMI için test prosedürleri ve limitleri tanımlanmaktadır. Sınırlar uygulamaya (ör. Yer, hava, gemi vb.) ve ekipmanın konumuna (ör. Güverte üstü, güverte altı, uçuş hattı vb.) bağlı olarak değişmektedir. Standart bu limitleri önerirken, tüm ekipmanın en iyi entegrasyonunu sağlamak için seviyelerin ayarlanmasını tavsiye etmektedir. Bu standart;

- Gerçekleştirilen Emisyonlar
- İletilen duyarlılık
- Yayılan Emisyonlar
- Yayılan Duyarlılık gibi konuları kapsamaktadır.

3.3. Ölçüm Birimi

3.3.1. Gerilim Değeri Ölçümü - ADC

Analogdan Dijitale Dönüştürücüler (ADC'ler), bir analog gerilimi bir ikili sayıya (1'ler ve 0'lar) ve ardından bir sayaç, monitör veya çizelge üzerinde okumak için bir dijital sayıya (10 tabanı) dönüştürmektedirler. Dijital sayıyı temsil eden ikili rakamların (bit) sayısı ADC çözünürlüğünü belirlemektedir. Bununla birlikte, dijital sayı, belirli bir andaki analog gerilimin gerçek değerinin yalnızca bir tahminidir, çünkü gerilim yalnızca ayrı adımlarla (dijital olarak) gösterilebilmektedir. Dijital sayının analog değere ne kadar yakın olduğu da ADC çözünürlüğüne bağlıdır.

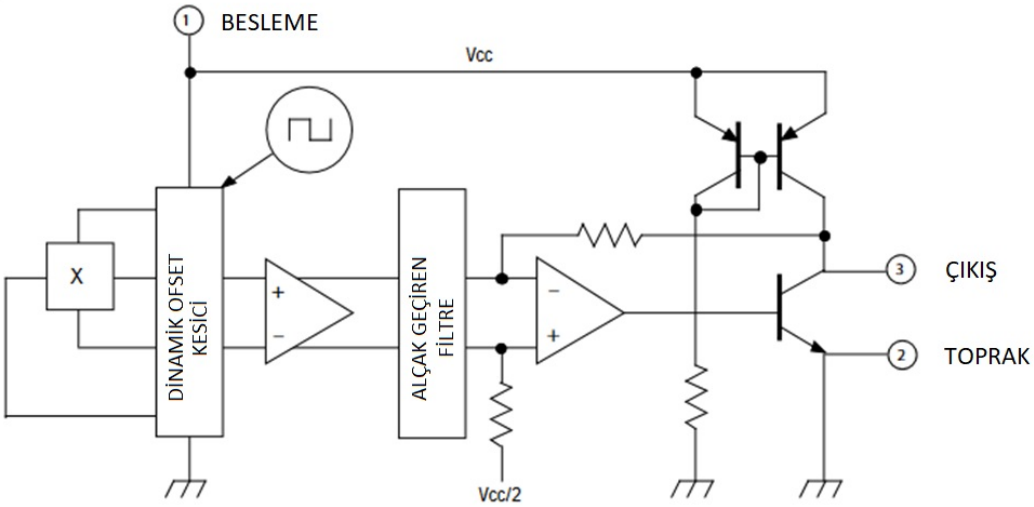
Bir matematiksel ilişki, bir ADC'nin işlediği bit sayısının özel teorik çözünürlüğünü nasıl belirlediğini rahatlıkla göstermektedir: Bir n-bit ADC, 2n'de bir parçalık bir çözünürlüğe sahiptir. Örneğin, 12 bitlik bir ADC'nin bir bölümü 4.096'da çözünürlüğü vardır, burada 212 = 4.096 olmaktadır. Bu nedenle, maksimum 10 VDC girişli 12 bitlik bir ADC, ölçümü 10VDC / 4096 = 0.00244 VDC = 2.44 mV olarak çözmektedir. Benzer şekilde, 0 ila 10 VDC aralığı için, 16 bitlik bir ADC çözünürlüğü 10/216 = 10 / 65,536 = 0,153mV'dir. Çözünürlük genellikle, belirli bir anda ölçülen değere göre değil, ADC'nin tam aralık okumasına göre belirlenmektedir.

- Ardışık Yaklaşım ADC'leri
- Gerilimden Frekansa ADC'ler

- ADC'leri Entegre Etme: Çift Eğim
- Sigma-Delta ADC'leri

3.3.2. Akım Değeri Ölçümü – Hall-Efekt Sensör

Hall etkisi sensörleri, dirençli akım algılama yöntemleriyle ilişkili büyük miktarlarda boşa harcanan gücü (ve sonuçta ortaya çıkan ısıyı) dağıtmadan, "müdahaleci olmayan" mevcut algılama teknikleri ve yüksek akım seviyelerinin güvenli, izole tespitini sağlamaktadır. Dahası, Hall etkisi akım algılama, akım taşıyan iletkenin elektriksel izolasyonunu, dolayısıyla devreler, operatörler vb. için güvenli bir ortam sağlamaktadır. Şekil 3.1.'de Hall-Effect Devre Şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Hall-Effect Devre Şeması.

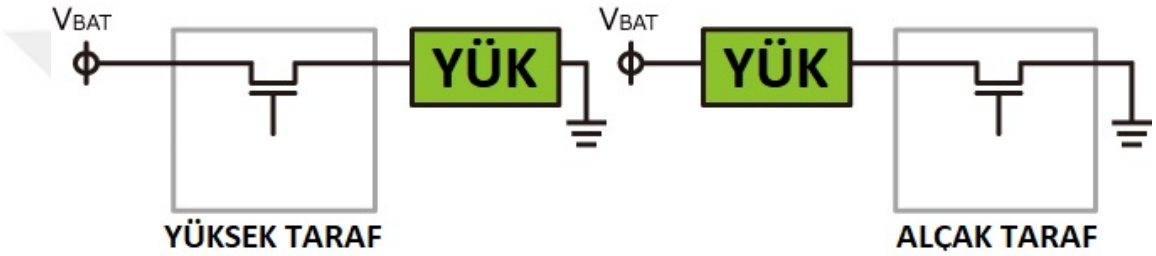
Hall etkisi sensörleri için çoğalan akım algılama uygulamaları devam etmekte; daha da çeşitli hale gelmektedir. Ek olarak diğer tasarımcılar sistemleri korumaya, daha güvenilir "kurşun geçirmez" ekipmanlar oluşturmaya ve her türlü güvenlik sorununu çözüme kavuşturmaya çalışırken genişlemekte ve büyümektedir. Akım algılama için uygun maliyetli Hall etkisi sensörlerinin başlıca uygulamaları şunları içermektedir:

- Mevcut Dengesizlik
- Mevcut İzleme
- Operatör / Kullanıcı Güvenliği ve Güvenliği

- Aşırı Akım Algılama / Sistem Koruması
- Sistem Teşhisi ve Arıza Tespiti
- Test ve Ölçüm

3.4. Güç Birimi

Sistem çıkış vereceği kaynağı seçtikten sonra MOSFET sürme işlemi yaparak güç aktarımı sağlar. Bu MOSFET sürme işlemi için Düşük Taraf (Low Side) ve Yüksek Taraf (High Side) olarak iki yöntem bulunmaktadır.



Şekil 3.2. Alçak ve Yüksek Taraf MOSFET Anahtarlama Teknikleri

Yüksek Taraf anahtarlama kullanan sistemlerde, anahtar pozitif güç hattı ile yük arasına yerleştirilir. Aksine Alçak Taraf anahtarlama, yükü negatif hatta bağlar.

N-tipi MOSFET'ler, P-tipi MOSFET'lerden genel yapısı itibari ile daha fazla akım taşıyabildiğinden, ağır yükleri anahtarlamak için tercih edilmektedir. Yüksek taraf anahtarlama için N tipi bir transistör kullanmak mümkündür, ancak kaynağa / vericiye bağlı yük geriliminden daha yüksek bir kontrol gerilimi gerektirir. Bu sebeple de Yüksek Taraf anahtarlama yönteminde genellikle özel sürücülere ihtiyaç duyulmaktadır. N tipi cihazlarla Alçak Taraf anahtarlama, Yüksek Taraf anahtarlamadan daha kolaydır ve genellikle özel sürücülere ihtiyaç duyulmaz [40].

Yüksek taraf anahtarlama, toprağa kısa devrelerin pozitif güç hattına kısa devrelerden daha olası olduğu durumlarda tercih edilen anahtarlama tekniğidir. Örneğin yapının veya gövdenin çoğunun toprağa bağlı olduğu arabaları veya makineleri düşünün. Bu gibi durumlarda yükü aküden ayırmak topraktan daha güvenlidir. Nemli ortamlarda, yük kapalı durumda hiçbir gerilim taşımadığından bu genellikle daha az konektör korozyonuna neden olur [41].

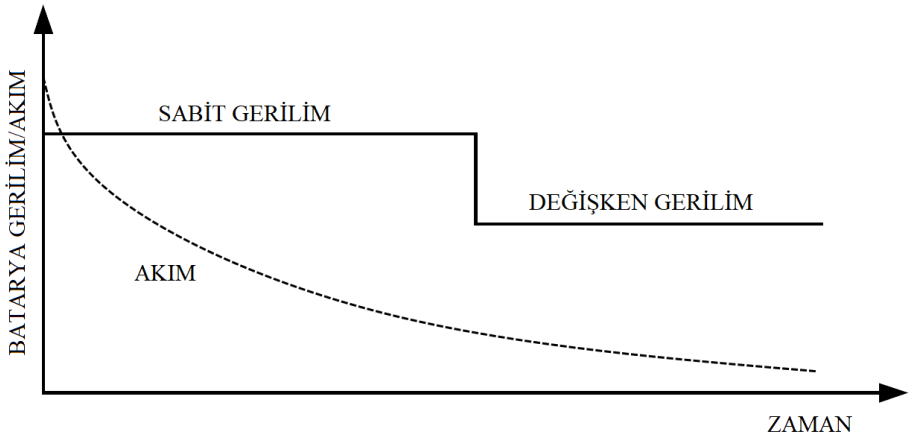
3.5. Şarj ve Deşarj Birimi (Yük ile Birlikte)

Son yıllarda, elektrikli araçlar dünyanın her yerinde kullanılmaya başlanmıştır. Çoğu, yüksek güç yoğunluğu ve küçük boyutlarından dolayı güç kaynağı olarak LiNi0.8Co0.2O2, LiNiO2, LiMn2O4 ve LiFePO4 gibi lityum-iyon pilleri kullanılmaktadır [42]. Ancak, yüksek kapasiteli bataryaları şarj etmek zordur. Bu nedenle hem hızlı şarj hem de bataryanın ömrünün nasıl uzatılacağı önemli bir konu haline gelmiştir.

Bir bataryanın şarj ve deşarj olma kabiliyeti bataryanın tasarımı, şarj durumu, sıcaklığı, daha önceki çevrim geçmişi ve kullanımı gibi birçok unsura bağlıdır. Bu çoğul bağımlılık, bataryanın şarj durumu tespitini ve şarj yöntemlerini karmaşık hale getirmektedir. En çok kullanılan batarya şarj yöntemleri; sabit akımda şarj, sabit gerilimde şarj ve sabit akım-sabit gerilim (İki basamaklı) şarj olarak sıralanabilmektedir. Batarya şarj ederken genel eğilim, bataryaya zarar vermeden kısa sürede şarj olabilmesi için şarj cihazının ve bataryanın limitleri çerçevesinde, bataryaya maksimum şarj akımı sağlamaktır [5]. Bu durumda batarya şarjlama işlemi iki durumda incelenmektedir. Bunlar; Yüksek akım şarj durumu ve sızıntı akım şarj durumudur [6]. Şarj işleminin büyük bir kısmı yüksek akım ile gerçekleşmektedir. Şarj işleminin sonlarına doğru bataryadaki iç direncin yükselmesinden dolayı oluşabilecek zararlı durumlardan kaçınmak için, şarj işlemi sızıntı akımları ile sonlandırılmaktadır [43].

3.5.1. Sabit Gerilimde Şarj Etme

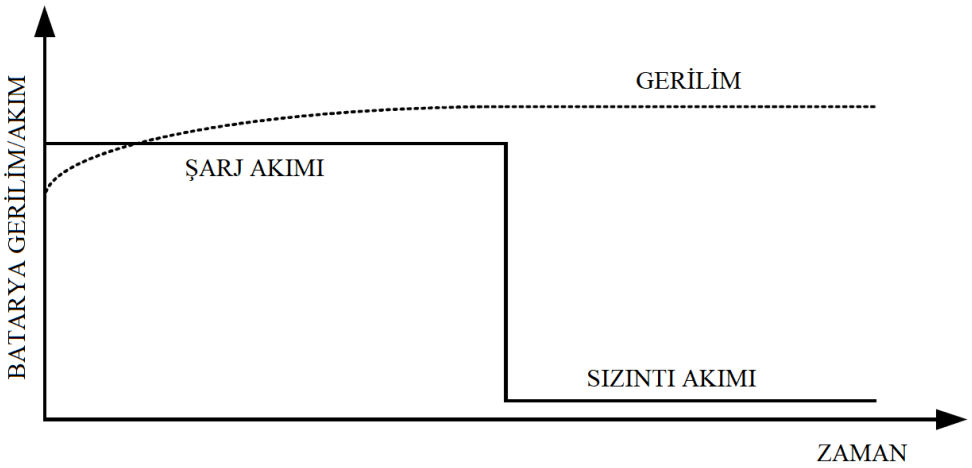
Sabit gerilimde şarj etme, bataryaları şarj etmek için kullanılan bir yöntemdir. Şarj işleminin başlangıcında uygulanan sabit gerilimden kaynaklı olarak düşük iç dirence sahip bataryalar yüksek akım çekmektedir. Bataryaların zarar görmemesi için bu method kullanılırken akım kısma devresi kullanılması gerekmektedir. Şarj akımına bağlı olarak bataryanın iç direnci arttıkça şarj akımı azalmaktadır. Şarj akımı belirli bir eşik değerinin altına geldiği zaman akım kısıtlamayı iptal edip sızıntı akımlarıyla şarj etmeye devam edilebilmektedir. Bu yöntemde şarj akımının değişmesinden kaynaklı olarak şarjlama süresi uzayacaktır [5]. Şekil 3.2.'de sabit gerilimde şarj yönteminin zamana göre gerilim ve akım grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Sabit Gerilimde Şarj Yönteminin Zamana Göre Gerilim ve Akım Grafiği.

3.5.2. Sabit Akımda Şarj Etme

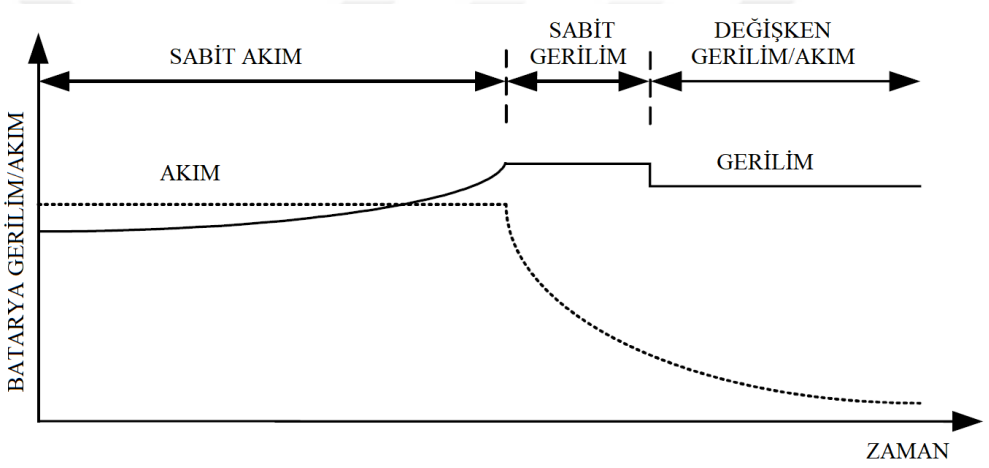
Bu metod, bataryayı şarjlamak için kullanılan basit bir yöntem olarak görülmektedir. Bataryayı şarjlamak için kullanılan akım, birbirine seri bağlı olan tüm bataryalar için eşittir. Bataryalar şarj oldukça iç dirençlerinin artış göstermesinde kaynaklı olarak sabit akım ile şarjlamaya devam edebilmek için şarjlama gerilimi sürekli olarak arttırılmalıdır. Bu yöntemde sabit tutulacak akım değeri oldukça önemlidir. Eğer şarj akımı çok yüksek seçilirse bataryalar çok hızlı bir biçimde şarj olacaktır fakat fazla ısınmadan ya da yüksek şarj akımından dolayı bu durum bataryalarda problemlere yol açabilecektir [5]. Şekil 3.3.'de sabit akımda şarj yönteminin zamana göre gerilim ve akım grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Sabit Akımda Şarj Yönteminin Zamana Göre Gerilim Ve Akım Grafiği.

3.5.3. Sabit Gerilim – Sabit Akımda Şarj Etme

Bu yöntem iki basamaklı şarj yöntemi olarakta bilinmektedir. Bu yöntemde bataryaya sabit akımda şarj ve sabit gerilimde şarj olarak iki ayrı yöntem uygulanmaktadır. İlk olarak bataryaların yüksek akımdan kaynaklanan bozulmalarının önüne geçebilmek için bataryalar sabit akım şarj yöntemiyle şarjlanmaktadır. Batarya gerilimi önceden belirlenen bir eşik seviyesine geldiği zaman sabit gerilimle şarj yöntemine geçilmektedir. Şarjlama işlemi sabit gerilimle şarj yöntemiyle sonlandırılmaktadır [5]. Şekil 3.4.'de sabit gerilim ve sabit akım ile şarj etme yönteminin zamana göre gerilim ve akım grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Sabit Gerilim ve Sabit Akım ile Şarj Etme Yönteminin Zamana Göre Gerilim ve Akım Grafiği

3.6. Gömülü Yazılım ve Donanım Geliştirilmesi

Gömülü Sistem, kabiliyet olarak sabitlenmiş veya programlanabilir bir bilgisayar yazılımı ve donanım kombinasyonudur. Gömülü bir sistem, bağımsız bir sistem olabilir veya büyük bir sistemin parçası olabilir. Çoğunlukla daha büyük bir sistem içindeki belirli bir işlev veya işlevler için tasarlanmıştır. Örneğin, bir yangın alarmı, yalnızca dumanı algılayabilen gömülü bir sistemin yaygın bir örneğidir.

3.6.1. Gömülü Yazılım – CodeWarrior

CodeWarrior, çeşitli mikro denetleyiciler ve mikroişlemciler (Freescale ColdFire, ColdFire +, Kinetis, Qorivva, PX, Freescale RS08, Freescale S08 ve S12Z) ve dijital

sinyal için yazılım düzenleme, derleme ve hata ayıklama için NXP Semiconductors tarafından yayınlanan entegre bir geliştirme ortamıdır.

Sistem, Macintosh'ta Metrowerks tarafından geliştirilmiştir ve mevcut Motorola 68k hem de yeni PowerPC'yi (PPC) temiz bir şekilde destekleyen ilk geliştirme sistemleri arasındadır. Apple'ın PPC'ye geçişi sırasında CodeWarrior, hızlı bir şekilde Mac için fiili standart geliştirme sistemi haline gelmiştir ve Symantec'in THINK C'sini ve Apple'ın kendi Macintosh Programmer's Workshop'unun yerini almıştır. 1996'da NeXT'nin satın alınması, Mac programlamanın NeXT platformunun kendi geliştirici araçlarına geçmesiyle CodeWarrior'ın alaka düzeyinin düşmesine neden olmuştur.

Metrowerks, CodeWarrior'ı Microsoft Windows'a taşıyarak ve çok çeşitli platformlar için derleyiciler sunarak yanıt vermiştir. Motorola'nın çeşitli mikrodenetleyicileri için yazılım yığınının önemli bir parçası haline gelmiş ve sonunda 1999'da Metrowerk'leri satın almalarına yol açmıştır. PPC veya diğer Motorola işlemcilerine dayalı çoğu platformda ve ayrıca birçok oyun konsolunda yaygın olarak kullanılmıştır.

Başlangıçta artık "Classic IDE" olarak bilinen tek bir entegre ürün olan IDE daha sonra Eclipse IDE ile değiştirilmiştir. Mevcut sürümler Classic IDE'nin 6.3'ü ve Eclipse IDE için 11.0, desteklenen diller ise C, C ++ ve assembly dilleridir.

3.6.2. Gerçek Zamanlı Hata Ayıklama - FreeMASTER

FreeMASTER, gömülü yazılım uygulamalarının çalışma zamanı yapılandırmasını ve ayarlanmasını sağlayan, kullanıcı dostu gerçek zamanlı bir hata ayıklama monitörü ve veri görselleştirme aracıdır. Hem otomotiv OEM'leri hem de endüstri lideri cihaz üreticileri, geniş bir otomotiv ve endüstriyel uygulama yelpazesinde kullanıma uygun olduğu için FreeMASTER'ı yaygın olarak benimsemişlerdir.

FreeMASTER, çalışan bir sistemdeki değişkenlerin müdahaleci olmayan bir şekilde izlenmesini desteklemekte ve osiloskop benzeri ekranlarda çok sayıda değişkeni standart widget'lar (göstergeler, sürgüler ve daha fazlası) olarak veya metin biçiminde veri olarak görüntüleyerek kullanımı kolay veri kaydediciler sumaktadır.

FreeMASTER, kontrol döngülerine MCU donanımı eklemek için özel HTML, MATLAB® veya Excel ile diğer komut yazılabilir çerçevelere bağlanabilmektedir.

FreeMASTER çalıştıran bir ana bilgisayardan hedef sisteme bağlantı, geniş bir iletişim çevre birimi veya hata ayıklama kanalı yelpazesi üzerinden doğrudan yapılabilmektedir. FreeMASTER, grafikleri, tablo ızgaralarını ve web görünümlerini doğrudan masaüstü uygulamasına gömmektedir. FreeMASTER bağlantıları, Python, C / C ++ / C # ve diğer diller için mevcut istemci uygulamaları ile JSON RPC çağrıları kullanılarak bir ağ bağlantısı üzerinden yapılmaktadır.

FreeMASTER, FreeMASTER Lite adında yeni bir bileşen sunmaktadır. Bu bileşen, Windows veya Linux ana bilgisayarda çalışabilen ve bir web tarayıcısı uygulamasında (yerel veya uzak bir ana bilgisayar veya mobil cihazda çalışan) özel UI uygulamalarının kullanılmasını sağlayan JSON RPC protokolünü kullanan hafif bir hizmettir.

3.6.3. Gömülü Donanım

Bir baskılı devre kartı (PCB), iletken olmayan bir substratın tabakaları üzerine ve/veya arasına lamine edilmiş bir veya daha fazla bakır tabakasından kazınmış iletken izler, pedler ve diğer özellikleri kullanarak elektriksel veya elektronik bileşenleri mekanik olarak desteklemekte ve elektriksel olarak bağlamaktadır. Bileşenler genellikle PCB'ye hem elektriksel olarak bağlanmak hem de mekanik olarak bağlamak için lehimlenmektedir.

