

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA FAYDALI FRENLEME ENERJİSİNİN DAHA İYİ  
KAZANIMI İÇİN BİR GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI VE UYGULAMASI**

**SERKAN DÜŞMEZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. MEHMET UZUNOĞLU**

**İSTANBUL, 2011**

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA FAYDALI FRENLEME ENERJİSİNİN DAHA İYİ  
KAZANIMI İÇİN BİR GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI VE UYGULAMASI**

**SERKAN DÜŞMEZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. MEHMET UZUNOĞLU**

**İSTANBUL, 2011**

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA FAYDALI FRENLEME ENERJİSİNİN DAHA İYİ  
KAZANIMI İÇİN BİR GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI VE UYGULAMASI**

Serkan DÜŞMEZ tarafından hazırlanan tez çalışması 23.06.2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN

Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Doç. Dr. Abdullah BAL

Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 29-04-02-01 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

## ÖNSÖZ

---

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında ve yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle bu tezin ortaya çıkmasını sağlayan sayın danışman hocam Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU'na, tüm akademik hayatım boyunca her konuda hiçbir desteği esirgemeyen ve bu tezin ortaya çıkmasında büyük pay sahibi olan sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Bülent VURAL'a ve beni bugünlere getiren, her zaman yanımda olan canım aileme teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2011

Serkan DÜŞMEZ

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                          | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| SİMGE LİSTESİ.....                                                                                       | Vii   |
| KISALTMA LİSTESİ.....                                                                                    | viii  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                                       | ix    |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                                                                                    | xi    |
| ÖZET .....                                                                                               | xii   |
| ABSTRACT.....                                                                                            | xiv   |
| BÖLÜM 1                                                                                                  |       |
| GİRİŞ.....                                                                                               | 1     |
| 1.1    Literatür Özeti .....                                                                             | 1     |
| 1.2    Tezin Amacı .....                                                                                 | 2     |
| 1.3    Orijinal Katkı.....                                                                               | 3     |
| BÖLÜM 2                                                                                                  |       |
| ELEKTRİKLİ TAŞIT TEKNOLOJİSİNİN GELİŞİMİ.....                                                            | 4     |
| BÖLÜM 3                                                                                                  |       |
| ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA FAYDALI FRENLEME VE GÜÇ BİÇİMLENDİRME ÜNİTELERİ .....                              | 9     |
| 3.1    Elektrikli Taşıtlarda Faydalı Frenin Önemi .....                                                  | 9     |
| 3.2    Elektrikli Taşıtlarda Kullanılan Enerji Depolama Sistemleri .....                                 | 10    |
| 3.2.1    Batarya Sistemleri .....                                                                        | 10    |
| 3.2.2    Ultra-kapasitör Sistemleri .....                                                                | 12    |
| 3.2.3    Enerji Depolama Sistemi Olarak Ultra-kapasitörler ile Bataryaların Karşılaştırılması .....      | 14    |
| 3.3    Elektrikli Taşıtlarda Güç Biçimlendirme Üniteleri ve Gereksinimi .....                            | 15    |
| 3.3.1    Literatürde Kullanılan İzolesiz, Çift Yönlü ve Tek Girişli DC-DC Dönüştürücü Topolojileri ..... | 16    |
| 3.3.2    Önerilen Kaskad Çift Yönlü DC-DC Dönüştürücü .....                                              | 21    |

## BÖLÜM 4

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| BENZETİM ÇALIŞMALARI.....                      | 25 |
| 4.1    Ultra-kapasitör Modeli.....             | 25 |
| 4.2    Kalıcı Mıknatıslı DC Motor Modeli ..... | 28 |
| 4.3    Kaskad Dönüştürücü Modeli.....          | 32 |
| 4.4    Simulasyon Çalışması ve Sonuçları ..... | 36 |