En basit elektronik ürünler dışında hepsinde baskılı devre kartları kullanılmaktadır. Pasif anahtar kutuları gibi bazı elektrikli ürünlerde de kullanılmaktadırlar.

PCB'lerin alternatifleri arasında, her ikisi de bir zamanlar popüler olan ancak şimdi nadiren kullanılan tel sarma ve noktadan noktaya yapı bulunmaktadır. PCB'ler, devreyi yerleştirmek için ek tasarım çabası gerektirmekte, ancak üretim ve montaj otomatikleştirilebilmektedir. Düzen işinin çoğunu yapmak için elektronik bilgisayar destekli tasarım yazılımı mevcuttur. PCB'lerle seri üreten devreler, bileşenler tek bir işlemde monte edilip kablolandığı için diğer kablolama yöntemlerinden daha ucuz ve daha hızlı olmaktadır. PCB'ler, daha az faydayla küçük miktarlarda manuel olarak da yapılabilmektedirler.

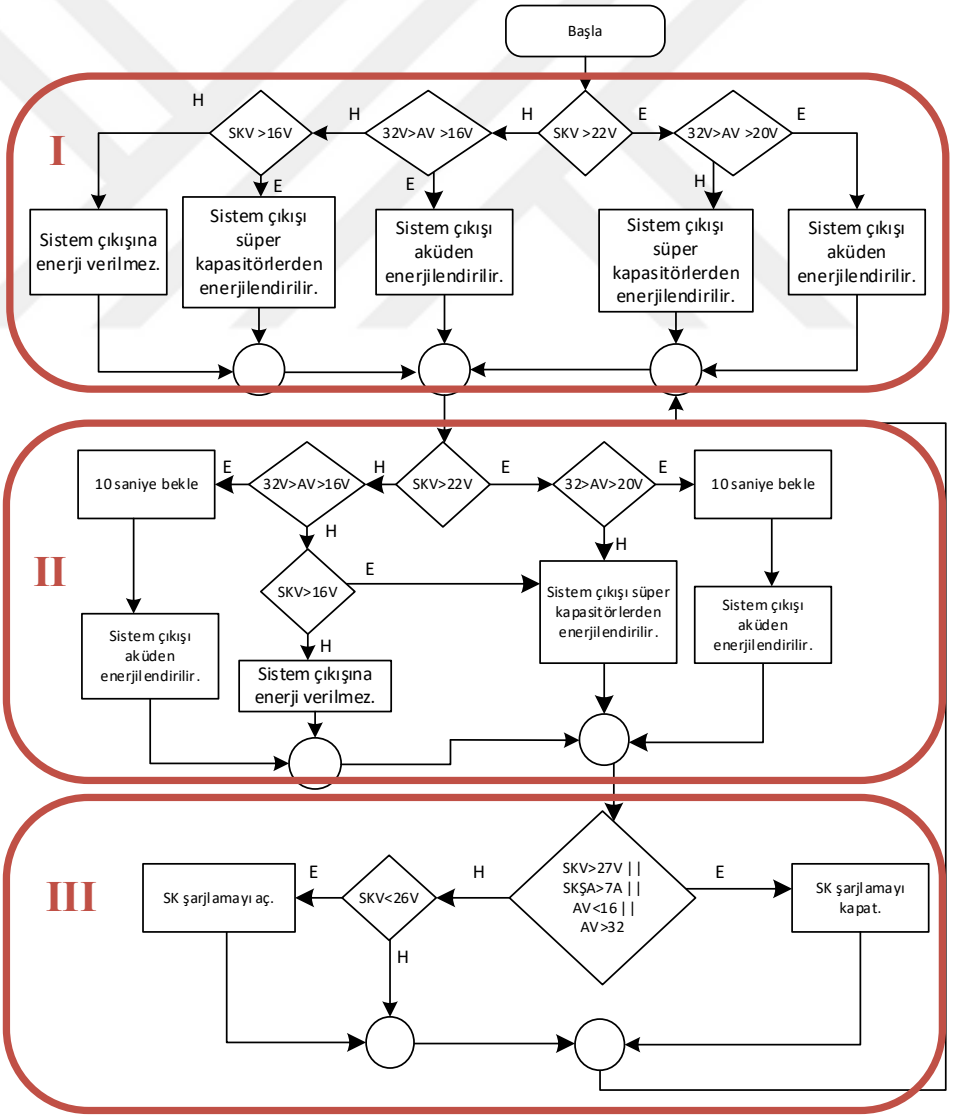
PCB'ler tek taraflı (bir bakır katman), çift taraflı (bir substrat katmanının her iki tarafında iki bakır katman) veya çok katmanlı (alt katman katmanlarıyla dönüşümlü olarak bakırın dış ve iç katmanları) olabilmektedirler. Çok katmanlı PCB'ler, çok daha yüksek bileşen

yoğunluğuna izin vermektedirler, çünkü iç katmanlardaki devre izleri, aksi takdirde bileşenler arasındaki yüzey alanını kaplamaktadır. Çok katmanlı PCB'lerin ikiden fazla ve özellikle dörtten fazla bakır düzlem ile popülaritesindeki artış, yüzey montaj teknolojisinin benimsenmesiyle eşzamanlı olmuştur. Bununla birlikte, çok katmanlı PCB'ler, devrelerin onarımını, analizini ve alan modifikasyonunu çok daha zor hale getirmişlerdir ve genellikle pratik değillerdir.

BÖLÜM 4. SÜPER KAPASİTÖRLER İLE ÖZELLEŞTİRİLMİŞ YEDEK GÜÇ ÜNİTESİ VE KORUMA CİHAZI TASARIMI

4.1. Genel Sistem Tasarımı

Bu bölümde yedek güç sistemine ait olan genel akış diyagramı Şekil 4.1.'de 3 ana kısım altında toplanmıştır.



Şekil 4.1. Sistem Tasarımı Şeması.

Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi akış şeması;

Kısım I. Sistem Başlangıç Güç Kaynağı Kontrolü ve Seçimi,

Kısım II. Kaynak Kontrolü ve Seçimi İterasyonu,

Kısım III. Süperkapasitör Şarj Durum Seçimi İterasyonu, olarak bölünmüştür.

Şemada görüldüğü üzere; sistemin başlama anı olan I. Kısımda süperkapasitör ve akü gerilimlerine göre sisteme bağlı olan yükün enerjilendirilme kaynağına karar veren koşullar vardır.

Alttaki bölümde I. Kısma ait karar mekanizması sırasıyla açıklanmıştır. Bu kısımda aşağıdaki koşullara bağlı olarak yükün hangi kaynaktan besleneceği belirlenmektedir.

Bunlar;

1) Süperkapasitörlerin gerilim değeri 22 Volttan fazla mı?
    a. Evetse; Akü gerilim değeri 32 ila 20 Volt arasında mı?
        i. Evetse; Sisteme bağlı yük aküden enerjilendirilir.
        ii. Hayırsa; Sisteme bağlı yük süperkapasitörden enerjilendirilir.
    b. Hayırsa; Akü gerilim değeri 32 ila 16 Volt arasında mı?
        i. Evetse; Sisteme bağlı yük aküden enerjilendirilir.
        ii. Hayırsa; Süperkapasitörlerin gerilim değeri 16 Volttan fazla mı?
            1. Evetse; Sistem çıkışı süperkapasitörden enerjilendirilir.
            2. Hayırsa; Sistem çıkışına enerji verilmez.

II. Kısımda ise iterasyonlar ile sistem çıkışı yenilenmektedir. Enerji aktarımında kesinti olmaması için süperkapasitörden aküye geçiş mikrosaniye mertebesinde, aküden süperkapasitöre geçiş ise histeresis durumalarını engellemek için saniyeler mertebesinde çıkış kararı verilmektedir. Bu kararlar altta sıralanmıştır. Bunlar;

1) Süperkapasitörlerin gerilim değeri 22 Volttan fazla mı?
    a. Evetse; Akü gerilim değeri 32 ila 20 Volt arasında mı?
        i. Evetse; 10 saniye beklenir.
            1. 10 saniye sonrasında; Sistem çıkışı aküden enerjilendirilir.

ii. Hayırsa; Sistem çıkışı süperkapasitörden enerjilendirilir.

b. Hayırsa; Akü gerilim değeri 32 ila 16 Volt arasında mı?

i. Evetse; 10 saniye beklenir.

1. Sisteme bağlı yük aküden enerjilendirilir.

ii. Hayırsa; Süperkapasitörlerin gerilim değeri 16 Volttan fazla mı?

1. Evetse; sistem çıkışı süperkapasitörden enerjilendirilir.

2. Hayırsa; Sistem çıkışına enerji verilmez.

Çok hızlı karar verme gereksinimi bulunmayan ve sistemin histeresis kararsızlıklarının minimum değerlere indirilmesi için III. Kısımda karar süresi saniyeler mertebesinde yeterli görülmüştür.

1) Süperkapasitör gerilim değeri 27 Volttan fazla ise veya;

- Süperkapasitör şaj akımı 2 Amperden düşük ise veya;
- Akü gerilim değeri 16 Volttan düşük ise veya;
- Akü gerilim değeri 32 volttan yüksek ise?

i. Evetse; Süperkapasitör şarjlaması kapatılır.

ii. Hayırsa; Süperkapasitör gerilim değeri 26 volttan düşük mü?

1. Evetse; Süperkapasitör şarjlamayı aç.

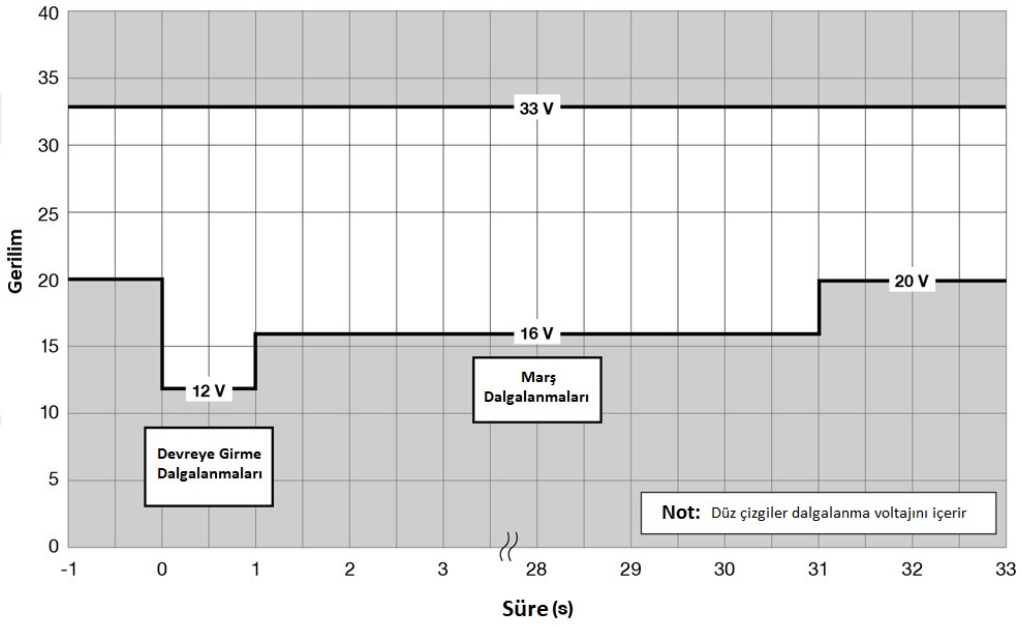
2. Hayırsa; Süperkapasitör şarj edilmez.

Sistemde bulunan fakat Şekil 4.1.'de bahsi geçmeyen insan-makine arayüzüne ait bilgilendirme göstergeleri bulunmaktadır. Bu göstergeler karar sonuçlarına göre çalışmaktadır. Bu göstergelerin açıkladığı durumlar altta listelenmiştir. Bunlar;

- Aşırı Şarj akımı hatası;
- Süperkapasitör şarjlamama hatası;
- Akü yüksek / düşük gerilim hatası;
- Sistem çıkışı Akü / Süperkapasitör bilgilendirme göstergesi durumları açıklamaktadırlar.

4.2. Koruma Fonksiyonu

Güç sistemi için geçme veya kalma kriterleri, genellikle güç sisteminin çıktısının izlenmesi yoluyla tanımlanması için kullanıcıya bırakılmıştır. Örneğin, bir güç kaynağı bir dalgalanma nedeniyle hasar görürse, bu bir arıza olarak kabul edilir, ancak yürütülen bir duyarlılık testi sırasında daha yüksek seviyede çıkış dalgası gösteren bir güç kaynağı, son ekipman için bir geçiş olarak kabul edilebilmektedir. Şekil 4.2.'de 28 VDC Araçta Marş Anı Bozulma Limitleri, Şekil 4.3.'de ise 28 VDC sistemler için zarf spike aralığı gösterilmiştir.



Şekil 4.2. 28 VDC Araçta Marş Anı Bozulma Limitleri.

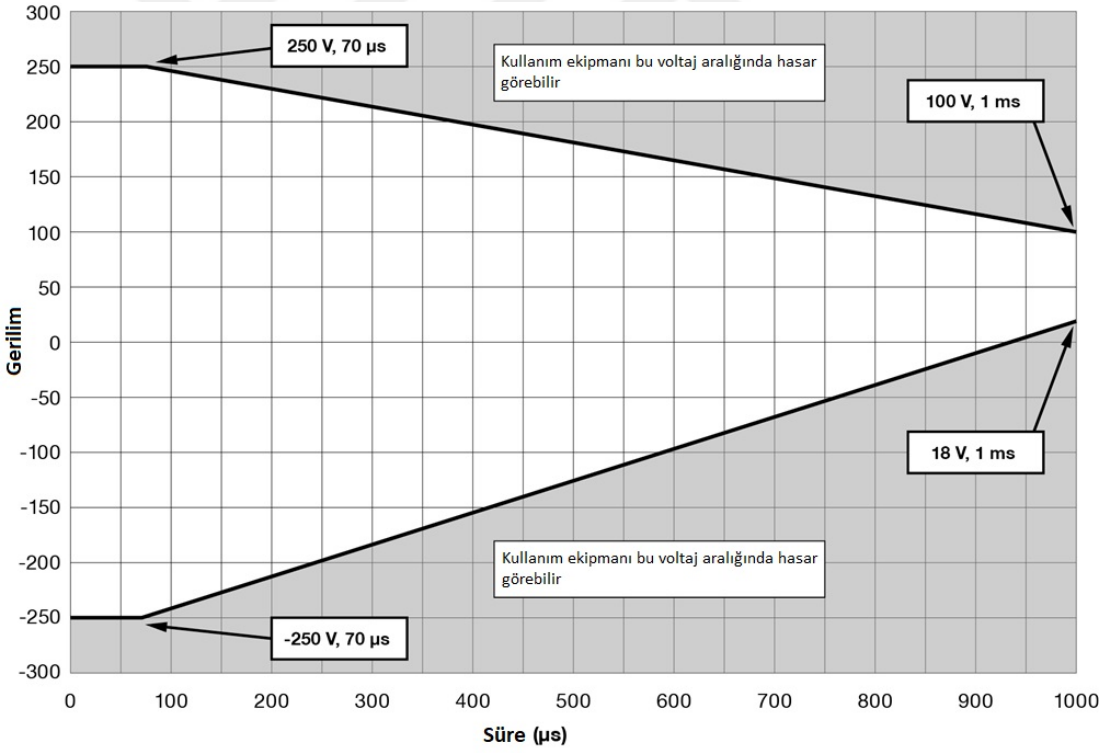
4.2.1. Gereksinimler

Gereksinimler, kullanım güç giriş terminallerindeki çalışma gerilimi sınırlarını ve geçici gerilim özelliklerini belirlemektedir. Aksi belirtilmedikçe gerilim ölçüm toleransları %1'dir.

4.2.1.1. Gerilim uyumluluk gereksinimleri

Kararlı durum çalışması, her iki sınır uçta test edilerek 20 ile 33 VDC arasında çalışmayı gerektirmektedir. Normal EUT işleminden sapmalar bir arıza olarak kabul edilmektedir. Stabilizasyon süresi, gerilimin 50 milisaniye kadar 18 ile 100 VDC arasında olmasına ve ilk güç uygulandıktan sonra 600 milisaniye normal gerilime ulaşmasına izin vermektedir. MIL-STD-1275E dokümanındaki zamanlama/gerilim zarfı grafiği Şekil 4.3.'te verilmiştir. Test süresi belirtilmemiştir, ancak EUT'nin her uç noktada termal stabiliteye ulaşmasına izin verilmesi yaygın olarak kabul edilmektedir. Termal stabilite, 15 dakikalık aralıklarla arka arkaya üç ölçüm için 1 °C'nin altındaki sıcaklık değişimi ile tanımlanmaktadır.

Test ederken, tesisin ortam sıcaklığına dikkat edilmesi gerekmektedir çünkü ortam koşullarındaki değişiklikler, izleme stabilitesini zorlaştırmaktadır.



Şekil 4.3. 28 VDC Sistemler İçin Zarf Spike Aralığı.

DC gerilim dalgalanması, aşırı genliklerin bir parçası olarak kabul edilmektedir. Dalgalanma testi, dalgalanma olarak sınıflandırılan gerilim değişimlerinde EUT toleransını doğrulamak için MIL-STD-461 CS101 yöntemini kullanmaktadır. MIL-STD-

1275, test frekansı aralığını 250 kHz'ye genişletmekte (MIL-STD-461 üst frekansı 150 kHz'dir) ve sınırı 150 kHz'de CS101 sınırıyla aynı genlikte tutmaktadır. Test, 23 ile 30 VDC gerilim aralığında gerçekleştirilecektir. Normal çalışmadan EUT sapmaları arıza olarak kabul edilmektedir.

Yeterlilik planları, MIL-STD-461 CS101 testinin, frekans aralığı genişletildiğinde MIL-STD-1275'i karşılayacağını varsayıyorsa, frekansı artırmaktan daha fazlasını yapmak gerekebilmektedir. MIL-STD-461 nominal 28 VDC güç girişinde test edildiğinden, 23 ve 30 VDC giriş gerilimi ayarlarında yeniden test edilmesi gerekecektir. MIL-STD-461'de eğri nominal 28 VDC'ye dayandığından, bu eğri her iki gerilim ayarı için de geçerli olmalıdır.

MIL-STD-1275'in 5 µH LISN'ler (Hat Empedans Stabilizasyon Ağları) kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle 50 µH LISN'lerle MIL-STD-461 CS101 testi uyumlu olmayabilmektedir. Test devresi karakteristik empedansının seçilen LISN'ye bağlı olarak farklı olacağı göz önünde bulundurulursa veya MIL-STD-461 testi için 5 µH LISN kullanılması düşünülürse test planında değişiklik gerekecektir.

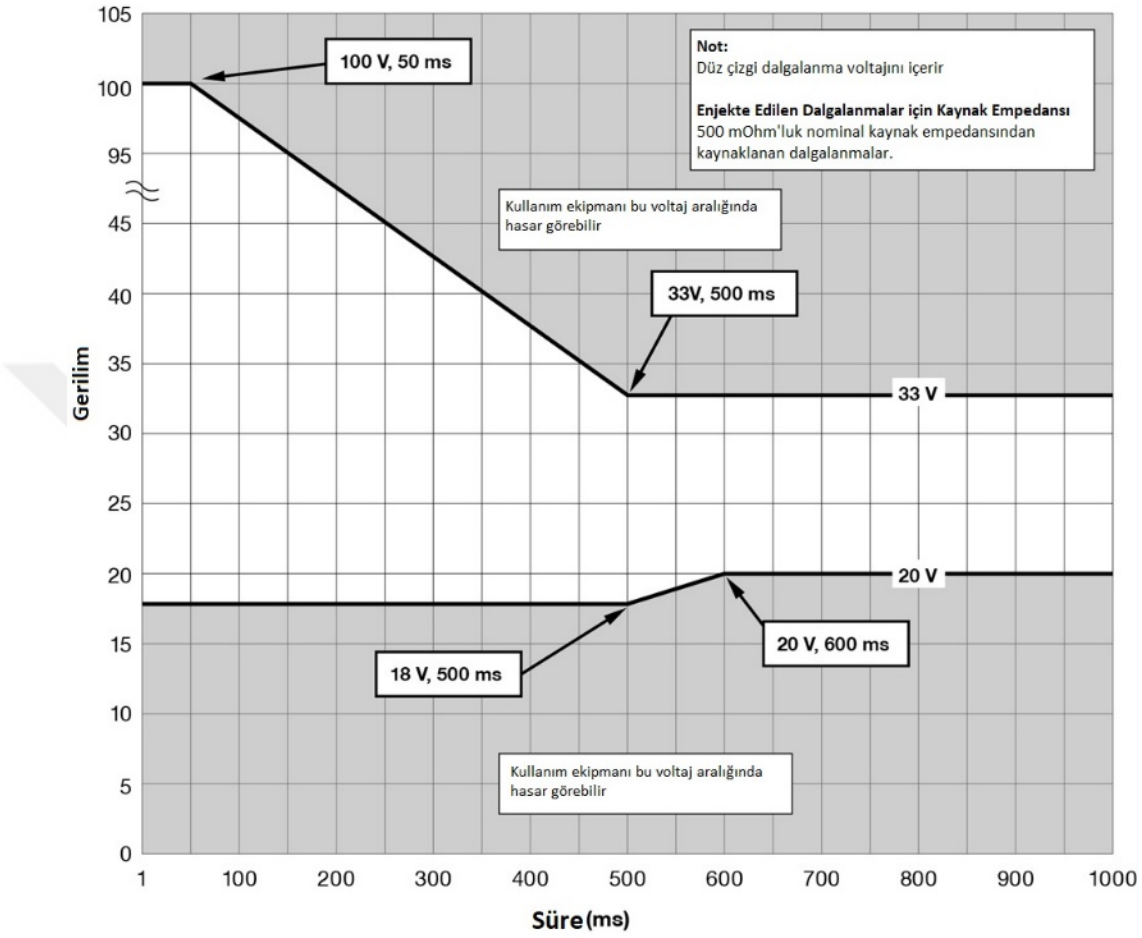
Başlatma işlemi, aracın kranklama işlemi sırasında normal veya sınırlı işlevselliğin sürdürülmesini gerektiren seçilmiş EUT'lara uygulanabilmektedir. MIL-STD-1275E'deki Şekil 6, başlatma işlemi sırasında zamanlama ile aşırı gerilimlerin zarfını sağlamaktadır. Mümkünse, yeterlilik testi, operasyonel gereksinimleri tanımlayan onaylama makamına dahil edilmelidir.

4.2.1.2. Geçici rahatsızlık gereksinimleri

Enjekte edilen gerilim yükselme testi, nominal 28 VDC güç ayarında gerçekleştirilir ve güç kaynağını izole etmek için 5 µH LISN'ler gerekmektedir. Ani gerilim yükselme dalga formu, başlangıç geçiş süresi 50 nsn'den az ve salınım frekansı 100 ile 500 kHz arasında olan sönümlü bir kosinüs olarak tanımlanmaktadır. Dalga formu, EUT tarafından paylaşılan araç veri yolunda bulunan endüktif yüke geçişleri simüle etmektedir. 1 saniyelik aralıklarla her bir polariteden 250 V'luk bir zirveye sahip elli sivri uç uygulanmaktadır.

Standart, geçici jeneratör ile ilişkili empedans veya akım sınırlamasını tanımlamadan maksimum enerjinin 2 Joule (J) olduğunu belirtmektedir. Standart, test sırasında enerji

sınırlaması uygulanıyormuş gibi okumakta, ancak test edilen devre hakkında bilgi olmadan, enerji sınırlamasının doğrulanması mümkün olmamaktadır. Şekil 4.4.'de 28 VDC sistemler için dalgalanma zarf aralığı gösterilmiştir.



Şekil 4.4. 28 VDC Sistemler için Dalgalanma Zarf Aralığı.

Bu standardı uygularken, sistem yalnızca jeneratör modunda, yani pil takılı değilken çalışırken görülebilecek ani artış ve dalgalanmalarında dikkate alınması gerekmektedir. Bu hafifletilmezse, hasara neden olabilecek hem daha yüksek gerilimler hem de daha uzun süreli dalgalanmalarla güç sisteminin koruma gereksinimlerine önemli ölçüde katkıda bulunmuş olmaktadır. En zorlayıcı gereksinim, 50ms için 100V dalgalanma kısıtıdır.

Belirtildiği gibi, bu koşullar sırasında ve sonrasında ekipmanın nasıl performans göstereceğini belirlemek kullanıcıya bağlı olmaktadır. EMC girişiminin, alınan test ölçümlerini etkilememesine de dikkat edilmelidir.

4.3. Güç Devrelerinin Tasarımı ve Simülasyonları

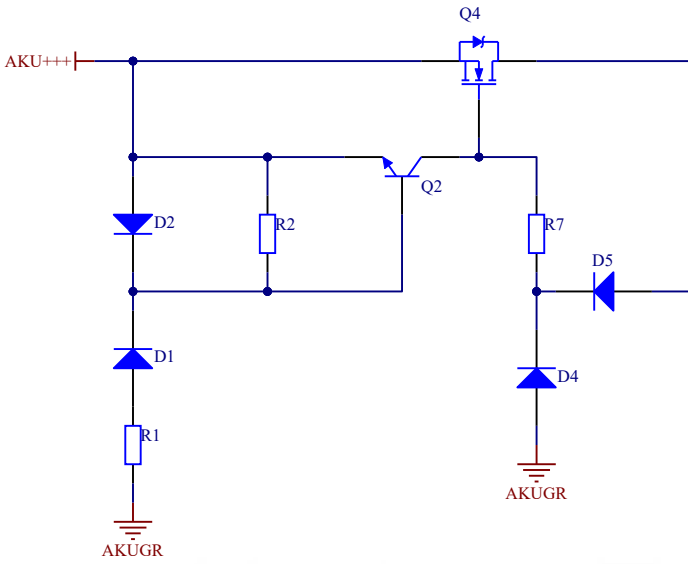
Otomotiv, endüstriyel ve aviyonik uygulamalar genellikle birkaç mikrosaniyeden yüzlerce milisaniyeye kadar değişen sürelerde yüksek gerilimli güç kaynağı artışlarıyla karşılaşmaktadır. Sistem elektroniği, bu geçici gerilim yükselmelerinden korunmalıdır.

Yük akımında ani değişiklikler, şiddetli geçişler yük basamakları oluşturabilmektedir Negatif yük adımları, yük akımı yüksekten düşük bir değere düştüğünde gerçekleşmektedir. Akımdaki negatif değişiklikler, telin parazitik endüktansının, aynı kablodaki komşu cihazlara zarar verebilecek pozitif giden bir yüksek gerilim yükselmesi oluşturmasına neden olmaktadır.

Röleler, anahtar kontakları ve katı hal yük anahtarlaması ile hızlı yük anahtarlama, geçici yüksek gerilimler üretebilmektedir. Bir güç kaynağı ile yük arasındaki aşınmış bağlantılar, ani bir akım kesintisine ve yüksek geçici gerilimlere neden olabilmektedir. Örneğin, akü bağlantısında titreşim ve aşınmış terminallerin neden olduğu ani bir kopukluk olduğunda otomotiv yük atmaları meydana getirebilmektedir. Bu geçişler, hassas elektronikleri korumaya çalışan tasarımcılar için bir zorluk teşkil etmektedir. Bu zorluk, hacimli kapasitörler, TVS diyotları ve sigortalar kullanılarak aşılmaya çalışılmıştır, ancak ayrı çözümler çok fazla alan kullanılmasına sebep olmaktadır. Geliştirilmiş bir yaklaşım, özellikle giriş gerilimlerini kelepçelemek ve dalgalanmalara ve geçici akımlara karşı korumak için bu çalışmada LTC4366 gibi bir IC'nin kullanılmıştır.

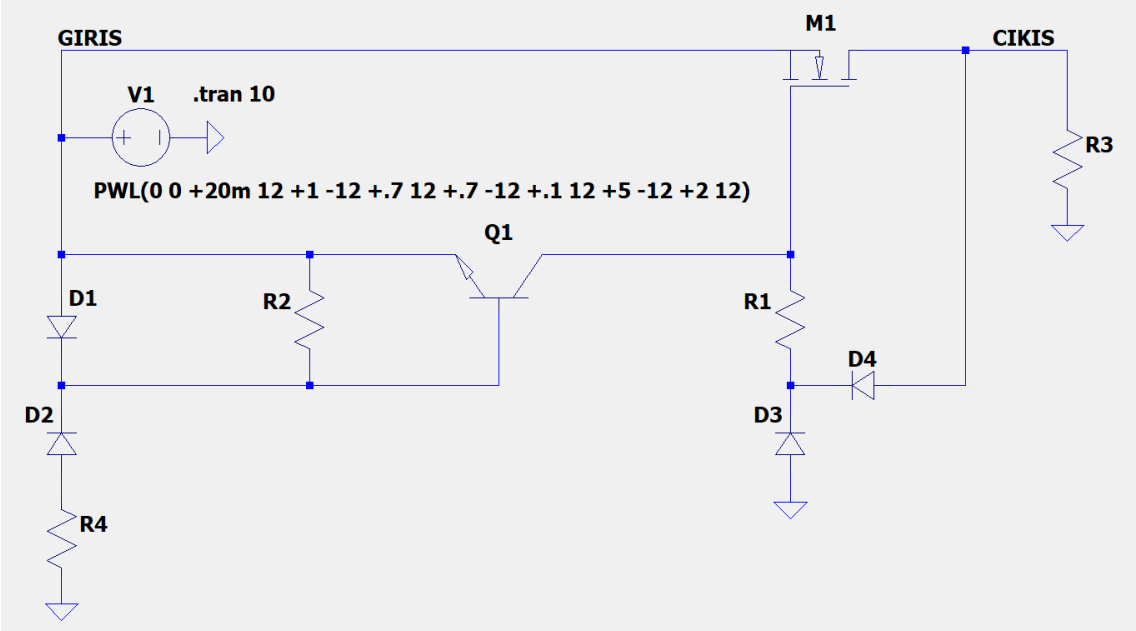
4.3.1. Ters Gerilim Koruma Devresi

Ters gerilim korumasının güç kayıplarını azaltmak için bir MOSFET kullanılmaktadır. Gerilim doğru yönde uygulanırken MOSFET tamamen açılır. Source pininin yüksek potansiyelde olduğundan, MOSFET, Yüksek Taraf (High Side) bir anahtarıdır. MOSFET'i açmak için Source pini gerilimi üzerinden Gate pini gerilimini artırmak için bir şarj pompası devresi gereklidir. Bir MOSFET'in her zaman kendine özgü bir anti paralel gövde diyotuna sahip olduğuna dikkat edilmelidir.



Şekil 4.5. Ters Gerilim Koruma Devresi

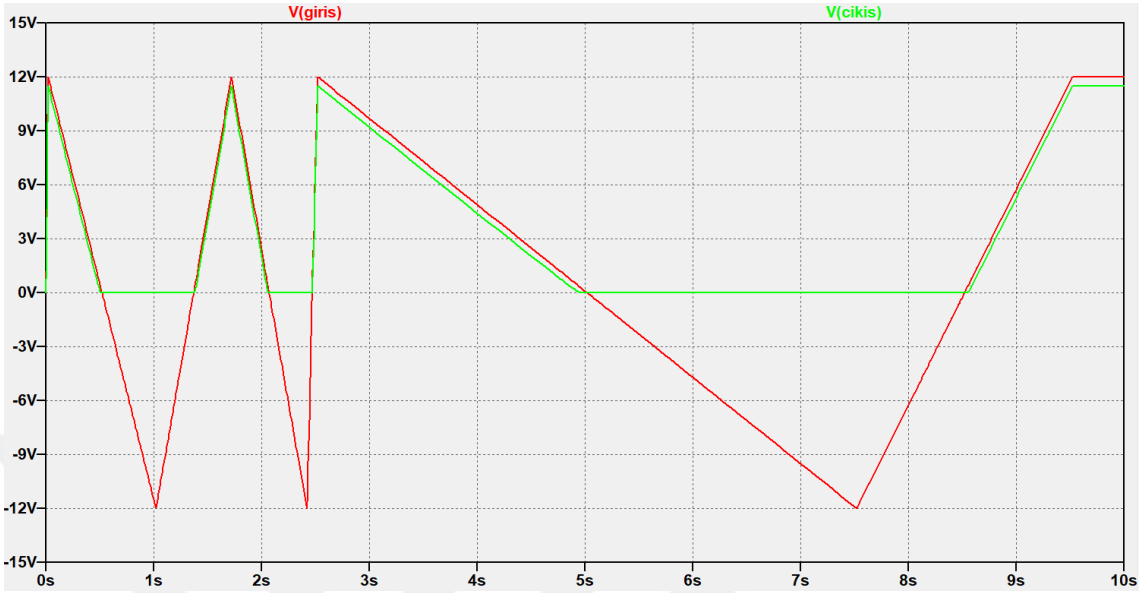
Ters polarite sırasında, şarj pompası devresini (Q2) toprak hattındaki diyot gerilimi bloke eder. Gate pinine gerilim gelmez ve MOSFET (Q4) kapatılır. Diyot, şarj pompasını da ters gerilime karşı korur [44].



Şekil 4.6. Ters Gerilim Koruma Devresi Simülasyon Şeması

LTC4366 Dalgalanma Bastırıcı Devresinin hemen önünde bir ters gerilim önleyici bir devre bulunmaktadır. Girişe ilk olarak pozitif bir gerilim uygulandığında, D1 ve Q1'nin (Şekil 4.6.) ileri eğimli taban-kolektör bağlantısı M1 Gate giriş gerilimi eksi iki diyot

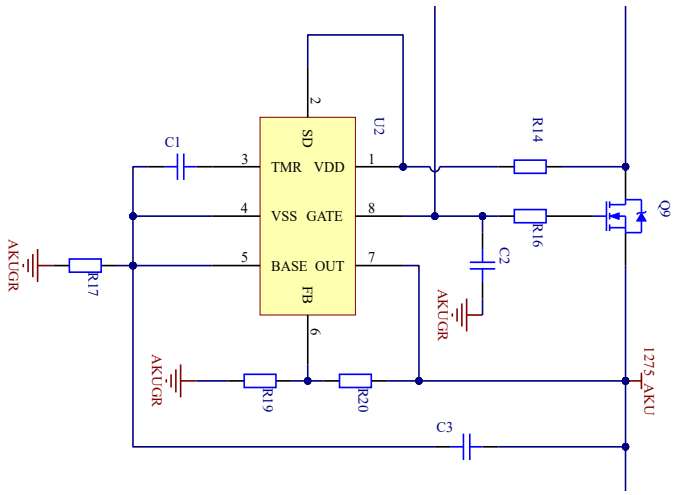
düşüşünü takip etmesine izin verir. Bu durum sırasında, gücü iletmek için M1'nin gövde diyotu kullanılır.



Şekil 4.7. Ters Gerilim Koruma Devresi Simülasyon Grafiği

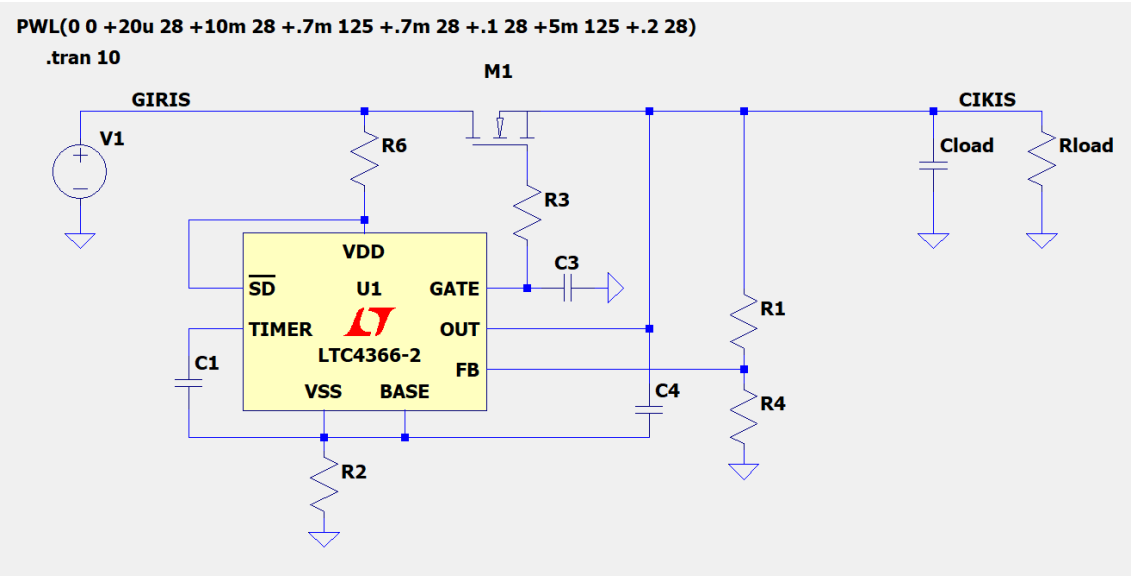
4.3.2. Ani Gerilim Sıçraması ve Geçici Yüksek Gerilim Koruma Devresi

LTC4366 bir kez çalıştırıldığında, iki MOSFET'in de Gate pinini tamamen açar. (D1 üzerinden). MOSFET'lerin açılması ile yüke düşük empedanslı bir yol sağlanmış olur. Aşırı gerilim durumu, giriş kaynağından LTC4366'nın Gate pinine düşen aşırı pozitif gerilim ile engellenir. Giriş pozitif olduğunda R4 (Şekil 4.6.) üzerinden akım akışını ortadan kaldırırken, D1, giriş açıldığında Q1'nin emitör baz arızasını önler.



Şekil 4.8. Dalgalanma Bastırıcı Devresi

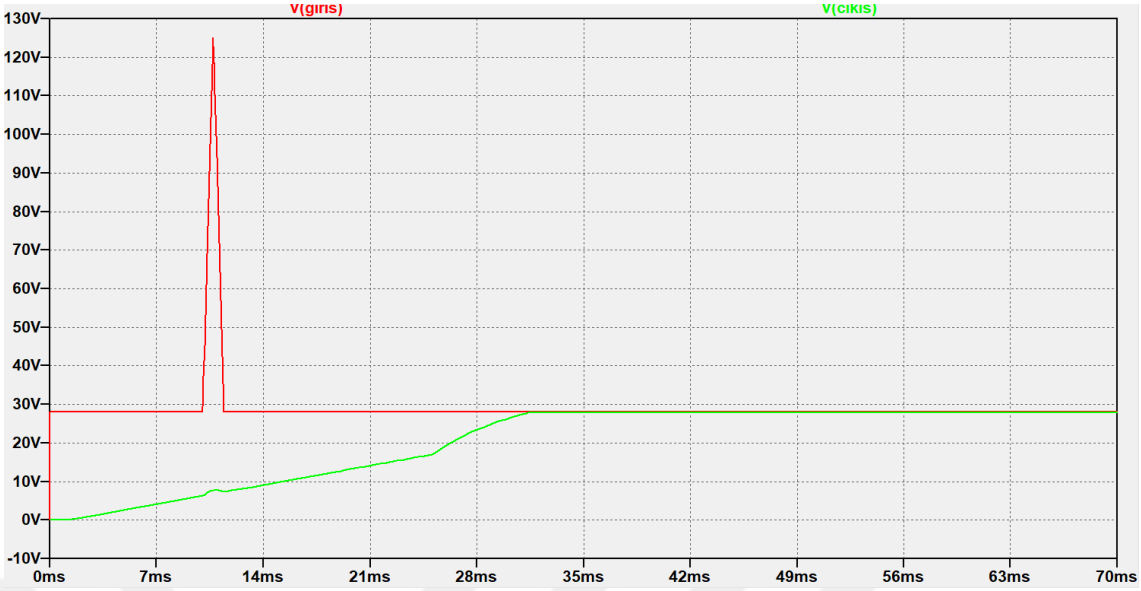
LTC4366, harici bir N-kanallı MOSFET'in Gate pinini sürerek dalgalanmalara karşı koruma sağlar, böylece dalgalanmayı emerek yükleri korumaktadır. Normalde, IC ve MOSFET, güç kaynağının yüklerine minimum ekleme kaybıyla hizmet vermesine izin verir. Bununla birlikte, güç kaynağı girişi bir aşırı gerilim uygulanırsa, LTC4366 ve MOSFET, hasardan veya arızadan korumak için yüke uygulanan gerilimi bastırır [45].



Şekil 4.9. Dalgalanma Bastırıcı Devresi Simülasyon Şeması

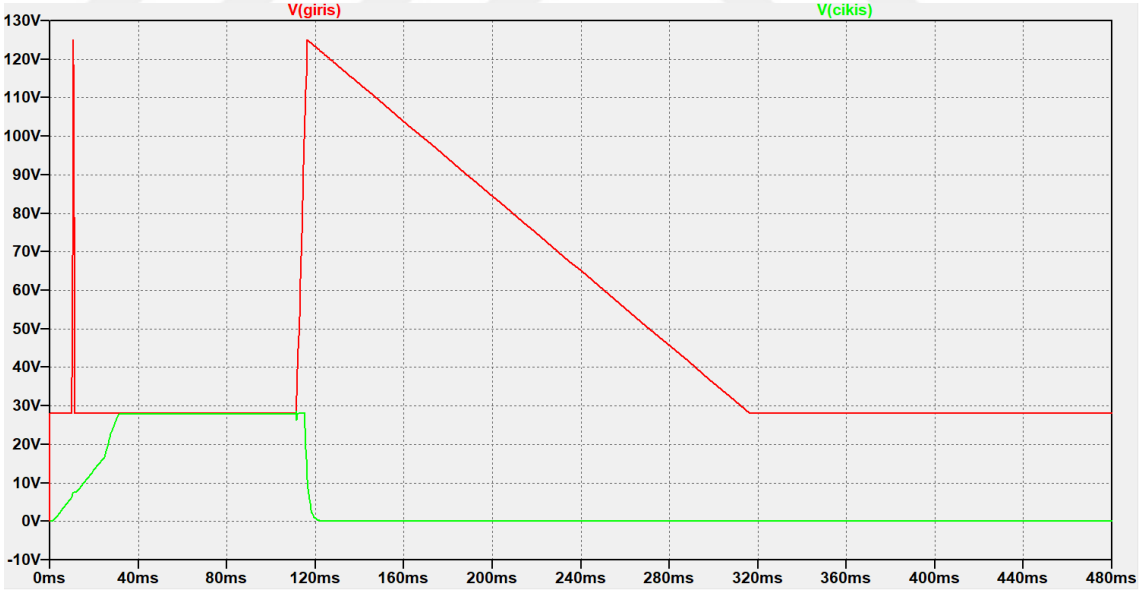
Ayarlanabilir bir arıza zamanlayıcısı, harici MOSFET'teki güç kaybını sınırlar. Bir arıza sırasında, daha düşük değerli güvenli çalışma alanı MOSFET'lerin kullanımına izin veren TIMER pini üzerindeki kapasitörü C1 (Şekil 4.9.) şarj etmek için bir akım kaynağı kullanır.

Ani akım sınırlaması, Gate pini dönüş oranını kontrol ederek, güç verme sırasında MOSFET üzerinden çıkışa yayılan akım artışlarını ortadan kaldırmaktadır. Buna karşılık, LTC4366-2 9 saniye bekler, ardından arızayı otomatik olarak temizler ve yeniden çıkış vermeye başlamaktadır. Bir arıza sırasında, Gate pinindeki güçlü sönüm akımı sayesinde hızlı tepki sağlanmaktadır [45].



Şekil 4.10. Dalgalanma Bastırıcı Devresi Simülasyon Grafiği 0-70ms

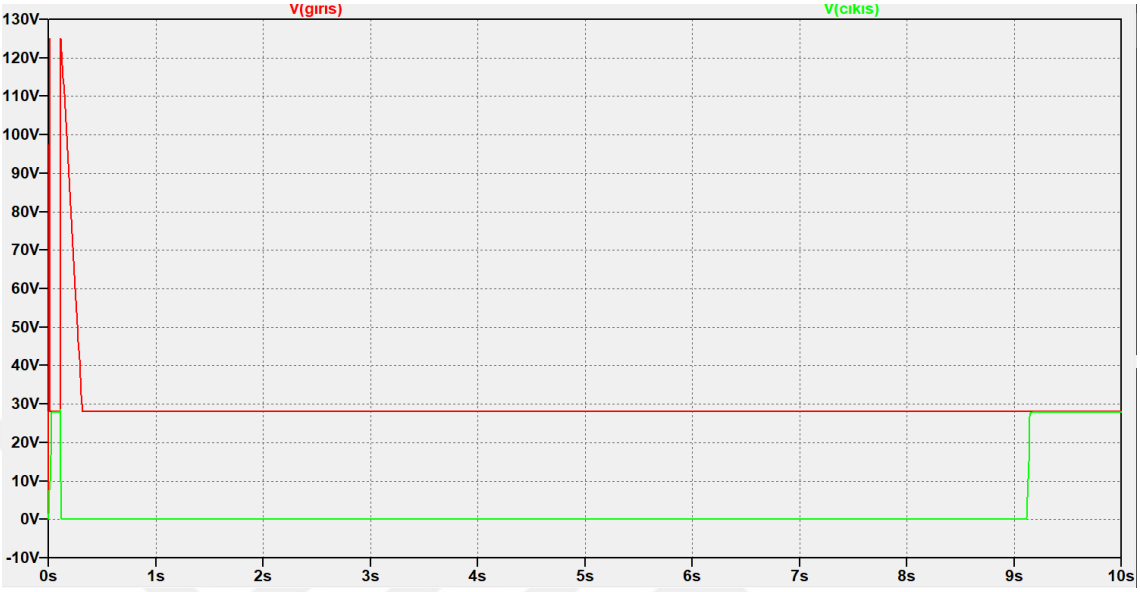
Şekil 4.10.'da 0-70 milisaniye zaman aralığında gösterilen grafikte, 28 Volt nominal bir gerilim üzerine, 10-11.30 ms aralığında 125 Voltluk bir gerilim sıçraması (voltage spike) uygunlanmış ve devrenin buna verdiği tepkinin simülasyonu gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Dalgalanma Bastırıcı Devresi Simülasyon Grafiği 0-480ms

Şekil 4.11.'de 0-480 milisaniye zaman aralığında gösterilen grafikte, 28 Volt nominal bir gerilim üzerine, 10-11.30 ms aralığında 125 Voltluk bir gerilim sıçraması (voltage spike), 110- 300 ms aralığında 125 Voltluk bir geçici yüksek gerilim (transient voltage) durumu

uygunlanmış ve devrenin buna verdiği tepkinin simülasyonu gösterilmiştir. Bu geçici yüksek gerilim durumundan dolayı çıkış geriliminin kesildiği görülmektedir.