## BÖLÜM 5

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN DENEYSEL KARŞILAŞTIRILMASI .....                     | 41 |
| 5.1    Test Platformu ve Kontrol Algoritması .....                    | 42 |
| 5.2    Deneysel Sonuçlar.....                                         | 44 |
| 5.2.1    Yumuşak ve Sert Frenleme Testi.....                          | 45 |
| 5.2.2    Kademeli Frenleme Testi .....                                | 47 |
| 5.2.3    Normalize Edilmiş ECE-15 Sürüş Çevrimi ile Yapılan Test..... | 48 |

## BÖLÜM 6

|                         |    |
|-------------------------|----|
| SONUÇ VE ÖNERİLER ..... | 50 |
| KAYNAKLAR .....         | 52 |

### EK-A

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| KONTROL KARTININ AÇIK DEVRE ŞEMASI ..... | 57 |
|------------------------------------------|----|

### EK-B

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| SÜRÜCÜ KARTININ AÇIK DEVRE ŞEMASI ..... | 58 |
|-----------------------------------------|----|

### EK-C

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| ALGILAYICI KARTININ AÇIK DEVRE ŞEMASI..... | 59 |
|--------------------------------------------|----|

### EK-D

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| KONTROL ALGORİTMASI İÇİN OLUŞTURULAN C KODU ..... | 60 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                    | 63 |

## SİMGE LİSTESİ

---

|          |                                     |
|----------|-------------------------------------|
| $A_f$    | Taşıt ön alanı [ $m^2$ ]            |
| $C$      | Kapasite [F]                        |
| $C_D$    | Hava sürtünme katsayısı             |
| $d$      | PWM doluluk oranı                   |
| $f_r$    | Sürtünme katsayısı                  |
| $g$      | Yerçekimi kuvveti [ $m/s^2$ ]       |
| $I$      | Akım [A]                            |
| $J$      | Joule                               |
| $L$      | Endüktans [H]                       |
| $m$      | Taşıt kütlesi [kg]                  |
| $R$      | Direnç [ $\Omega$ ]                 |
| $V$      | Gerilim [V]                         |
| $v$      | Çizgisel hız [m/s]                  |
| $\delta$ | Dairesel atalet faktörü             |
| $\rho_a$ | Hava kütleli yoğunluğu [ $kg/m^3$ ] |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|        |                                                                                     |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| AC     | Alternatif akım (Alternative Current)                                               |
| DC     | Doğru akım (Direct Current)                                                         |
| ECE-15 | Avrupa standart şehir içi sürüş çevrimi                                             |
| EDS    | Enerji depolama sistemi                                                             |
| ESR    | Eşdeğer seri direnç                                                                 |
| İYM    | İçten yanmalı motor                                                                 |
| PWM    | Darbe genişlik modülasyonu (Pulse Width Modulation)                                 |
| SEPIC  | Tek uçlu birincil endüktans dönüştürücüsü (Single Ended Primary Inductor Converter) |
| SOC    | Ultra-kapasitörün şarj seviyesi (State of Charge)                                   |
| TCF    | Sıcaklık düzeltme etkisi (Temperature Correction Factor)                            |
| UK     | Ultra-kapasitör                                                                     |
| YH     | Yakıt hücresi                                                                       |