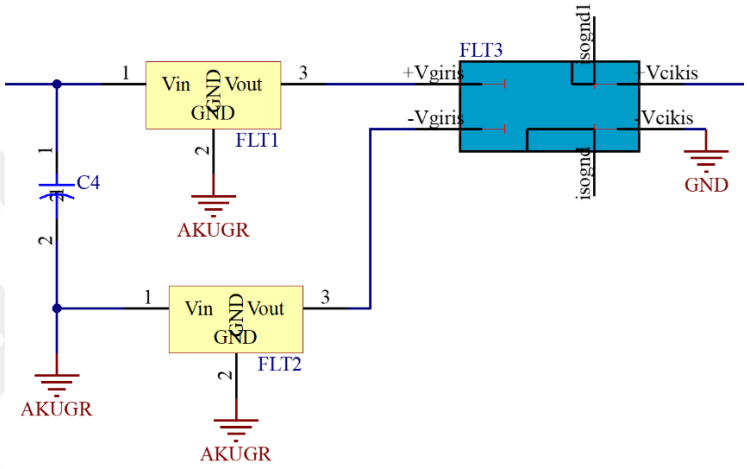
Şekil 4.12. Dalgalanma Bastırıcı Devresi Simülasyon Grafiği 0-10s

Şekil 4.12.'de 0-10 saniye zaman aralığında gösterilen grafikte, 28 Volt nominal bir gerilim üzerine 125 Voltluk bir gerilim sıçraması (voltage spike) ve 125 Voltluk bir geçici yüksek gerilim (transient voltage) durumu uygulanmış, devrenin buna verdiği tepkinin simülasyonu gösterilmiştir. Bu geçici yüksek gerilim durumundan dolayı çıkış geriliminin kesildiği ve arıza durumu düzeldikten 9 saniye sonrasında nominal çıkış geriliminin sağlandığı gözlemlenmiştir.

4.3.3. Elektromanyetik Girişim Koruma Devresi

Elektromanyetik Girişim (EMI), istenmeyen elektrik sinyalleri olarak tanımlanır ve iletilen veya yayılan emisyonlar şeklindedir. İletilen Elektromanyetik Girişim, gürültünün elektrik iletkenleri boyunca hareket ettiği ve yayılan Elektromanyetik Girişim, gürültünün havada manyetik alanlar veya radyo dalgaları olarak geçtiği yerdir. Elektromanyetik Girişim, elektrik akımının değiştirilmesinden oluşur ve elektronik güç kaynakları dahil olmak üzere çeşitli kaynaklardan gelmektedir. Güç kaynakları, bir dizi elektronik bileşeni çalıştırmak için bir giriş gerilimini düzenlenmiş ve yalıtılmış DC gerilimine dönüştürür. Bu dönüştürme, bir kHz'den MHz seviyelerine kadar değişen

yüksek frekanslarda gerçekleşmektedir. LED aydınlatma, bilgisayarlar, motor sürücüleri, DC röleleri ve pil şarj cihazlarının tümü, çalışmak için güç kaynaklarına güvenir. Bir güç kaynağı için bir EMI filtresi, normalde LC devreleri oluşturmak için birbirine bağlanan kapasitörler ve indüktörler dahil olmak üzere pasif bileşenlerden oluşur. İndüktörler, zararlı istenmeyen yüksek frekans akımlarını bloke ederken DC veya düşük frekanslı akımların geçmesine izin verir. Kapasitörler, yüksek frekanslı gürültüyü filtre girişinden güç kaynağına veya toprak bağlantısına geri yönlendirmek için düşük empedanslı bir yol sağlar.

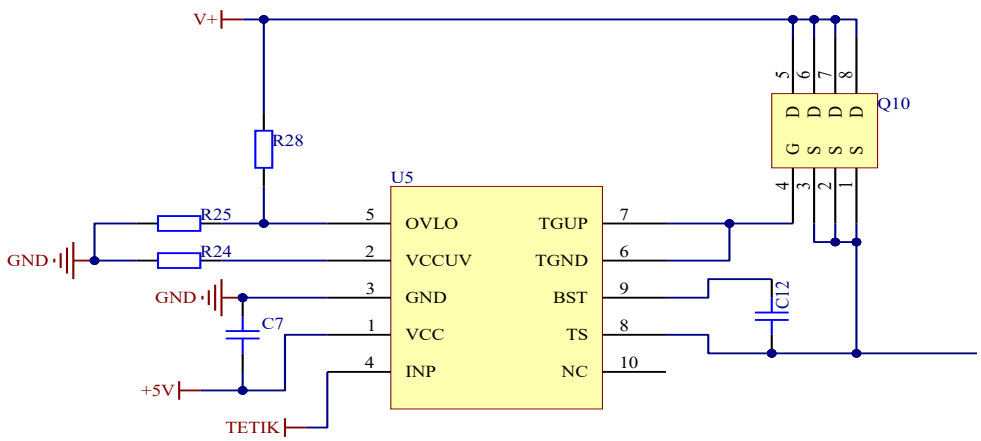


Şekil 4.13. EMI Filtre Devresi

Şekil 4.13.'de gösterilen devre 10 kHz'den 1 GHz seviyelerine kadar Elektromanyetik Girişim akımlarını bloke etme amacıyla Dalgalanma Bastırıcı Devre ile MOSFET Sürücü devreleri arasına konumlandırılmıştır.

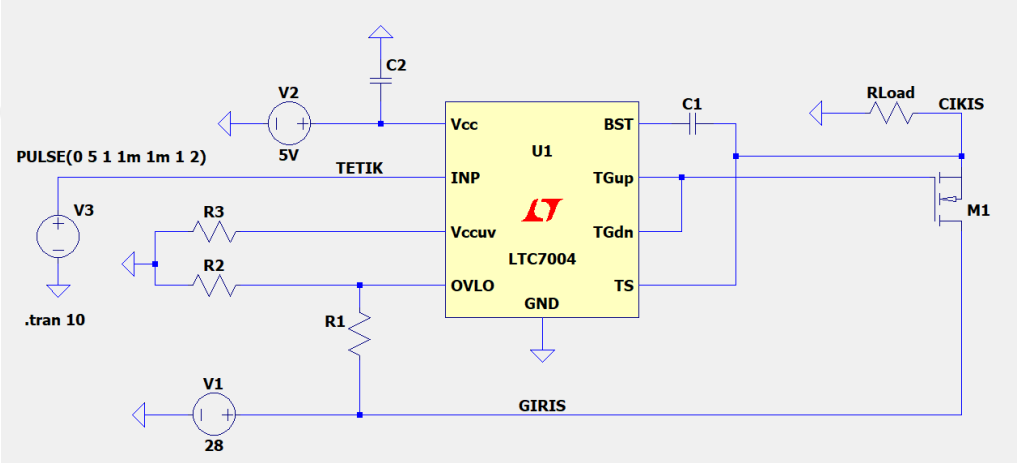
4.3.4. MOSFET Sürücü Devresi

MOSFET Sürücü Devresi, 35ns yayılma gecikmesi ve hızlı yükselme / düşme süreleri ile 12V ön yükleyicili (bootstrapped) besleme gerilimi kullanarak 1nF'lik bir yükü sürmektedir. Yüksek Gate sürücü gerilimi, harici MOSFET açık-direnci ile ilişkili harici güç kayıplarını azaltmaktadır.



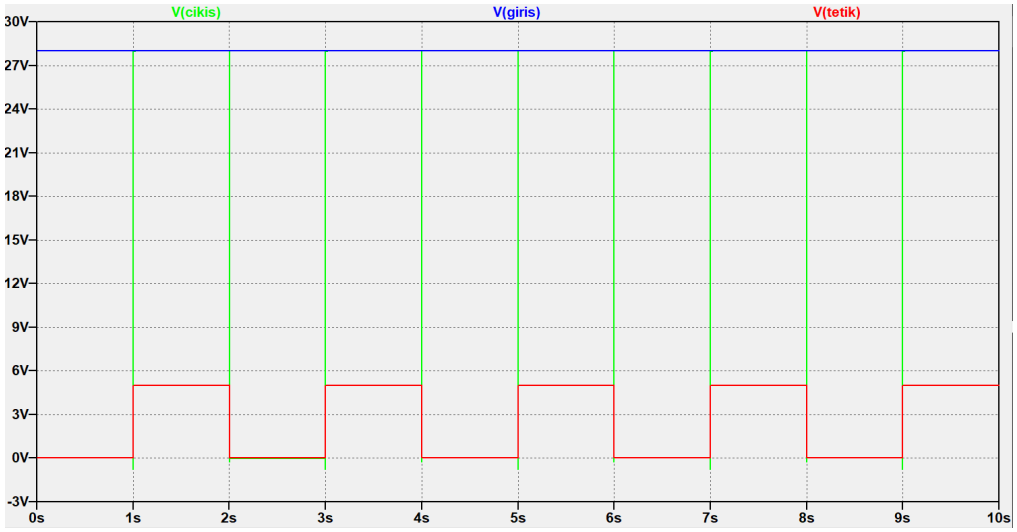
Şekil 4.14. Yüksek Taraf MOSFET Sürücü Devresi

Sürücü sadece hızlı açılma ve kapanma süreleri sağlamakla kalmaz, aynı zamanda yüksek gerilimlerde endüktif yüklerin sürülmesinde meydana gelebilecek yüksek dönüş oranlı geçişlerin varlığında TGUP ve TGDN çıkış gerilimlerini istenen durumda tutar [46].



Şekil 4.15. MOSFET Sürücü Devresi Simülasyon Şeması

Şekil 4.16.'da 0-10 saniye zaman aralığında gösterilen grafikte, 5 Volt, 0.5 Hz, %50 doluluk oranına sahip bir tetikleme sinyali, Drain pininde 28 Volt gerilim bulunan MOSFET Sürücü devresine uygulanmıştır. Devrenin tetikleme sinyaline verdiği tepkinin simülasyonu gösterilmiştir.



Şekil 4.16. MOSFET Sürücü Devresi Simülasyon Grafiği

Çıkış geriliminin, tetikleme sinyalinin durumuna göre anahtarlanmış olduğu gözlemlenmektedir.

4.4. Fonksiyonel Devrelerin Tasarımı ve Simülasyonları

Bölüm 3'te fonksiyonel birimlerin işlevlerinden, bağlı olduğu gereksinimlerden, bu gereksinimlerin dayandırıldığı referans dokümanlardan [38,39] ve birimlerde kullanılan yöntemler gözden geçirilirken, Bölüm 4.1.'de bu birimlerden oluşan ana sistem şeması verilmiştir.

Bu bölümde verilen bilgiler, fonksiyonel birimlerin bilgisayar simülasyonları ile gerçekleştirilmiş test sonuçlarını içermektedir.

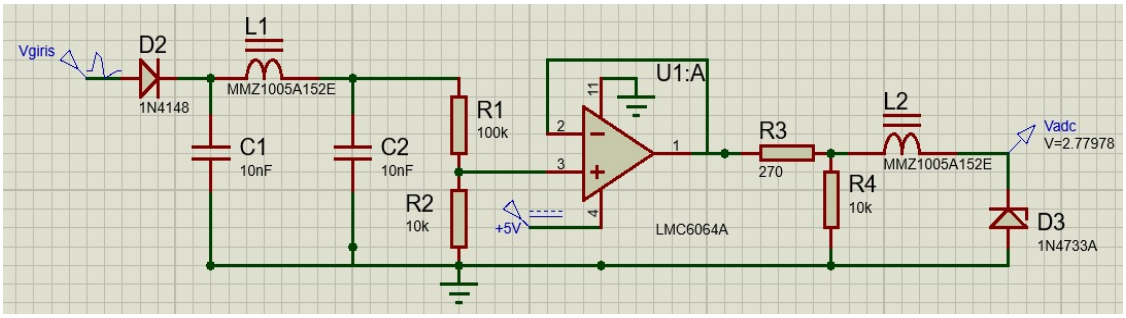
4.4.1. Gerilim Ölçüm Devresi

Gerilim ölçümleri, ters gerilime karşı koruma amaçlı diyot (1N4148 [47]), gerilim bölücü devresi, bunu takiben işlemsel yükselteç (LMC6064 [48]) tabanlı tampon devre ve mikrodenetleyici analog pin girişini koruma amaçlı zener diyot (1N4733A [49]) devreleri ile gerçekleştirilmektedir.

Gerilim izleyici veya birim kazanç yükselticisi olarak da bilinen bir gerilim tamponu devresi, kazancı 1 olan bir yükseltici devresidir. Bu devre kazanç anlamında herhangi bir gerilim amplifikasyonu sağlamasa da, bu devre yüksek çıkış empedans seviyesine sahip

bir devreden, düşük giriş empedans seviyesine sahip ikinci bir devreye bir gerilim aktarmakta olduğundan son derece kullanışlı olmaktadır.

Gerilim ölçüm devresinin şematik diyagramı Şekil 4.17.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Gerilim Ölçüm Devresinin Şematik Gösterimi.

$$V_+ = V_- \qquad V_+ = \frac{(V_{giriş} - V_{D2}) \times R_2}{R_1 + R_2} \qquad V_- = \frac{V_{adc} \times (R_3 + R_4)}{R_4} \tag{4.1}$$

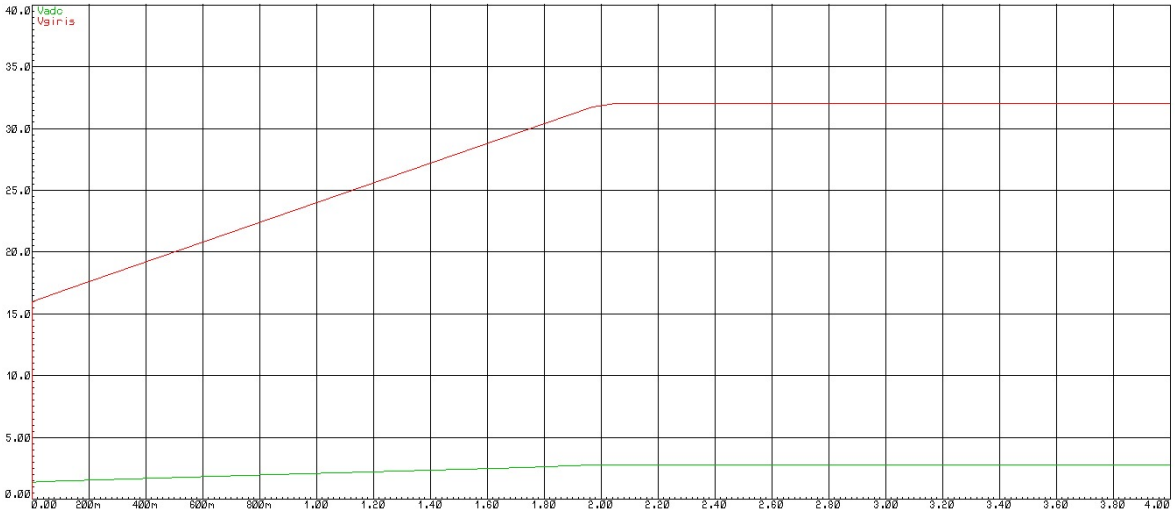
$$\frac{(V_{giriş} - V_{D2}) \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{V_{adc} \times (R_3 + R_4)}{R_4} \qquad V_{adc} = \frac{(V_{giriş} - V_{D2}) \times (R_2 \times R_4)}{(R_3 + R_4) \times (R_1 + R_2)} \tag{4.2}$$

Üstte, (4.2)'da verilen denklemde 16-32 Volt çalışma gerilimi aralığındaki değerleri, ADC yardımı ile okumak amacıyla analog pinden okunabilir değerlere indirgenmiştir. (4.3)'de 16 ve 32 Volt değerleri için çıktı değerler hesaplanmıştır.

$$V_{adc} = \frac{(32 - 0.45) \times (10k \times 10k)}{(270 + 10k) \times (100k + 10k)} = 2{,}792\ V \tag{4.3}$$

$$V_{adc} = \frac{(16 - 0.45) \times (10k \times 10k)}{(270 + 10k) \times (100k + 10k)} = 1{,}376\ V$$

Şekil 4.18.'de 0-2 saniye arasında 16 Volttan başlayarak doğrusal olarak artarak 32 Voltta sabitlenen bir giriş gerilimi uygulanmasının simülasyonu gösterilmiştir.

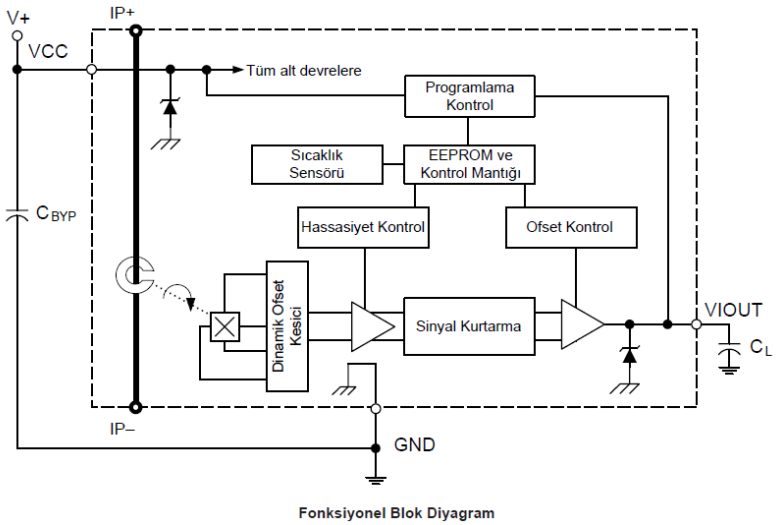


Şekil 4.18. Giriş Gerilimi Uygulamasının Simülasyonu.

4.4.2. Akım Ölçüm Devresi

Akım ölçümleri, Allegro tarafından ACS770 Hall Effect lineer akım sensörü kullanılarak gerçekleştirilmektedir. ACS770 lineer akım sensörünün başlıca avantajları mükemmel doğruluk ve doğrusallık, tek kutuplu güç kaynağı gereksinimi, PCB uyumlu yapısı ve mikrodenetleyicilerin ADC pinleriyle uyumlu 0-5V çıkış sinyal aralığıdır.

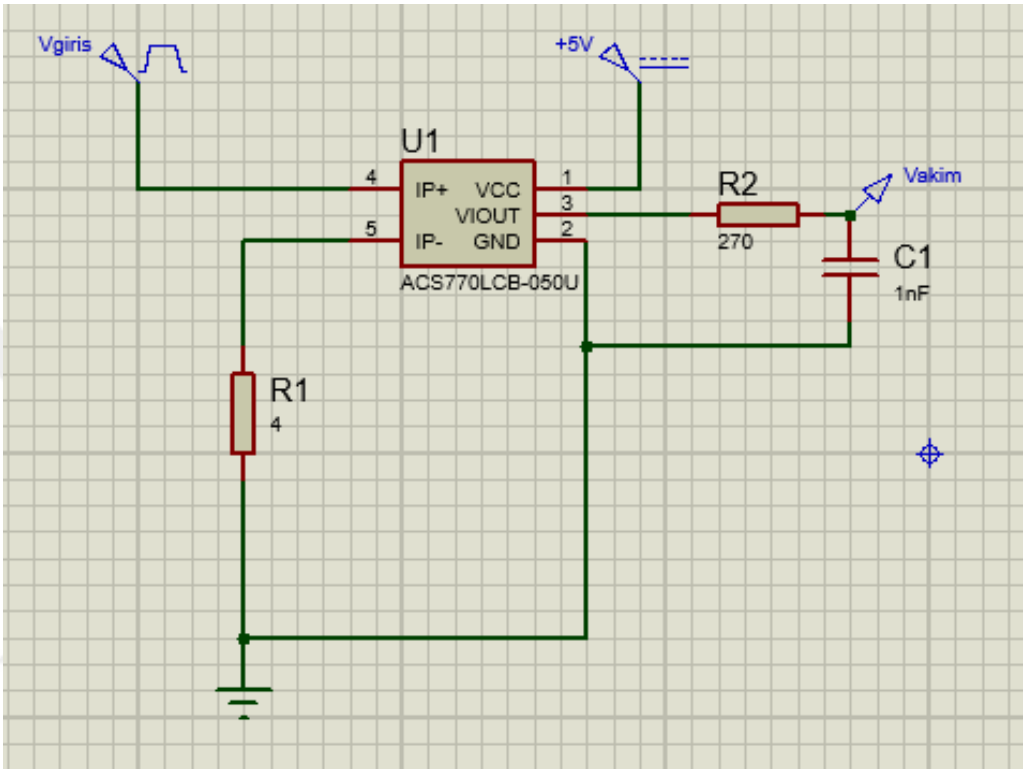
Akım ölçüm entegresinin şematik diyagramı Şekil 4.19.'da gösterilmektedir.



Şekil 4.19. Akım Ölçüm Entegresinin Şematik Diyagramı [50].

ACS770'in nominal giriş akımı değeri tek yönlü 50A'dır ve bu akım sensörü kullanılarak 50A'ya kadar olan akım seviyeleri ölçülebilmektedir. Bununla birlikte, uygulanan süperkapasitör şarj devresi nominal değeri 7A'dir [50].

Akım ölçüm devresinin giriş-çıkış ilişkisi Şekil 4.20.'de verilmiştir.



Şekil 4.20. Akım Ölçüm Devresinin Giriş-Çıkış İlişkisi.

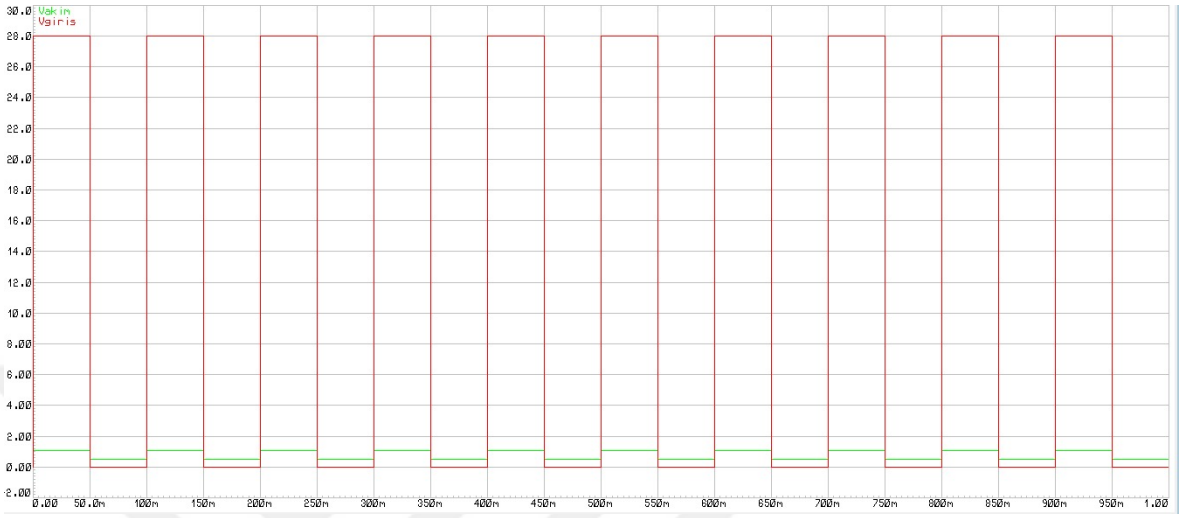
Aşağıda, (4.4)'de verilen denklemde 0-50 Amper çalışma akımı aralığındaki değerleri gerilim birime çevirerek ADC yardımı ile okumak amacıyla analog pinden okunabilir değerlere indirgenmiştir.

$$\mathbf{V_{akım}} = \mathbf{0.5} + (\boldsymbol{I_P} \times \mathbf{0.08}) \qquad \boldsymbol{I_P} = \frac{(\boldsymbol{V_{akım}} - \mathbf{0.5})}{\mathbf{0.08}} \tag{4.4}$$

(4.5)'de, $V_{Giriş}$=28V R1=4Ω yani I_P = 7A değerleri için çıktı değerler hesaplanmıştır.

$$\mathbf{V_{akım}} = \mathbf{0.5} + (\mathbf{7} \times \mathbf{0.08}) = \mathbf{1.06\ V} \tag{4.5}$$

Şekil 4.21.'de 0-1 saniye arasında 28 Volt, 10 Hz, %50 doluluk oranına sahip darbe genişlik modülasyonu sinyali uygulanmıştır. Giriş gerilimi ve yük direnci ile oluşan akım okuma devresinin uygulanmasının simülasyonu gösterilmiştir.



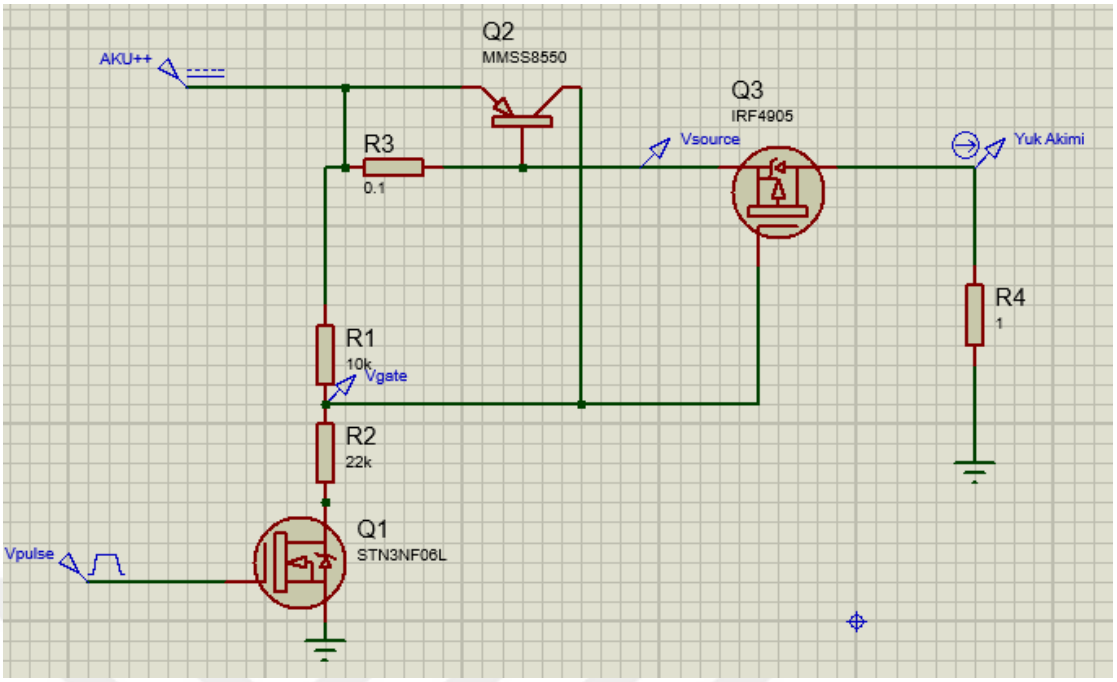
Şekil 4.21. Akım Okuma Devresinin Uygulanma Simülasyonu.

4.4.3. Akım Koruma Devresi

Bu devre, akımla sınırlı bir DC çıkış gerilimi sağlamaktadır. Hedeflenen değer, devre çıkış akımının maksimum 7A ile sınırlanması olarak belirlenmiştir. Normal çalışma sırasında (yani yük akımının sınır değerin altında kaldığı durumda) MOSFET tamamen açık olmalıdır.

Yük, akım sınırına ulaşılan noktaya kadar arttığında (yük direnci azaldığında), çıkış akımı tasarım sınırının aşılmamasını sağlamak için devre çıkış gerilimini düşürmelidir. Akım koruma devresinin şematik gösterimi Şekil 4.22.'de verilmiştir.

Şematiğe bakıldığında, Q3'e, R1 ve R2'ye bağlı bir gerilim bölücü devresi aracılığıyla anahtarlama yapılmaktadır. Bu devre için nominal besleme gerilimi 28V'tur. IRF4905 veri föyünde, kaynak gerilimine minimum geçit $V_{GS} = -20V$ şeklinde belirtilmiştir [51].



Şekil 4.22. Akım Koruma Devresi Şematik Gösterimi.

Q3 MOSFET'inin Gate gerilim değeri, gerilim bölücü devresinden sağlandığından;

$$\frac{V_{Giriş} \times R_2}{R_1 + R_2} - V_{Giriş} \geq -20\,V \tag{4.6}$$

olmak zorundadır.

Giriş gerilimi değeri maksimum 32V olarak seçildiği taktirde

$$\frac{32 \times R_2}{(R_1 + R_2)} - 32 \geq -20\,V \qquad 5R_2 \geq 3R_1 \qquad \frac{5}{3}R_2 \geq R_1 \tag{4.7}$$

Bununla birlikte, Q3'ü açmak için, Gate geriliminin eşik gerilimi V_T'den düşük olması sağlanmalıdır. Ayrıca, Q3'ün tamamen açık olması istenildiğinden, $V_{GS} \leq -10V$ olacak şekilde tasarlanmalıdır [51].

Bu nedenle,

$$\frac{32 \times R_2}{(R_1 + R_2)} - 32 \geq -10\,V \qquad 5R_2 \leq 11R_1 \qquad \frac{5}{11}R_2 \leq R_1 \tag{4.8}$$

(4.7) ve (4.8) denklemlerinden,

$\frac{5}{11}R_2 \leq R_1 \leq \frac{5}{3}R_2$ eşitsizliği bulunmaktadır.

R_2 = 22 kΩ olarak seçildiğinde;

$10k\Omega \leq R_1 \leq 36{,}67k\Omega$ eşitsizliği bulunmaktadır.

Bu eşitsizliğe göre de R_1 = 10 kΩ olarak seçilmiştir.

Devrenin mevcut sınırlama yetenekleri, MMSS8550 PNP transistörü, Q_2 ile bağlantılı olarak algılama direnci R_3 tarafından sağlanmaktadır.Akım I_L pozitif besleme gerilimini, Q_3 üzerinden yüke geçerken, algılama direnci R_3 boyunca bir gerilim düşüşü sağlayacaktır. Bu gerilim düşüşü Ohm yasası tarafından I_LR_3 olarak verilmekte ve Q_2'nin V_{EB} gerilimine eşit olmaktadır.Q2 transistörünün iletim gerilimi, V_{EB} ileri diyot düşüş gerilimini (yaklaşık 0,7V) aşana kadar kapalı kalacaktır.

Bu nedenle, Ohm yasasına göre, Q_2'nin V_{EB} gerilimini 0.7V diyot düşüşünü aştığı zaman R_3 üzerinden geçen akımın değeri şu şekilde verilecektir:

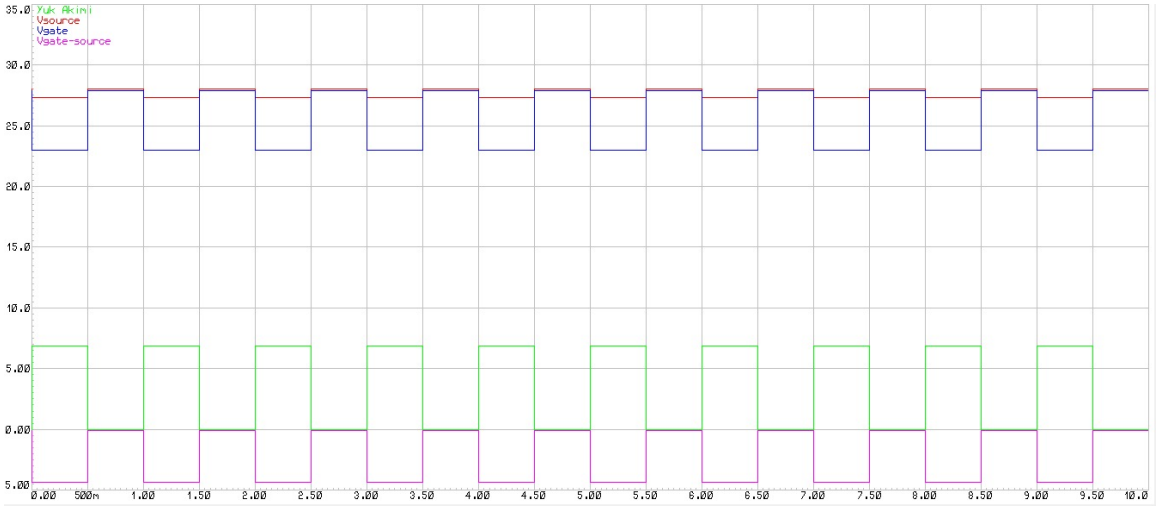
$0.7V = 0.1I_L$ veya I_L = 7A.

V_{EB} 0.7V'nin üzerine çıktığında, akım Q_2 kollektöründen dışarı ve R_2'den şaseye akmaya başlamaktadır. Bu nedenle, R_2'den geçen toplam akım, Q_2 kollektöründen sağlanan miktar kadar artacaktır.

R_2 üzerinden artan akımın net etkisi Q_3'ün Gate geriliminde bir artış ve dolayısıyla V_{GS} geriliminde bir artış sağlamaktadır.

V_{GS}, V_T'ye yaklaşıncaya kadar yükselmeye devam edecek ve bu noktada Q_3 kapanmaya başlayacak, yük akımı I_L'yi ve dolayısıyla Q_2'nin kollektör akımını azaltacaktır; böylece V_{GS} gerilimini düşürecektir. Nihayetinde, Q_3'ün I_L'yi yaklaşık 7A ile sınırlayan bir V_{GS} değerini sağlamak için yeterli akımı sağladığı bir dengeye ulaşılacaktır.

Şematiğe bakıldığında, Q_1 MOSFET'i gerilim bölücü devresini etkisiz kılarak Q_3'ün V_{GS} gerilimini 0V olarak ayarlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu şekilde tüm devrenin akım çıkışı kontrol edilmektedir. Şekil 4.23.'de akım koruma devresi simülasyonu gösterilmiştir.



Şekil 4.23. Akım Koruma Devresi Simülasyonu.

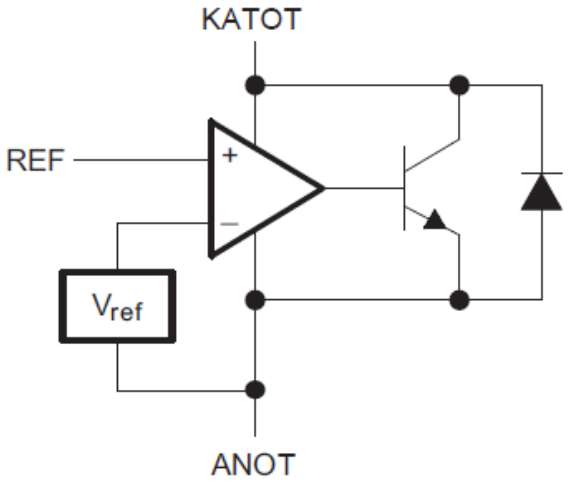
Şekil 4.23.'de 0-10 saniye arasında 28 Volt, 1 Hz bir gerilim uygulanmıştır. Giriş gerilimine göre yük akımının 7A değerini geçmediği simülasyonda gösterilmiştir.

4.4.4. Süper Kapasitör Şarj Dengeleme Devresi

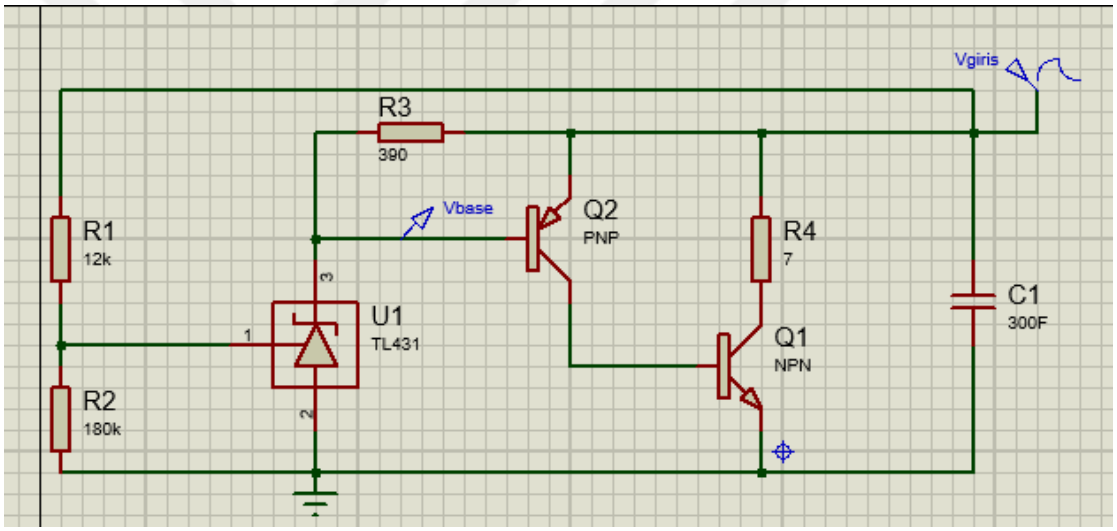
Süper kapasitör hücreleri, talep üzerine enerjiyi hızla boşaltabilen verimli depolama alanı sağlamaktadır. En yüksek performansı ve uzun bir ürün yaşam döngüsünü sağlamak için süper kapasitörlerin gerilimleri dengelenmelidir. Hücreler arasındaki kaçak akım farklılıklarından dolayı bir dengesizlik meydana gelmesi mümkündür. Bunun oluşması durumunda bir enerji tahliyesi tetiklenebilmekte ve bu da süperkapasitör hücrelerinin erken arızalanmasına neden olabilmektedir.

TL431 entegresinin şematik diyagramı Şekil 4.24.'de gösterilmektedir.

Şekil 4.24.'de diyagramı verilen entegre, güç elektroniğinden sinyal işlemeye kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanım alanlarına sahiptir. Bunun nedeni, doğru bir gerilim referansı ve karşılaştırıcı işlevsel yükselteç devresi içermesidir. TL431, tek bir gerilim referansı, hata yükselteci, gerilim kelepçesi veya dahili referanslı karşılaştırıcı olarak kullanmaktadır [52].



Şekil 4.24. TL431 Entegresinin Şematik Diyagramı [52].



Şekil 4.25. Süper Kapasitör Şarj Dengeleme Devresi Şematik Gösterimi.

Şekil 4.25.'e bakıldığında, U_1 entegresinin V_{REF} değeri, R_1 ve R_2'ye bağlı bir gerilim bölücü devresi aracılığıyla ayarlanmaktadır.

$$V_{REF} = \frac{V_{Giriş} \times R_2}{R_1 + R_2} \tag{4.9}$$

$V_{Giriş}$ = 2.7 V, V_{REF} = 2.5 V ve R_2 = 180kΩ değerleri için;

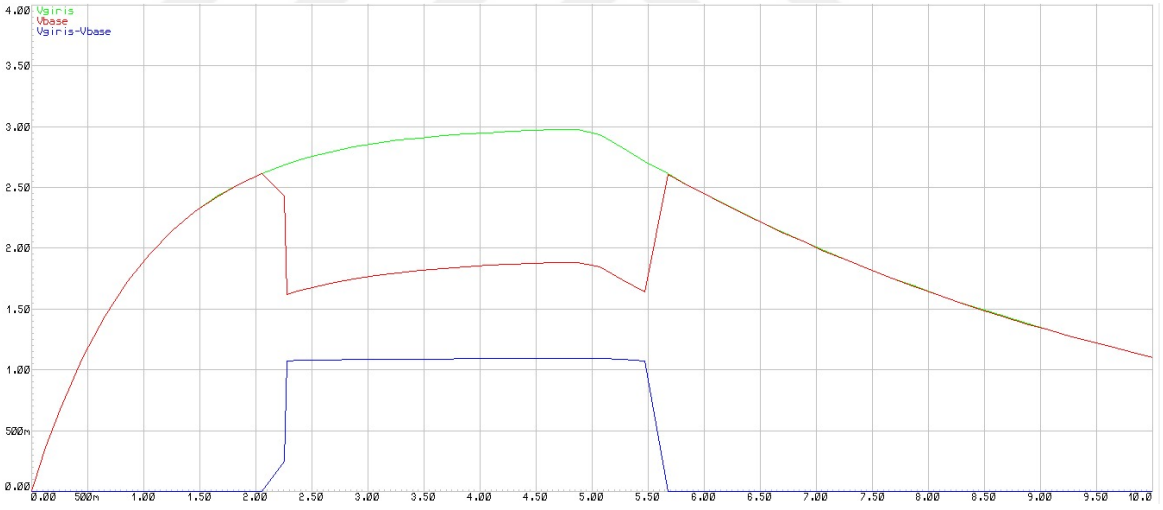
$$2.5\,V = \frac{2.7 \times 180 \times 10^3}{(180 \times 10^3) + R_1}$$

$R_1 = \frac{0.2 \times 180 \times 10^3}{2.5} = 14.4k\Omega$ bulunmaktadır. R_1 yaklaşık olarak 12kΩ seçilmiştir.

Devrenin dengeleme yetenekleri, NPN ve PNP transistörleri, U_1 entegresinin referans gerilimi ile bağlantılı olarak R_1 ve R_2 gerilim bölücü devresi tarafından sağlanmaktadır.

$V_{Giriş}$ besleme gerilimi ile C_1 kapasitörü şarj edilirken, U_1 entegresinin referans gerilim pini değeri, U_1 entegresi içerisinde bulunan karşılaştırıcı işlevsel yükselteç aracılığı ile $V_{Giriş}$.gerilimine doğru orantılı şekilde değişmektedir.

U_1 entegresinin dahili referans gerilimi 2.5 Volttur [52]. Bu sebeple eğer Vgiriş gerilimi yaklaşık 2.7 Voltu geçerse U_1'in REF pininde 2,53 Voltluk bir gerilim oluşmaktadır. Bu gerilim U_1 entegresinin dahili referans geriliminden fazla olduğundan dahili işlevsel yükseltecin çıkışı dahili NPN transistörü iletime geçirmektedir. Bu sayede Şekil 4.25'deki Q_1 ve Q_2 transistörleri tetiklenmiş olmakta ve R_4 direnci üzerinden geçen akım ile kapasite gerilimi 2.7 Volta düşene kadar süperkapasitör gerilim dengelemesi yapılmaktadır.

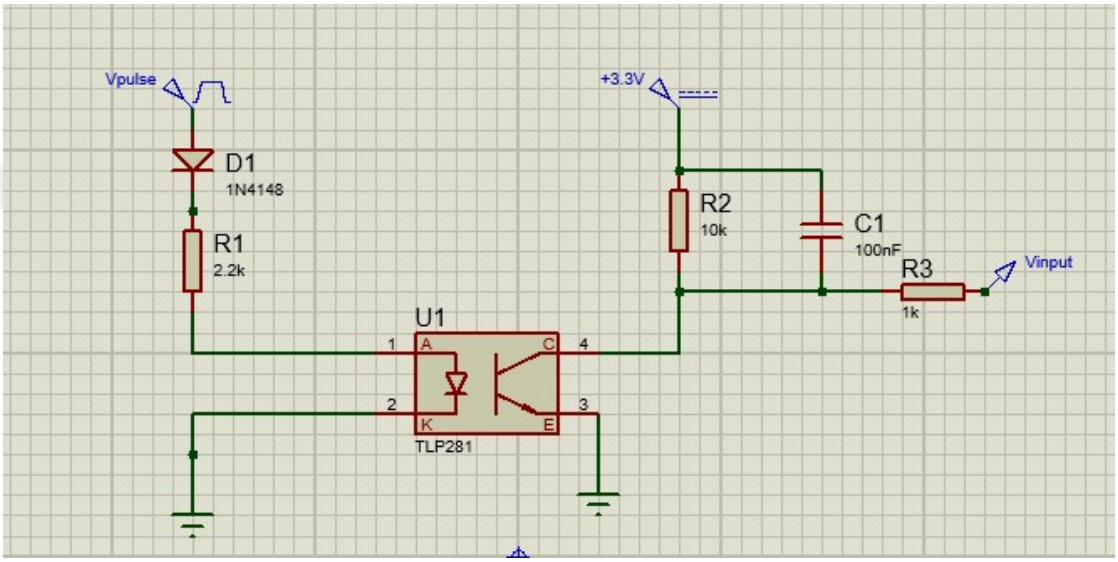


Şekil 4.26. Süper Kapasitör Şarj Dengeleme Devresi Simülasyonu.

Şekil 4.26.'da 0-10 saniye arasında 0-3 Volt aralığında bir gerilim uygulanmaktadır. Şekil 4.26.'da görüldüğü üzere $V_{Giriş}$ gerilimi 2.6V eşik değerinde süper kapasitör gerilim dengeleme devresinin çalıştığı simülasyonda gösterilmiştir.

4.4.5. Sayısal Sinyal Okuma Devresi

Opto-izolatörler olarak da bilinen optokuplörler, kızılötesi ışık kullanarak iki izole devre arasında elektrik sinyallerini aktaran bileşenlerdir. Bir izolatör olarak, bir optokuplör, yüksek gerilimlerin sinyali alan devrenin tarafını etkilemesini önleyebilmektedir. Bir ışık bariyeri üzerinden kızılötesi ışık yayan bir diyot ve fototransistör gibi ışığa duyarlı bir ürün kullanarak sinyallerin aktarılması, bir optokuplörün ana yapısını oluşturmaktadır.



Şekil 4.27. Sayısal Sinyal Okuma Devresi Şematik Gösterimi.

Şekil 4.27.'de görüldüğü üzere, giriş sinyali D_1 diyotuna, R_1 direnci ve U_1'e bağlı olarak okunmaktadır. Çıkış sinyali sayısal, yani 0 (YOK) veya 3.3V (VAR) olarak, izole bir şekilde aktarılmaktadır [53].

Devredeki R_1 direnci için bir değer seçimi yapılmalıdır. İzolasyonlu okumanın başarılı bir şekilde sağlanabilmesi için veri föyünden Anot ve Katot pinleri arasında 10 ila 50 mA arasında bir akım taşınması gereklidir. Bu akım değeri R_1 direnç değerine bağlıdır [53].