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

|             |                                                                                                                                |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2. 1  | Seri hibrit yapı .....                                                                                                         | 6  |
| Şekil 2. 2  | Paralel hibrit yapı .....                                                                                                      | 7  |
| Şekil 3. 1  | Cuk çift yönlü dönüştürücü topolojisi .....                                                                                    | 17 |
| Şekil 3. 2  | SEPIC/Luo dönüştürücü topolojisi.....                                                                                          | 18 |
| Şekil 3. 3  | Yarım-köprü çift yönlü dönüştürücü topolojisi.....                                                                             | 19 |
| Şekil 3. 4  | Yarım köprü çift yönlü dönüştürücünün çalışma durumları.....                                                                   | 19 |
| Şekil 3. 5  | Kaskad çift yönlü dönüştürücü topolojisi.....                                                                                  | 21 |
| Şekil 3. 6  | Kaskad topolojinin ileri yönde çalışma durumları.....                                                                          | 23 |
| Şekil 3. 7  | Kaskad topolojinin geri yönde çalışma durumları .....                                                                          | 23 |
| Şekil 4. 1  | UK modelinin elektriksel eşdeğer devresi.....                                                                                  | 25 |
| Şekil 4. 2  | MATLAB&Simulink ortamında oluşturulan UK dinamik modeli .....                                                                  | 28 |
| Şekil 4. 3  | Kalıcı mıknatıslı dc motor elektriksel eşdeğer devresi.....                                                                    | 29 |
| Şekil 4. 4  | Elektriksel gücün ve buna karşılık gelen açısal hızın bilinmesi durumunda yük momentinin bulunması için oluşturulan model..... | 31 |
| Şekil 4. 5  | Yük momentinin bilinmesi durumunda motor akımının bulunması için oluşturulan model.....                                        | 31 |
| Şekil 4. 6  | Kalıcı mıknatıslı dc motor modeli.....                                                                                         | 32 |
| Şekil 4. 7  | Düşürücü tip dönüştürücü yapısı ve anahtar çifti.....                                                                          | 33 |
| Şekil 4. 8  | Üç uçlu anahtar gösterimi.....                                                                                                 | 33 |
| Şekil 4. 9  | Zamana göre ortalaması alınmış PWM anahtar modeli .....                                                                        | 34 |
| Şekil 4. 10 | Yükseltici tip dönüştürücü yapısı ve anahtar çifti.....                                                                        | 34 |
| Şekil 4. 11 | Yükseltici tip dönüştürücü için PWM anahtar modeli .....                                                                       | 34 |
| Şekil 4. 12 | Kaskad topoloji PWM anahtar modeli.....                                                                                        | 35 |
| Şekil 4. 13 | Mod seçimi için oluşturulan MATLAB&Stateflow şeması .....                                                                      | 35 |
| Şekil 4. 14 | MATLAB&Simulink ortamında oluşturulan genel sistem modeli .....                                                                | 36 |
| Şekil 4. 15 | ECE-15 sürüş çevriminin zamana bağlı hız profili .....                                                                         | 36 |
| Şekil 4. 16 | ECE-15 sürüş çevriminin zamana bağlı açısal hız profili ( $r = 0,45m$ ).....                                                   | 37 |
| Şekil 4. 17 | ECE-15 sürüş çevriminin zamana bağlı normalize edilmiş güç profili.....                                                        | 37 |
| Şekil 4. 18 | Dc motor akım değişimi ve referans akım eğrisi .....                                                                           | 38 |
| Şekil 4. 19 | Dc motor gerilim değişimi ve referans gerilim eğrisi.....                                                                      | 38 |
| Şekil 4. 20 | Dc motor güç değişimi ve referans güç eğrisi.....                                                                              | 39 |
| Şekil 5. 1  | Deneyisel çalışmalar için gerçekleştirilen deney seti.....                                                                     | 41 |
| Şekil 5. 2  | Hazırlanan test platformunun blok şeması.....                                                                                  | 42 |
| Şekil 5. 3  | Deneyisel çalışmalar için hazırlanan test platformu .....                                                                      | 42 |
| Şekil 5. 4  | Gerilim kontrolü için oluşturulan algoritma .....                                                                              | 43 |

|             |                                                                       |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5. 5  | Yumuşak ve sert frenleme durumunda dc motor hız değişimi.....         | 45 |
| Şekil 5. 6  | Yumuşak ve sert frenleme durumunda dc motor uç gerilim değişimi ..... | 46 |
| Şekil 5. 7  | Yumuşak ve sert frenleme durumunda UK gerilim değişimi .....          | 46 |
| Şekil 5. 8  | Kademeli frenleme durumunda dc motor hız değişimi .....               | 47 |
| Şekil 5. 9  | Kademeli frenleme durumunda UK gerilim değişimi.....                  | 48 |
| Şekil 5. 10 | ECE-15 sürüş çevriminin zamana bağlı hız profili .....                | 48 |
| Şekil 5. 11 | ECE-15 sürüş çevrimi esnasında motor hızı değişimi.....               | 49 |
| Şekil 5. 12 | ECE-15 sürüş çevrimi esnasında UK gerilim değişimi .....              | 49 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