TLP281 veri föyünden elde edilen maksimum ve minimum I_F değerileri üzerinden R_1 direnç değeri için ideal aralık bulunmaktadır.

$$V_{PULSE} = V_{AK} + V_{D1} + (I_F \times R_1) \tag{4.10}$$

$$28\,V = 1 + 0.45 + (I_F \times R_1) \qquad R_1 = \frac{26{,}55}{I_F} \tag{4.11}$$

I_F = 10 mA için;

$$R_{1\,MAX} = \frac{26.55}{10^{-2}} = 2655\ \Omega \tag{4.12}$$

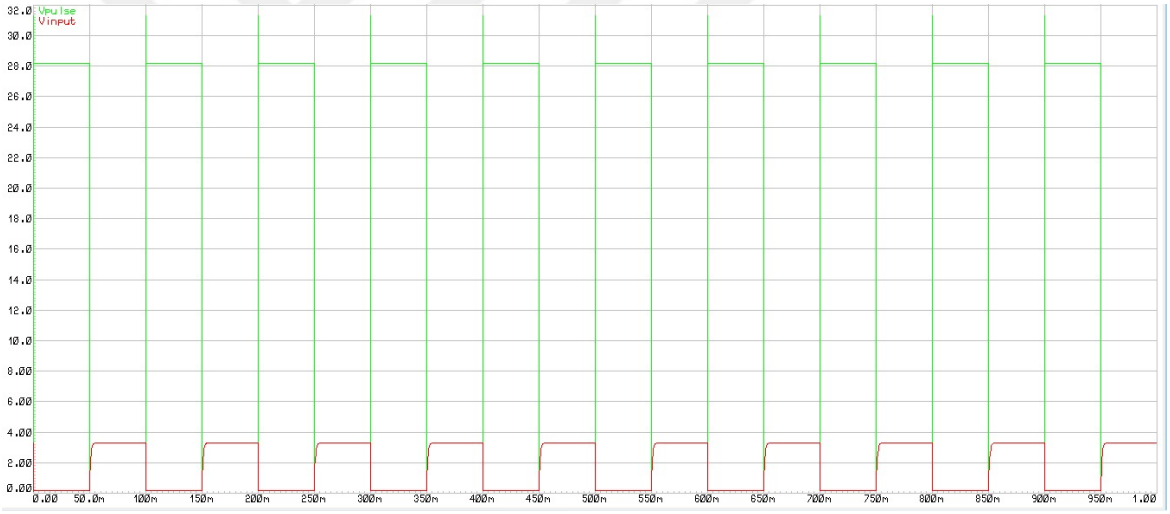
I_F = 50 mA için;

$$R_{1\,MIN} = \frac{26.55}{5\times10^{-2}} = 511\ \Omega \tag{4.13}$$

(4.12) ve (4.13) denklemlerinden,

$511\ \Omega \leq R_1 \leq\ 2655\ \Omega$ eşitsizliği bulunmaktadır.

Çok yüksek bir akım gereksinimi oluşması istenmediğinden R1 direnç değeri 2.2kΩ olarak seçilmiştir.



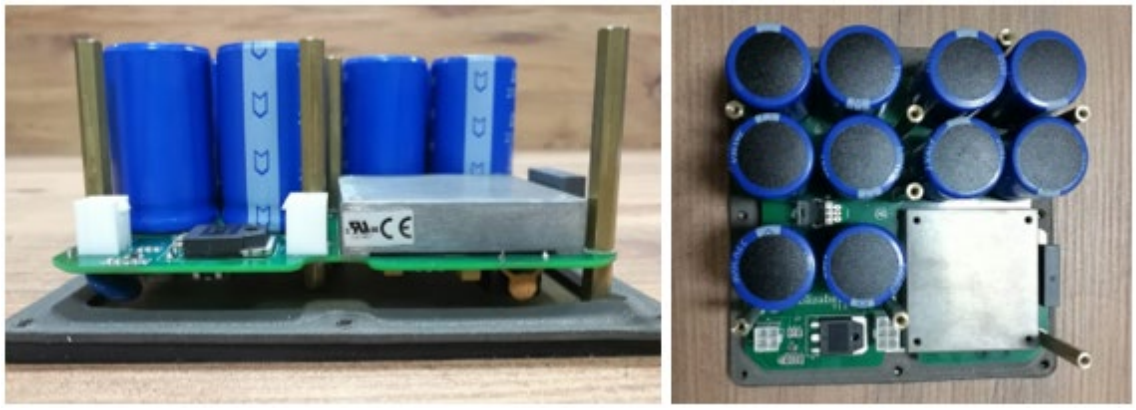
Şekil 4.28. Sayısal Sinyal Okuma Devresi Simülasyonu.

Şekil 4.28.'da 0-1 saniye arasında 28 Volt, 10 Hz, %50 doluluk oranına sahip darbe genişlik modülasyonu sinyali uygulanmıştır. Giriş ve çıkış sinyali devresinin simülasyonu gösterilmiştir.

4.5. Fonksiyonel Test Çıktıları

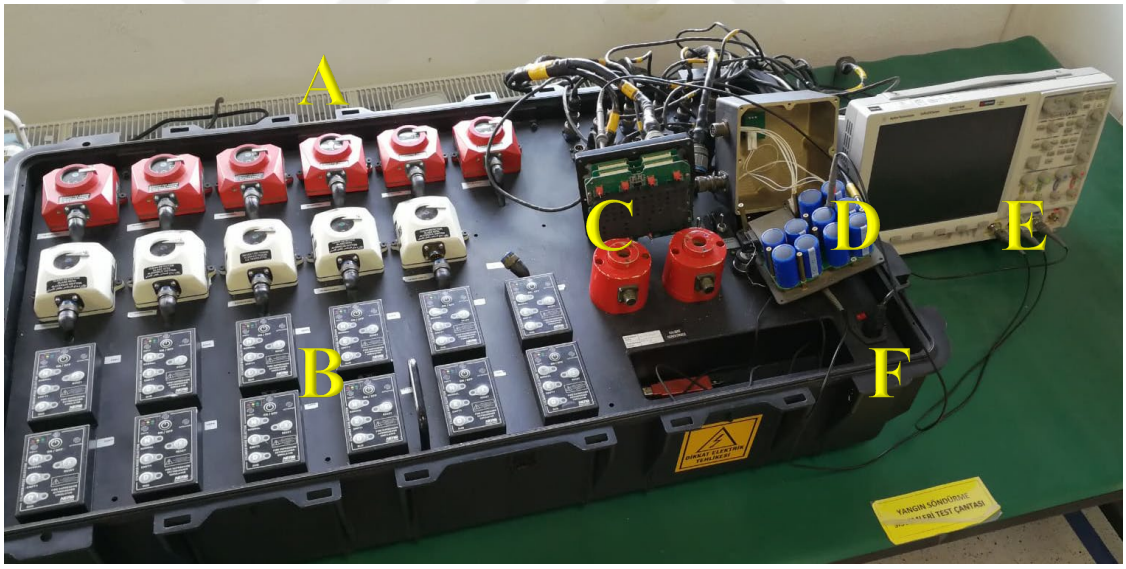
Bu bölümde bir Agilent / Keysight InfiniiVision MSO7104A karışık sinyal osiloskopu kullanılarak bölüm 4.1.'de belirtilen kısıtlamalara ve sınırlandırmalara göre bir içten yanmalı motorlu araçlarda kullanılmak üzere özelleştirilmiş süperkapasitör beslemeli

gerilim düzenleyici fonksiyona sahip bir yedek güç sisteminin davranışlarını ölçmek ve kaydetmek için kullanılmıştır.



Şekil 4.29. Yedek Güç Sistemi Yandan ve Üstten Görünümü

Şekil 4.29.'da tasarlanan Yedek Güç Ünitesi sisteminin gerçeklenmiş hali gösterilmektedir.



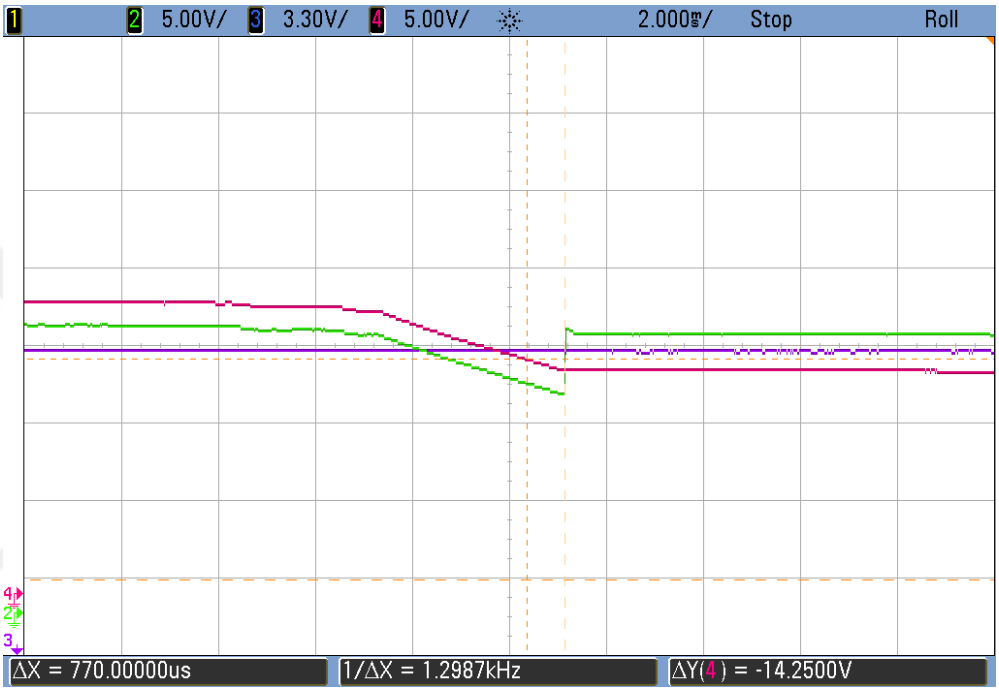
Şekil 4.30. Test Düzeneği

A- Alev Dedektörü **B**-Tüp Simülatörleri **C**-YSİB Sistemi Kontrol Kutusu

D-Yedek Güç Ünitesi **E**- Osiloskop **F**-Yangın Söndürme Sistemi Test Çantası

Şekil 4.30.'de gösterilen düzenekte solda bir Yangın Söndürme ve İnfilak Bastırma Sistemi test çantası örnek olarak kullanılmıştır. Bu çanta gerçek bir sistemin birebir simüle edilmesini sağlamaktadır.

Test sisteminin dinamik performansını ölçmek ve süperkapasitör terminal geriliminin anlık değişimini görmek için askeri sistemlerde kullanılan yangın ve infilak bastırma sistemi, 0-32V 3A güç kaynağı ve 18V-32V 50A güç kaynağı ile test edilmiştir. Osiloskop ve prob çifti sayesinde süper kapasitör test sisteminin dinamik ve sabit durum performansını tanımlayan dalga formları elde edilebilmekte ve süperkapasitörlerin ölçümleri yapılabilmektedir.



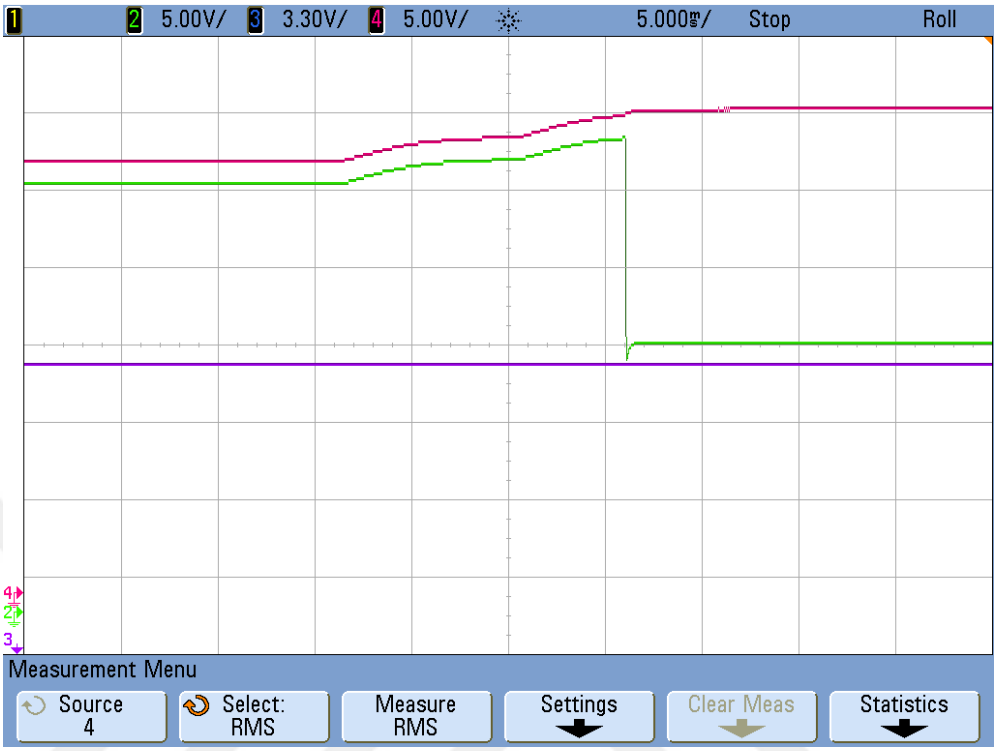
Şekil 4.31. Ani Gerilim Düşümü.

Ani gerilim düşmesi durumunun osiloskop gösterimi için besleme geriliminin **(Kanal 2 - Pembe)**, süperkapasitör geriliminin **(Kanal 4 - Mor)** ve çıkış geriliminin **(Kanal 3 - Yeşil)** ölçeklendirilmiş versiyonu Şekil 4.31.'de gösterilmektedir. Besleme kaynağından güç sağlandığı gösterilen bir senaryoda ani gerilim düşüşü simüle edilmiştir.

Ani gerilim düşüş senaryosunda besleme gerilimi 16 Voltun altında kaldığı durumlarda eğer süperkapasitör gerilimi belirlenen aralıkta ise sistem çıkışı süper kapasitör üzerinden sağlanmaktadır.

Bu ani gerilim düşüşü durumunda besleme gerilimi yaklaşık olarak 15.4V olduğunda sistem çıkışı karar mekanizması tarafından besleme kaynağından süper kapasitör enerji

kaynağı arasında geçiş yapılmıştır. Besleme geriliminin alt sınırı olan 16 Volttan, 15.4 Volta düşümü yaklaşık 770 us olarak ölçülmüştür.

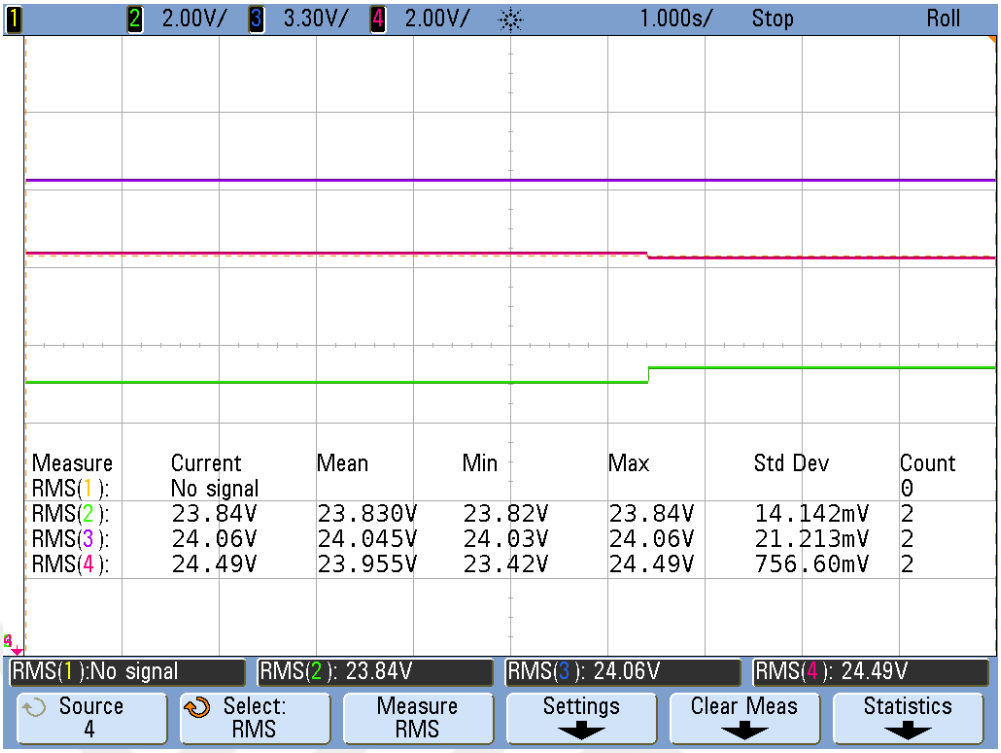


Şekil 4.32. Ani Gerilim Yükselimi.

Ani gerilim yükselmesi durumunun osiloskop gösterimi için besleme geriliminin **(Kanal 2 - Pembe)**, süperkapasitör geriliminin **(Kanal 4 - Mor)** ve çıkış geriliminin **(Kanal 3 - Yeşil)** ölçeklendirilmiş versiyonu Şekil 4.32.'de gösterilmektedir. Besleme kaynağından güç sağlandığı gösterilen bir senaryoda ani gerilim yükselimi simüle edilmiştir.

Ani gerilim yükselimi senaryosunda besleme gerilimi 32 Voltun üzerinde kaldığı durumlarda eğer süperkapasitör gerilimi belirlenen aralıkta ise sistem çıkışı süper kapasitör üzerinden sağlanmaktadır.

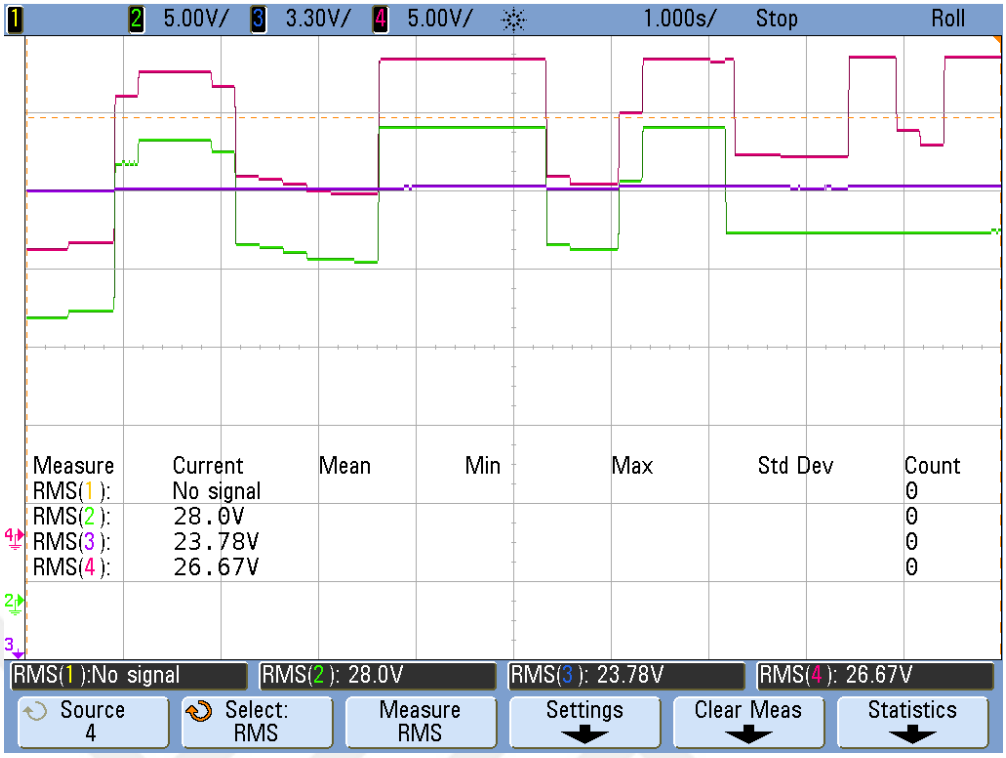
Bu ani gerilim yükselmesi durumunda besleme gerilimi yaklaşık olarak 32.4 Volt olduğunda sistem çıkışı karar mekanizması tarafından besleme kaynağından süper kapasitör enerji kaynağı arasında geçiş yapılmıştır. Besleme geriliminin üst sınırı olan 32 Volttan, 32.4 Volta yükselimi yaklaşık 500 µs ila 1 ms arası olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.33. Sistem Çıkışının Süperkapasitörden Ana Beslemeye Geçişi.

Sistem çıkışının süperkapasitörden ana beslemeye geçiş durumunun osiloskop gösterimi için besleme geriliminin **(Kanal 2 - Pembe)**, süperkapasitör geriliminin **(Kanal 4 - Mor)** ve çıkış geriliminin **(Kanal 3 - Yeşil)** ölçeklendirilmiş versiyonu Şekil 4.33.'de gösterilmektedir. Süperkapasitör ile güç sağlandığı gösterilen bir senaryoda uygun besleme gerilimi sağlandığında sistem çıkışının süperkapasitörden ana beslemeye geçişi simüle edilmiştir.

Sistem çıkışının süperkapasitörden ana beslemeye geçiş senaryosunda besleme gerilimi 18-30 Voltun arasında kaldığı durumlarda sistem besleme geriliminin istenen aralıkta olduğunu 10 saniye olarak belirlenmiş bir süre ile doğrulama yaptıktan sonra sistem çıkışı ana besleme üzerinden verilmektedir.



Şekil 4.34. Besleme Geriliminde Dalgalanma.

Besleme geriliminde dalgalanmaların olması durumunun osiloskop gösterimi için besleme geriliminin **(Kanal 2 - Pembe)**, süperkapasitör geriliminin **(Kanal 4 - Mor)** ve çıkış geriliminin **(Kanal 3 – Yeşil)** ölçeklendirilmiş versiyonu Şekil 4.34.'de gösterilmektedir. Besleme kaynağında dalgalanmaların olduğu gösterilen bir senaryoda ani gerilim yükselimleri ve düşümleri simüle edilmiştir.

Şekil 4.34.'de görülen besleme gerilimindeki dalgalanmalar, Şekil 4.1. Sistem Tasarımı Şemasında belirtilen değer aralığında tolere edilebilmektedir. Bu aralığın dışındaki gerilim düşüm ve yükselimler çıkış gerilimine yansıtılmaması gerektiğinden, koruma ve karar mekanizması sistem çıkışını süperkapasitör üzerinden enerjilendirmektedir.

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar ve Performans

Süper kapasitörler, yüksek kapasitans, düşük ESR ve düşük nominal gerilim değerlerine sahip kapasitif enerji depolama cihazlarıdır. Tek bir süperkapasitör hücresi için, kapasitans değerleri 1000F'nin üzerinde, ESR değerleri 1mΩ'ün altında ve gerilim derecelendirmeleri 2,5-2.7 V seviyesinde bulunmaktadır [1,2]. Süper kapasitörlerin enerji yoğunluğu pillerden daha düşüktür. Bununla birlikte, süper kapasitörlerin maksimum güç kapasitesi pillerden daha yüksektir. Süper kapasitörler geleneksel kapasitörler ile karşılaştırıldığında; nispeten yeni olan bu depolama cihazlarının enerji yoğunluklarının, geleneksel kapasitörlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, geleneksel kapasitörlerin maksimum güç kapasitesi süper kapasitörlerden daha yüksektir.