|              |                                                                                        |    |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 3. 1 | Yarım-köprü dönüştürücünün çalışma moduna göre anahtarların durumu .....               | 19 |
| Çizelge 3. 2 | Kaskad dönüştürücünün çalışma moduna göre anahtarların durumu ....                     | 22 |
| Çizelge 4. 1 | UK dinamik modelinde kullanılan parametreler .....                                     | 26 |
| Çizelge 4. 2 | Kalıcı mıknatıslı dc motor modelinde kullanılan parametreler.....                      | 29 |
| Çizelge 4. 3 | PWM anahtarın terminal akım ve gerilim ifadeleri .....                                 | 33 |
| Çizelge 4. 4 | PWM anahtarın terminal akım ve gerilim ifadeleri .....                                 | 34 |
| Çizelge 5. 1 | EDS ve referans gerilim değerlerine bağlı olarak dönüştürücülerin çalışma modları..... | 44 |

# **ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA FAYDALI FRENLEME ENERJİSİNİN DAHA İYİ KAZANIMI İÇİN BİR GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI VE UYGULAMASI**

Serkan DÜŞMEZ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU

Geleneksel içten yanmalı taşıtların neden olduğu olumsuz çevresel etkilere ilave olarak, fosil kökenli yakıtların da giderek azalması elektrikli taşıtlara olan ilgiyi arttırmıştır. Elektrikli taşıtlar ile ilgili yapılan çalışmalar çok boyutlu olmakla birlikte, verimlilik ve menzil arttırmaya yönelik çalışmalar daha öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, faydalı frenleme anlarında ortaya çıkan enerjinin geri kazanımı oldukça önemlidir. Faydalı frenleme enerjisinin daha iyi kazanılmasında, kullanılan kontrol yöntemi ve hibritleştirme topolojisinin yanı sıra, kullanılan güç dönüştürücü topolojileri de büyük rol oynamaktadır.

Elektrikli taşıtlarda kullanılan ana kaynak ve enerji depolama üniteleri genellikle güç takibi, gerilim regülasyonu, frenleme enerjisi kazanımı v.b. sağlaması amacıyla güç biçimlendirme üniteleri ile birlikte kullanılmaktadırlar. Güncel çalışmalara bakıldığında, enerji depolama ünitelerinin çıkışlarında yaygın olarak yarım köprü dönüştürücü topolojisinin kullanıldığı görülmektedir. Bu dönüştürücü yüksek güç taleplerinde enerji depolama ünitesinin gerilimini yükselterek dc baraya güç akışını sağlarken, frenleme anlarında ise bara gerilimini düşürerek enerjinin depolanmasını sağlamaktadır. Ancak motor uçlarındaki gerilim seviyesinin, enerji depolama ünitesinin gerilim seviyesinden düşük olduğu durumlarda yapısındaki kısıtlamalardan dolayı frenleme enerjisi kazanamamaktadır.

Bu tez çalışmasında faydalı frenleme enerjisinin daha iyi geri kazanımı için daha başarılı bir güç dönüştürme topolojisinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Geliştirilecek bu topolojiyle, bir elektrikli taşıtın düşük hızlarda da faydalı frenleme enerjisini geri kazanılabilmesi hedeflenmektedir. Önerilen topolojinin frenleme enerjisi kazanımındaki üstünlüğünü doğrulamak amacıyla her iki dönüştürücü içinde 1kW'lık prototipler tasarlanmış olup, bu dönüştürücülere normalize edilmiş ECE-15'i de içeren

üç farklı sürüş çevrimi uygulanarak, dönüştürücülerin frenleme enerjisi kazanım performansları irdelenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Çift yönlü dönüştürücü, elektrikli taşıt, faydalı frenleme, ultra-kapasitör

### **DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A POWER CONVERTER FOR EFFICIENT BRAKING ENERGY RECOVERY IN ELECTRIC VEHICLES**

Serkan DÜŞMEZ

Department of Electrical Engineering  
MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet UZUNOĞLU

Due to increasing concerns on environmental pollution and depleting fossil fuels, electrical vehicle (EV) technology has received considerable attention as an alternative to the conventional vehicular systems. Although various studies take place in literature towards electric vehicles, studies particularly targeting increase in driving range and efficiency gained great momentum lately. In this regard, recovery of the energy during regenerative braking becomes crucial. Energy systems of EVs can be composed of the hybridization of the main power source (such as fuel cells) with an energy storage system (ESS).