Bahsedilen gerçeklere göre, süper kapasitörlerin, geleneksel kapasitörler ve piller [9,25] arasında yer alan enerji depolama cihazları olduğu açıkça görülmektedir.

Tez çalışması kapsamında, içten yanmalı motorlu araçlarda kullanılmak üzere özelleştirilmiş süperkapasitör beslemeli gerilim düzenleyici fonksiyona sahip bir yedek güç sistemi geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sistemin gereksinimleri MIL-STD-1275 ve MIL-STD-461 dokümanlarına uygun oluşturulmuş olup, tüm tasarım ve test aşamalarında bu dokümanlar göz önünde bulundurulmuştur.

Gereksinimlerden ve kısıtlamalardan çıkarımlar yapılarak tasarlanan fonksiyonel birim devrelerinin tasarım analizleri yapılmıştır. Tasarım analizi sonuçlarına göre devrelerin simülasyonları yapılıp analiz değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sistemin MIL-STD-1275 dokümanından çıkarılan gereksinimler, 28 Voltluk bir araçta marş anı bozulmalar, zarf spike geçiçi gerilim durumları ve gerilim dalgalanmaları gibi konuları kapsamaktadır. Çalışmada bu gereksinimler, sağlandığı simülasyonlar ve testler ile gösterilmiştir.

Sistem Tasarımı Şemasında görüldüğü üzere sistem akış diyagramı 3 ana kısıma bölünmüştür. Bu şema ve kısımlandırma yöntemi ile, sistemin fonksiyonları, gereksinimleri ve kısıtlamaları açıkça gösterilmiştir. Yapılan testlerde cihazın düşük gerilim ve yüksek gerilim durumlarında 1 milisaniyeden daha kısa bir sürede sistemi yedek güç ünitesine geçirdiği gözlenmiştir. Yedek güç ünitesinden güç kaynağına geçiş süresinin 10 saniye olduğu görülmüştür. Süper kapasitörlerin 7A ve üzerindeki şarj akımlarına karşı korunduğu ve 10 saniye boyunca 7A'in altında akım olduğunda şarjı yeniden başlattığı gözlenmiştir.

Sonuç olarak bu sistemin, 28V akü altyapısı bulunan araçlarda yangın söndürme ve infilak bastırma gibi kritik fonksiyonlara sahip sistemlerin hem enerji kaybı durumlarında kısa bir süreliğine çalışmasını sağlayacak, hem de araç üzerindeki elektriksel karakteristiğin bozulması durumunda sistemi koruyacak çözümü sağladığı gözlemlenmiştir.

5.2. Sistemin Oluşturduğu Dezavantajlar

Sistemin sağladığı avantajların yanında getirdiği bazı dezavantajlarda bulunmaktadır. Sistemde bulunan elektronik devrelerin ve süperkapasitörlerin sisteme bağlı yükün haricinde sürekli tükettiği bir güç bulunmaktadır. Ayrıca bağlı olduğu sistem için ilave bir birim daha olduğundan arıza oluşma ihtimali artmaktadır.

Sistemin sahip olduğu enerji yoğunluğu, diğer elektriksel enerji depolama yöntemlerine göre daha düşüktür ancak sağlayabildiği güç yoğunluğu yüksektir. Bu sebeple, gereken azami enerji yoğunluğunu sağlamak için kullanılması gereken süper kapasitör sayısı artmaktadır. Bu durum, araçta hacim ve ağırlık anlamında bir dezavantaj oluşturmaktadır.

5.3. Geliştirilecekler

5.3.1. Araçlarda Haberleşme – J1939

Otomotiv Mühendisleri Derneği SAE J1939 standardı, araç bileşenleri arasında iletişim ve teşhis için kullanılan, araç haberleşmesinde önerilen bir uygulamadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde otomobil ve ağır hizmet kamyonu endüstrisinde ortaya çıkan bu araçlar, şu anda dünyanın diğer bölgelerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır.

SAE J1939, ticari araç alanında ISO 11898'de tanımlanan fiziksel katman ile araç genelinde bağlantı ve iletişim için kullanılmaktadır. ISO 11992'de belirtilen çekici ve treyler arasında farklı bir fiziksel katman kullanılmaktadır.

SAE J1939, yedi katmanlı OSI ağ modelinde beş katmanı tanımlar ve bu, fiziksel ve veri bağlantısı katmanları için Denetleyici Alan Ağı (CAN) ISO 11898 spesifikasyonunu (yalnızca 29 bit / "genişletilmiş" tanımlayıcı kullanarak) içermektedir. J1939/11 ve J1939/15 altında, veri hızı 250 kbit/s olarak belirtilmektedir.

J1939/14 ile 500 kbit/s oturum ve sunum katmanları, spesifikasyonun parçası değillerdir ve CAN-FD'nin sonraki kullanımı şu anda tartışılmaktadır [54].

İstek paketi haricindeki tüm J1939 paketleri, sekiz baytlık veri ve mesajın 29-bit tanımlayıcısında gömülü olan Parametre Grup Numarası (PGN) adlı bir indeksi içeren standart bir başlık içermektedir. PGN, bir mesajın işlevini ve ilişkili verileri tanımlamaktadır. J1939, çok çeşitli otomotiv, tarım, denizcilik ve arazi aracı amaçlarını kapsayacak şekilde standart PGN'leri tanımlamaya çalışmaktadır. Tescilli kullanım için bir dizi PGN (00FF0016'dan 00FFFF16'ya kadar dahil) ayrılmıştır. PGN'ler, benzersiz veriler için tanımlanan değişken sayıda Şüpheli Parametre Numarası (SPN) öğelerinden oluşan verileri tanımlamaktadırlar. Örneğin, motor devri için önceden tanımlanmış bir SPN bulunmaktadır [54].

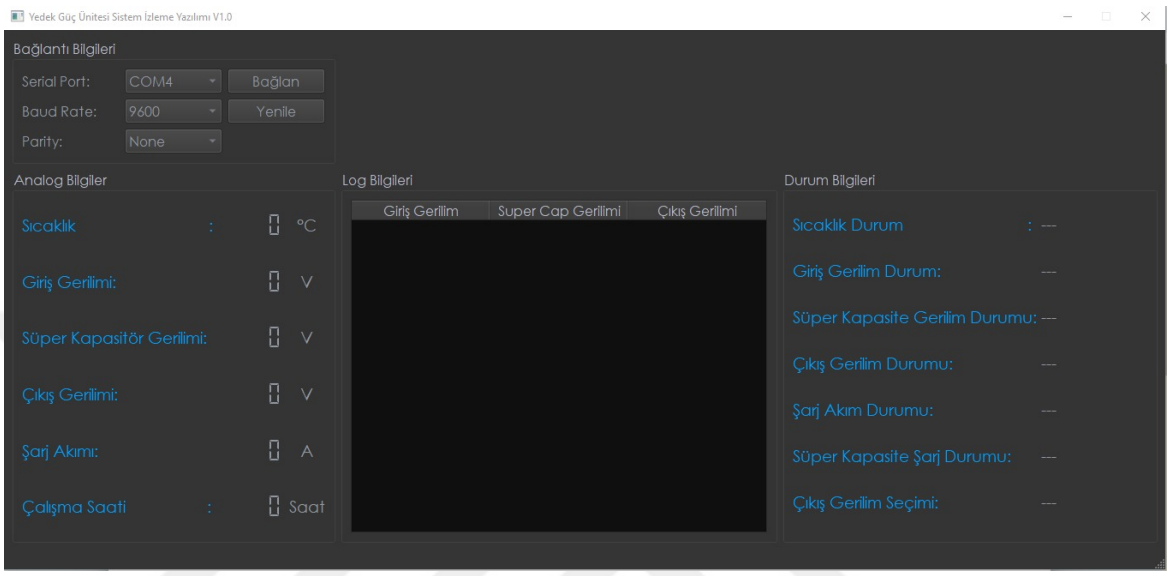
Anlatılan standartlara uygun araçlardaki diğer birimler ile arada kurulan bir veri ağıyla, tasarlanan sisteme ve sisteme bağlı olan yüke ait önemli bilgiler paylaşılabilmektedir.

5.3.2. Masaüstü Yazılımı

Gömülü sistemler için etkili kullanıcı arayüzü tasarımı, kullanıcı arayüzünün önemli olduğunu kabul etmek ve ardından kullanıcıları tasarım ve geliştirme sürecinin merkezine koymakla başlamaktadır. Gömülü sistem geliştiricilerinin, insan-makine etkileşiminin yerleşik genel ilkelerinin yanı sıra, kendi gömülü sistem uygulamalarını karakterize eden özelliklerin ve kısıtlamaların farkında olmaları gerekmektedir. Bu sebeple, donanım ve yazılım tasarımı sorunlarını birbirine bağlayan bir görüşe ihtiyaç duyulmaktadır.

Donanım ve yazılım arasındaki ilişki, gömülü sistem programlamasında merkezi bir konu olarak görülmektedir. Gömülü sistem programcıları, yazılım geliştirme dünyasında

yaptıklarının özel, hatta benzersiz olduğunu düşünmekten hoşlanmaktadırlar. Özel yönlerin katalogları önerilmiş olsa da, her şey söylendiğinde ve yapıldığında, gömülü sistem programlaması diğer tüm bilgisayar programlamalarıyla aynı bileşenlere sahip görünmekte, yalnızca oranlar farklılık gösterebilmektedir.



Şekil 5.1. Örnek Masaüstü Yazılım Arayüzü.

Şekil 5.1.'de yedek güç ünitesi sistemi için örnek olarak hazırlanmış bir masaüstü yazılımı gösterilmektedir. Masaüstü yazılımı yedek güç ünitesindeki bilgileri anlık olarak takip edilmesine olanak sağlayabilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Maxwell Technologies. (2009). MC Power Series BOOSTCAP Ultracapacitors Datasheet (Doc. No. 1009361, Rev. 9). ABD, California: Maxwell Technologies.

[2] Ioxus Inc. (2010). Series: Prismatic EDLC 5000F Datasheet. New York: Ioxus Inc., from http://datasheet.elcodis.com/pdf/47/97/479733/rsc2r7508sp.pdf

[3] Cornell Dubilier Electronics Inc. (2010). High Capacitance Snap in Electrolytic Capacitors, Product Catalog.

[4] Maxwell Technologies. (2009). BOOSTCAP® Ultracapacitors Product Guide Datasheet (Doc. No. 1014627.1). ABD, California: Maxwell Technologies.

[5] Hua, C. C. ve Lin, M. Y. (2000). A study of charging control of lead-acid battery for electric vehicles. In ISIE'2000. Proceedings of the 2000 *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1,* 135-140.

[6] Masserant, B. J. ve Stuart, T. A. (1997). A maximum power transfer battery charger for electric vehicles. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 33-3,* 930-938.

[7] Barrade, P., Pittet, S. ve Rufer, A. (2000). Series connection of supercapacitors, with an active device for equalizing the voltages. PCIM200, Nürnberg, Germany.

[8] Shah, V. A., Joshi, J. A., Maheshwari, R. ve Roy, R. (2008). Review of ultracapacitor technology and its applications. In Proceedings of the 15th National Power System Conference, 142-147.

[9] Schneuwly, A. ve Gallay, R. (2000). Properties and applications of supercapacitors – from the state-of-the-art to future trends. In PCIM200 Conf. Records, 1-10, Nürnberg, Germany.

[10] Halper, M. S. ve Ellenbogen, J. C. (2006). Supercapacitors: A Brief Overview, MITRE Nanosystems Group, MP 05W0000272, Virginia, USA.

[11] Gallay, R. (2005). Properties and State of Art of High Power Ultracapacitors, 16 Seminario Interattivo. Bressanone Marzo, Italy.

[12] Sato, N. (1998). Electrochemistry at Metal and Semiconductor Electrodes, 1st Edition. Elsevier Science B.V., Amsterdam, Netherlands.

[13] Burke, A. (2007). R&D considerations for the performance and application of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta, 53-3,* 1083-1091, 2007.

[14] Burke, A. (2000). Ultracapacitors: why, how, and where is the technology. *Journal of power sources, 91-1,* 37-50.

[15] Maxwell Technologies. (2009). Product Information Sheet for BCAP and BMOD Models Datasheet (Doc. No. 1004166.5). ABD, California: Maxwell Technologies.

[16] Shi, L. ve Crow, M. L. (2008). Comparison of Ultracapacitor Electric Circuit Models. In Power and Energy Society General Meeting, Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century IEEE Conf. Records, pp. 1-6, Pittsburgh, USA.

[17] Nesscap Co., Ltd. (2008). NESSCAP Ultracapacitor Technical Guide. Korea: Nesscap Co., Ltd.

[18] Miller, J. R. ve Burke, A. F. (1994). Electric Vehicle Capacitor Test Procedures Manual (Report No. DOE/ID-10491). ABD: Idaho National Engineering Laboratory.

[19] Zubieta, L. ve Bonert, R. (2000). Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications, 36-1,* 199-205.

[20] Buller, S., Karden, E., Kok, D. ve De Doncker, R. W. (2002). Modeling the Dynamic Behavior of Supercapacitors Using Impedance Spectroscopy. *IEEE Transactions on Industry Applications, 38-6,* 1622-1626.

[21] Barrade, P. & Rufer, A. (2003). Current Capability and Power Density of Supercapacitors: Considerations on Energy Efficiency, European Conference on Power Electronics and Applications, Toulouse, France.

[22] Maxwell Technologies. Design Considerations for Ultracapacitors White Paper, from https://www.mouser.com/pdfDocs/Maxwell_whitepaper_designinguide.pdf

[23] Rafik, F., Gualous, H., Gallay, R., Karmous, M. ve Berthon, A. (2004). Contribution to the sizing of supercapacitors and their applications. First European Symposium on Supercapacitors and Applications, Belfort, France.

[24] Maxwell Technologies. BOOSTCAP® Ultracapacitor Cell Sizing Application Note (Doc. No. 10073627, Rev3). ABD, California: Maxwell Technologies.

[25] Barrade, P. (2003). Energy storage and applications with supercapacitors. Associazione Nazionale Azionamenti Elettrici, 14o Seminario Interattivo, Azionamenti elettrici: Evoluzione Tecnologica e Problematiche Emergenti, Bressanone, Italy.

[26] Linzen, D., Buller, S., Karden, E. ve De Doncker, R. W. (2005). Analysis and Evaluation of Charge Balancing Circuits on Performance, Reliability and Lifetime of Supercapacitor Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications, 41-5*, 1135-1141.

[27] Maxwell Technologies. Cell Balancing in Low Duty Cycle Applications, Application Note. ABD, California: Maxwell Technologies.

[28] Kim, Y. (2003). Ultracapacitor Technology Powers Electronic Circuits. Power Electronics Technology, pp. 34-39, October.

[29] Maxwell Technologies. (2005). Gateway to a New Thinking in Energy Management-Ultracapacitors, San Diego.

[30] Jeong, J., Lee, H. ve Kim, C. (2002). A Development of an Energy Storage System for Hybrid Electric Vehicles Using Supercapacitor. In 19th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS 19) *BEXCO Conf. Records,* 1379-1389, Busan, Korea.

[31] Drolia, A., Jose, P. ve Mohan, N. (2003). An Approach to Connect Ultracapacitor to Fuel Cell Powered Electric Vehicle and Emulating Fuel Cell Electrical Characteristics using Switched Mode Converter. In Industrial Electronics Society, 2003. *IECON '03, Conf. Records, 1,* 897-901.

[32] Vinatech Co. Ltd. (2010). Supercapacitor Applications. Korea.

[33] Chlodnicki, Z., Koczara, W. ve Al-Khayat, N. (2007). Hybrid UPS based on Supercapacitor Energy Storage an Adjustable Speed Generator. In Compatibility in Power Electronics Conf. Records. CPE '07 IEEE Conf. Records, pp. 1-10, Gdansk, Poland.

[34] Shinohara, K., Yamamoto, K., İimori, K., Yanagita, Y. ve Gosho, Y. (2005). Performance and Maximum Load Capacity of Uninterruptible Power System Using Double-Layer Capacitor. Electrical Engineering in Japan, *Wiley Periodicals, 154-3,* 73-81.

[35] Belchior, F. N., Oliveira, J. C., Leao, P. C. A. ve Souto, O. C. N. (2003). Ride-Through Alternatives for Adjustable-Speed Drives - Computational Analysis. In ISIE '03. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics Conf. Records, 2,* 1032-2036.

[36] von Jouanne, A., Enjeti, P. N. ve Banerjee, B. (1999). Assessment of Ride-Through Alternatives for Adjustable-Speed Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications, 35-4,* 908-916.

[37] Palma, L., Enjeti, P. ve Aeloiza, E. (2002). An approach to provide ride-through for ASD systems with supercapacitors. In Power Electronics Congress. CIEP 2002, VIII IEEE International Conf. Records, pp. 182-187.

[38] MIL-STD-1275E (2013). Department of Defense Interface Standard: Characteristics of 28 Volt Dc Input Power to Utilization Equipment in Military Vehicles.

[39] MIL-STD-461G (2015). Department of Defense Interface Standard: Requirements for The Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment.

[40] Chang, M. F., Pifer, G. C., Yilmaz, H., Dyer, R. F., Baliga, B. J., Chow, T. P. ve Adler, M. S. (1984). Comparison of n and p channel IGTs. In 1984 International Electron Devices Meeting (pp. 278-281), IEEE.

[41] Texas Instruments (2017). Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits Application Report. ABD, Texas: Texas Instruments.

[42] Lan, C. W., Lin, S. S., Syue, S. Y., Hsu, H. Y., Huang, T. C. ve Tan, K. H. (2017). Development of an intelligent lithium-ion battery-charging management system for electric vehicle. In 2017 International Conference on Applied System Innovation (ICASI) (pp. 1744-1746), IEEE.

[43] Dhameja, S. (2001). Electric vehicle battery systems. Elsevier. Amsterdam, Netherlands.

[44] Infineon (2013). Automotive MOSFETs Reverse Battery Protection Application Note Datasheet. Germany, Neubiberg: Infineon Technologies.

[45] Linear Technology (2011). High Voltage Surge Stopper LTC4366 Datasheet. ABD, California: Linear Technology.

[46] Linear Technology (2017). Fast 60V High Side NMOS Static Switch Driver LTC7004 Datasheet. ABD, California: Linear Technology.

[47] Vishay Semiconductors (2017). Small Signal Fast Switching Diodes, 1N4148 – 1N914 Datasheet. ABD, Pennsylvania: Vishay Intertechnology.

[48] Texas Instruments (2013). LMC6064 Precision CMOS Quad Micropower Operational Amplifier Datasheet. ABD, Texas: Texas Instruments.

[49] On Semiconductor (2017). 1N4728A – 1N4758A Zener Diodes, 1N4733A Datasheet. ABD, Arizona: ON Semiconductor.

[50] Allegro Microsystems (2019). ACS770xCB, Thermally Enhanced, Fully Integrated, Hall-Effect Based High-Precision Linear Current Sensor IC with 100 μΩ Current Conductor Datasheet. ABD, Manchester: Allegro MicroSystems.

[51] International Rectifier (2007). IRF4905 HEXFET Power MOSFET Datasheet. ABD, California: International Rectifier (Infineon Technologies Americas Corp.).

[52] Texas Instruments (2018). TL431 / TL432 Precision Programmable Reference Datasheet. ABD, Texas: Texas Instruments.

[53] Toshiba (2007). Toshiba Photocoupler GaAs Ired & Photo-Transistor TLP281, TLP281-4 Datasheet, from https://www.mouser.com/datasheet/2/408/4195-37827.pdf

[54] Marx, S. E. (2015). *Controller area network (CAN) bus J1939 data acquisition methods and parameter accuracy assessment using Nebraska tractor test laboratory data* (Master's dissertation). Retrieved from https://digitalcommons.unl.edu/

EKLER

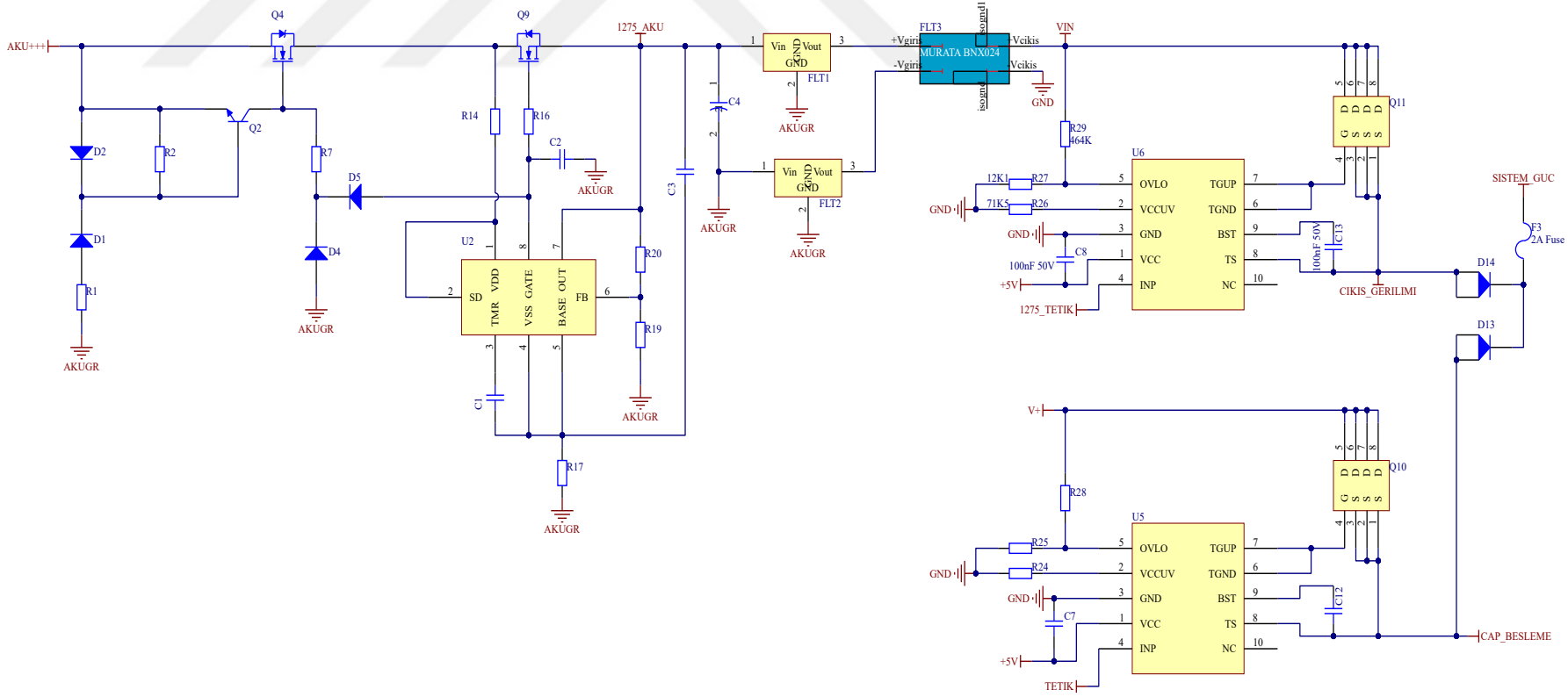
EK A - DEVRE ŞEMATİKLERİ

EK B - BASKI DEVRE KARTI TASARIMI

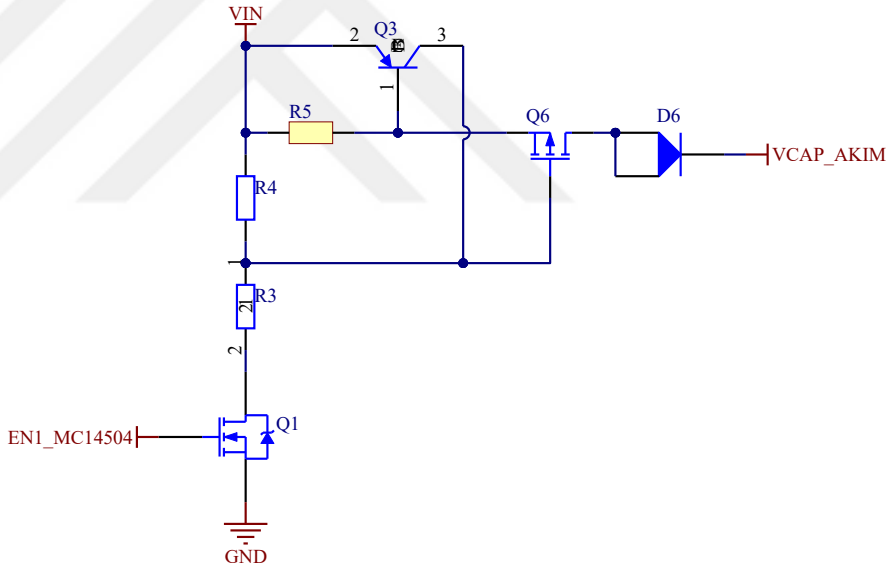
EK C - LTC4366 VERİ FÖYÜ

EK D – LTC7004 VERİ FÖYÜ

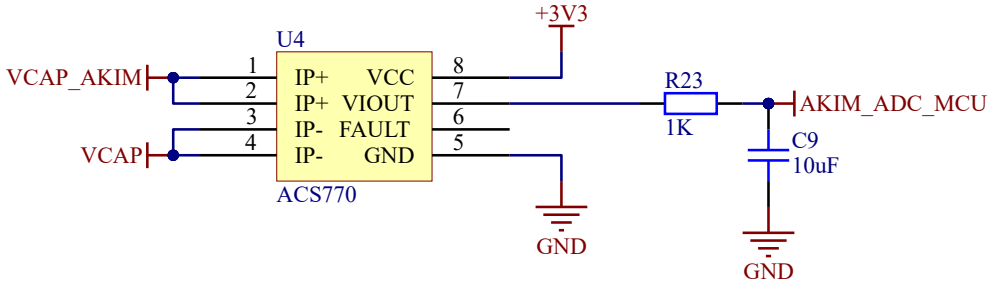
EK A - DEVRE ŞEMATİKLERİ



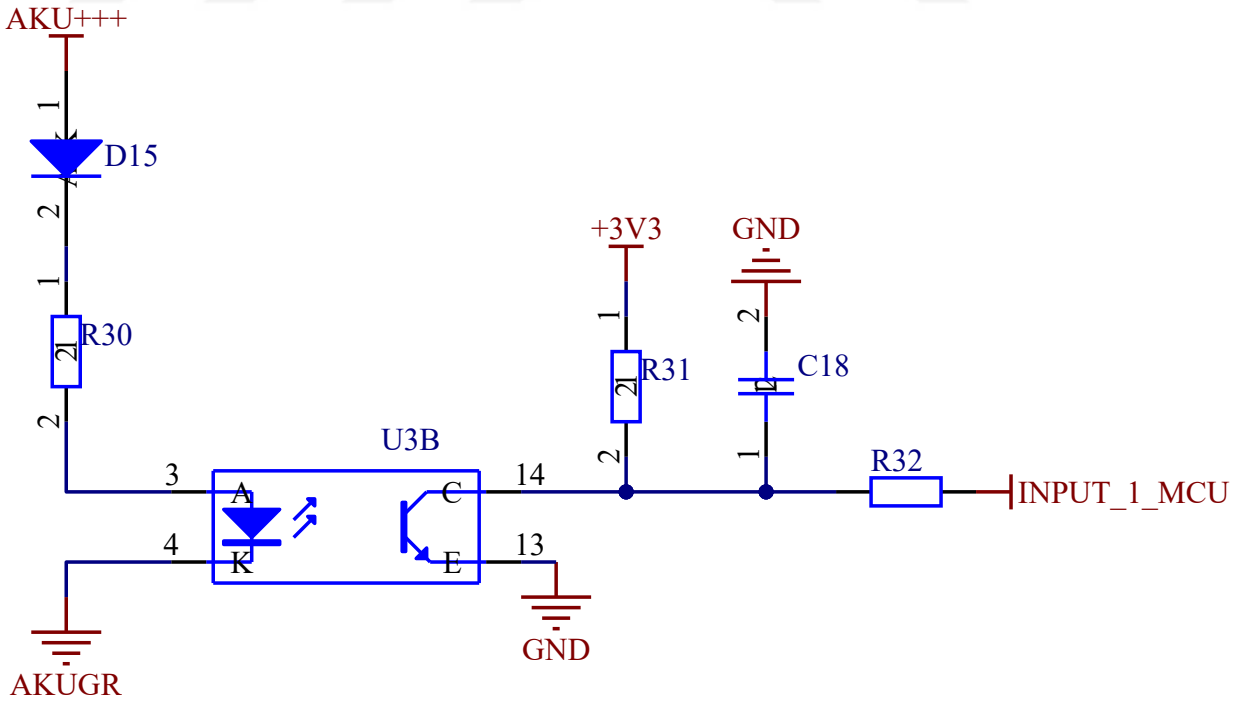
Şekil A.1



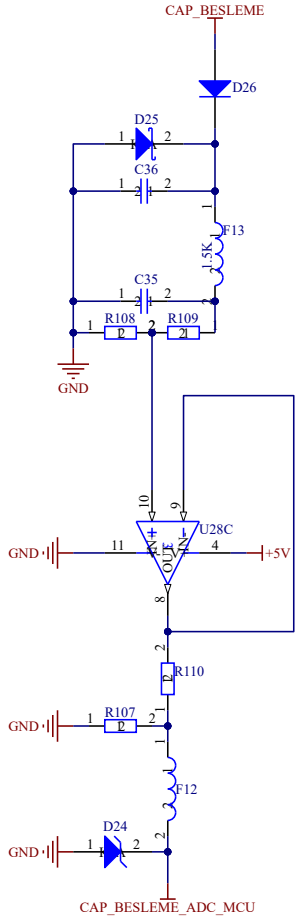
Şekil A.2



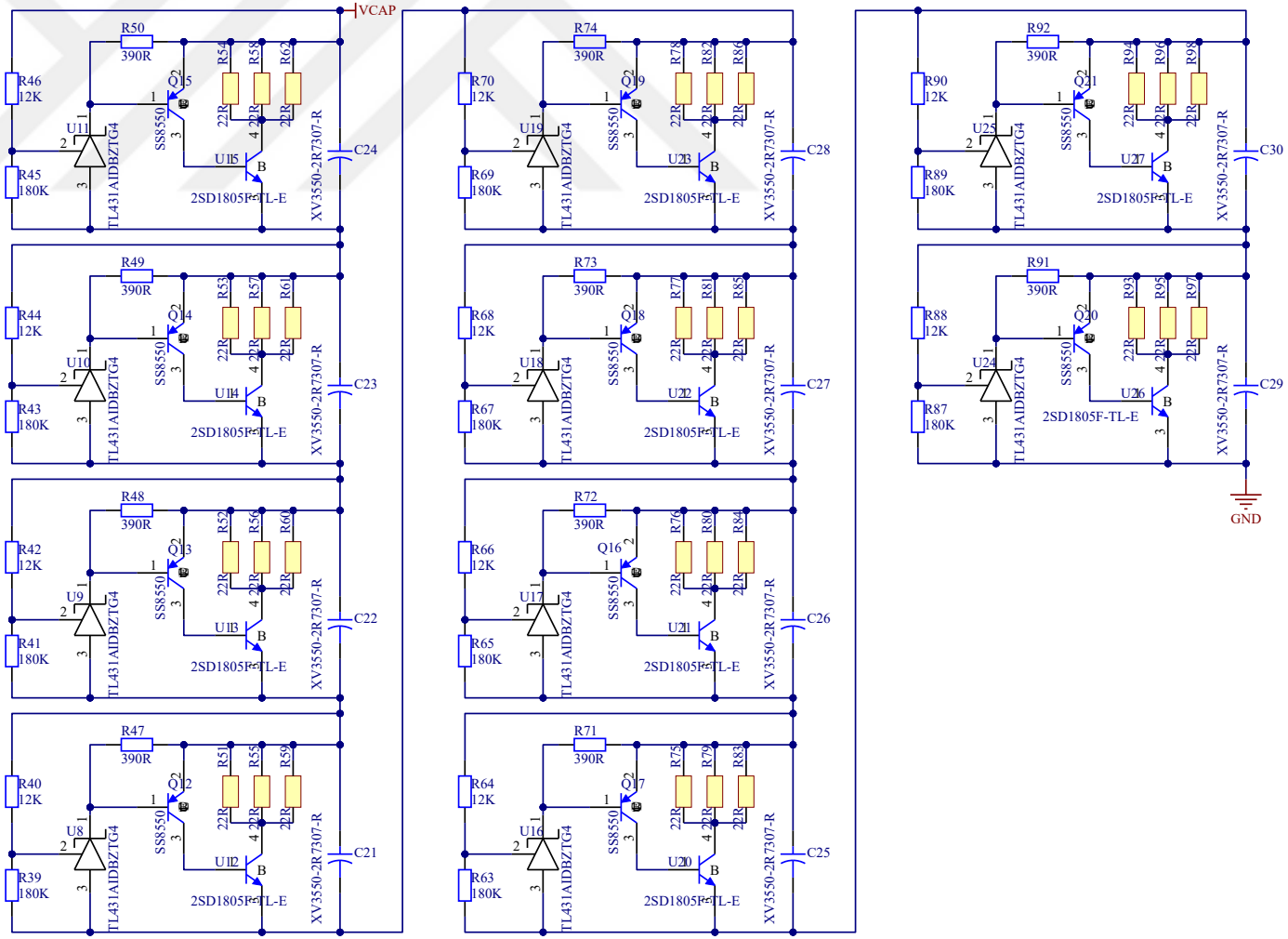
Şekil A.3



Şekil A.4

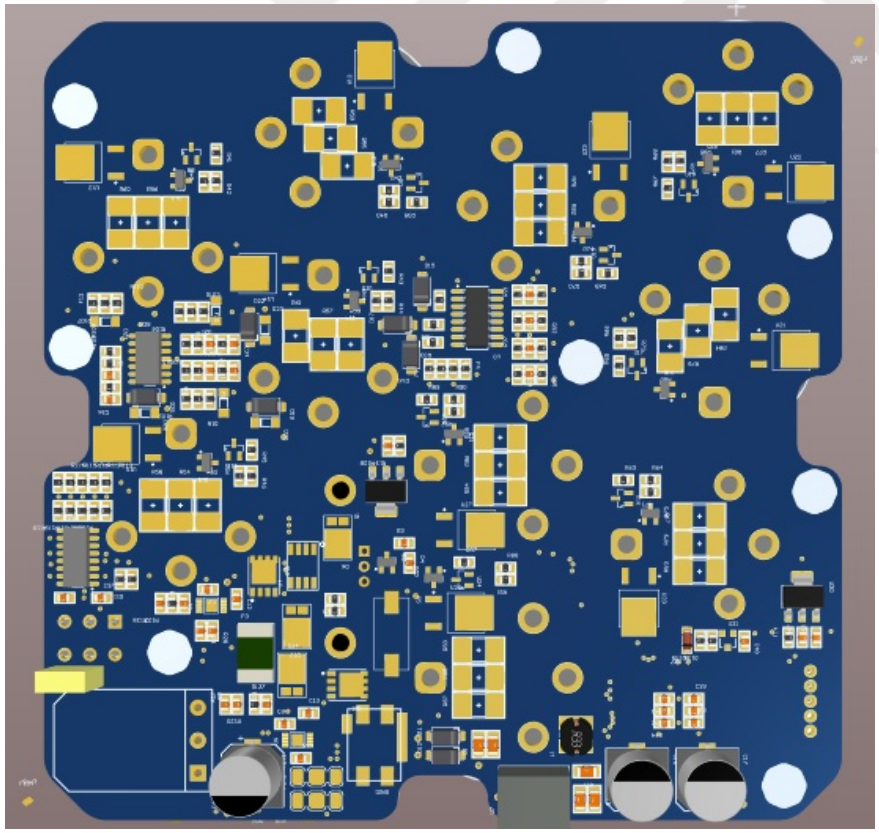


Şekil A.5

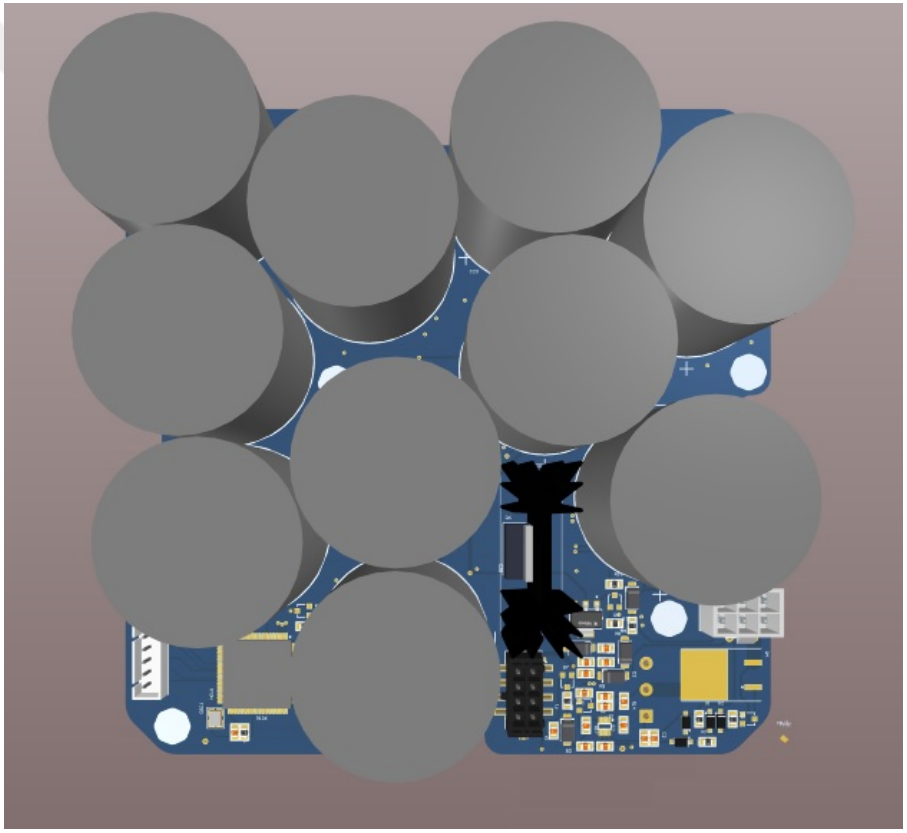

VCAP
R50
390R
R46
12K
R45
180K
U11
TL431AIDBZTG4
Q15
SS8550
R54
R58
R62
22R
2R
U15
2SD1805F-TL-E
XV3550-2R7307-R
C24
R49
390R
R44
12K
R43
180K
U10
TL431AIDBZTG4
Q14
SS8550
R53
R57
R61
22R
2R
U14
2SD1805F-TL-E
XV3550-2R7307-R
C23
R48
390R
R42
12K
R41
180K
U9
TL431AIDBZTG4
Q13
SS8550
R52
R56
R60
22R
2R
U13
2SD1805F-TL-E
XV3550-2R7307-R
C22
R47
390R
R40
12K
R39
180K
U8
TL431AIDBZTG4
Q12
SS8550
R51
R55
R59
22R
2R
U12
2SD1805F-TL-E
XV3550-2R7307-R
C21
R74
390R
R70
12K
R69
180K
U19
TL431AIDBZTG4
Q19
SS8550
R78
R82
R86
22R
2R
U23
2SD1805F-TL-E
XV3550-2R7307-R
C28
R73
390R
R68
12K
R67
180K
U18
TL431AIDBZTG4
Q18
SS8550
R77
R81
R85
22R
2R
U22
2SD1805F-TL-E
XV3550-2R7307-R
C27
R72
390R
R66
12K
R65
180K
U17
TL431AIDBZTG4
Q16
SS8550
R76
R80
R84
22R
2R
U21
2SD1805F-TL-E
XV3550-2R7307-R
C26
R71
390R
R64
12K
R63
180K
U16
TL431AIDBZTG4
Q17
SS8550
R75
R79
R83
22R
2R
U20
2SD1805F-TL-E
XV3550-2R7307-R
C25
R92
390R
R90
12K
R89
180K
U25
TL431AIDBZTG4
Q21
SS8550
R94
R96
R98
22R
2R
U27
2SD1805F-TL-E
XV3550-2R7307-R
C30
R91
390R
R88
12K
R87
180K
U24
TL431AIDBZTG4
Q20
SS8550
R93
R95
R97
22R
2R
U26
2SD1805F-TL-E
XV3550-2R7307-R
C29
GND

Şekil A.6

EK B - BASKI DEVRE KARTI TASARIMI



Şekil B.1



Şekil B.2

EK C – LTC4366 VERİ FÖYÜ

LTC4366

High Voltage Surge Stopper

FEATURES

- **Rugged Floating Topology**
- **Wide Operating Voltage Range: 9V to >500V**
- Adjustable Output Clamp Voltage
- Controls N-Channel MOSFET
- Adjustable Protection Timer
- Internal 9-Second Cool-Down Timer
- Shutdown I_Q < 14µA
- 8-Lead TSOT and 3mm × 2mm DFN Packages

APPLICATIONS

- Industrial, Automotive and Avionic Surge Protection
- High Voltage DC Distribution
- 28V Vehicle Systems

DESCRIPTION

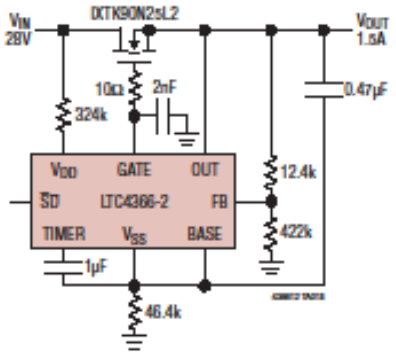
The LTC®4366 surge stopper protects loads from high voltage transients. By controlling the gate of an external N-channel MOSFET, the LTC4366 regulates the output during an overvoltage transient. The load may remain operational while the overvoltage is dropped across the MOSFET. Placing a resistor in the return line isolates the LTC4366 and allows it to float up with the supply; therefore, the upper limit on the output voltage depends only on the availability of high valued resistors and MOSFET ratings.

An adjustable overvoltage timer prevents MOSFET damage during the surge while an additional 9-second timer provides for MOSFET cool down. A shutdown pin reduces the quiescent current to less than 14µA during shutdown. After a fault the LTC4366-1 latches off while the LTC4366-2 will auto-retry.

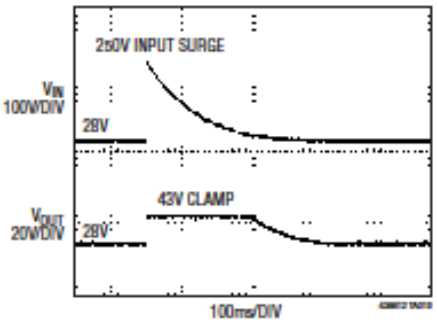
LT, LTC, LTM, Linear Technology and the Linear logo are registered trademarks and ThinSOT is a trademark of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners. Patents pending.

TYPICAL APPLICATION

Overvoltage Protected 1.5A, 28V Supply



Overvoltage Protector Regulates Output at 43V During Transient



EK D – LTC7004 VERİ FÖYÜ

LTC7004

Fast 60V High Side NMOS Static Switch Driver

FEATURES

- **Wide Operating V_{IN}: Up to 60V**
- **1Ω Pull-Down, 2.2Ω Pull-Up for Fast Turn-On and Turn-Off Times with 35ns Propagation Delays**
- **Internal Charge Pump for 100% Duty Cycle**
- Adjustable Turn-On Slew Rate
- Gate Driver Supply from 3.5V to 15V
- Adjustable V_{IN} Overvoltage Lockout
- Adjustable Driver Supply V_{CC} Undervoltage Lockout
- CMOS Compatible Input
- Thermally Enhanced, High Voltage Capable 10-Lead MSOP Package

APPLICATIONS

- Static Switch Driver
- Load and Supply Switch Driver
- Electronic Valve Driver
- High Frequency High Side Gate Driver

DESCRIPTION

The LTC®7004 is a fast high side N-channel MOSFET gate driver that operates from input voltages up to 60V. It contains an internal charge pump that fully enhances an external N-channel MOSFET switch, allowing it to remain on indefinitely.

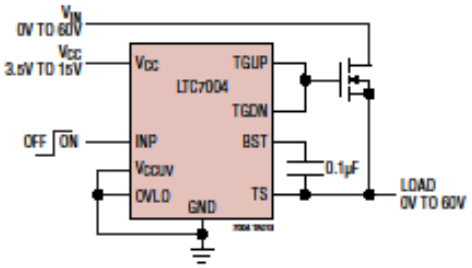
Its powerful driver can easily drive large gate capacitances with very short transition times, making it well suited for both high frequency switching applications or static switch applications that require a fast turn-on and/or turn-off time.

The LTC7004 is available in the thermally-enhanced 10-lead MSOP package.

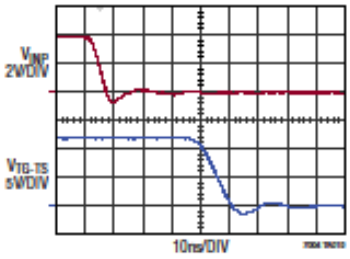
All registered trademarks and trademarks are the property of their respective owners.

TYPICAL APPLICATION

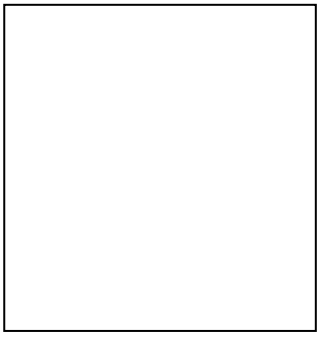
High Voltage, High Side Switch with 100% Duty Cycle



LTC7004 Driving a 1nF Capacitive Load



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : **Ahmet YILDIZ**

Doğum Tarihi ve Yeri : [redacted]

E-posta : [redacted]

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2012-2017 yılları arasında Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsü'nde lisans eğitimini tamamladı.
- 2018-2020 yılları arasında NERO ENDÜSTRİ SAVUNMA SANAYİ A.Ş.'nde Yazılım Mühendisi olarak çalıştı.