ESSs are generally employed with a power conditioning unit (PCU) in order to capture braking energy, provide voltage regulation, and power tracking. The topology of the PCU that is used with ESS, has a vital role especially in braking energy recovery. In recent studies, conventional bi-directional half-bridge topology is widely used as a PCU for ESSs. This PCU boosts ESS voltage in peak power demands and bucks power train voltage in braking. Due to its structure, it does not have the capability of capturing braking energy when the voltage across the motor terminals is lower than ESS voltage.

This study aims to design an improved power conditioning unit for recovering regenerative braking energy more efficiently and focuses on the comparison of the conventional bi-directional half-bridge topology and the proposed cascade bi-directional buck-boost topology for efficient braking energy recovery. In order to verify the superiority of the proposed topology, two 1kW prototypes have been designed and the tests are realized for three different drive cycles including normalized version of ECE-15.

**Key words:** Bidirectional converter, electric vehicle, fuel cell, ultra-capacitor

### GİRİŞ

#### 1.1 Literatür Özeti

Özeti Ulaşım sektöründeki enerji talebi taşıt sayısına bağlı olarak gün geçtikçe artmaktadır. Bu artışa paralel olarak, mevcut petrol rezervleri tükenmekte ve küresel ısınmaya neden olan sera gazı salınımı tehlikeli boyutlara ulaşmaktadır. Bu küresel sorunlara çözüm getirmek amacıyla dünya çapında birçok araştırmacı çalışmalarını, taşıtlarda kullanılabilecek alternatif enerji teknolojileri üzerine yönlendirmiştir. Araştırmalar özellikle yüksek verime sahip ve çevre dostu olan elektrikli taşıt teknolojileri üzerinde yoğunlaşmıştır [1-5]. Günümüzde birçok otomotiv üreticisi, elektrikli taşıt prototiplerini geliştirmiş olsa da, halen elektrikli taşıt kullanımının ve üretiminin yaygınlaşmasının önünde yüksek maliyet ve menzilin kısa olması gibi engeller bulunmaktadır. Yüksek maliyetin, elektrikli taşıt kullanımının artması ve bu teknolojide seri üretime geçilmesiyle orantılı olarak düşmesi beklenirken, menzilin iyileştirilmesi ise hem batarya ve yakıt hücresi (YH) teknolojisinin gelişimine hem de enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasına bağlıdır. Literatürde farklı özelliklere sahip enerji kaynaklarının hibritleştirilmesini ve menzil arttırmaya yönelik uygun bir yük paylaşımını hedefleyen birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardaki amaç, ana kaynağın yanı sıra güç yoğunluğu yüksek bir enerji depolama sistemini (EDS) de kullanarak sistem performansının ve veriminin arttırılmasıdır. Ayrıca böyle bir hibrit yapı, daha iyi bir yük paylaşımı ve enerji yönetimi sağlamanın yanında frenleme enerjisinin daha iyi kazanılmasına da katkı sağlamaktadır [6-7]. Ancak bir EDS belirtilen tüm bu katkıları tek başına sağlayamamaktadır. Özellikle EDS'nin sisteme doğrudan bağlanması, kullanılan EDS'ye bağlı olarak bazı olumsuzlukları da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle EDS'nin bahsedilen

avantajlarından en iyi şekilde yararlanabilmek için uygun bir güç dönüştürücü ile birlikte kullanılması gerekmektedir.

Elektrikli taşıtlarda EDS'ler ile birlikte kullanılacak olan güç dönüştürücüleri, mutlaka çift yönlü çalışabilmelidir. Çift yönlü dönüştürücüler topolojilerine bağlı olarak tek girişli, çift girişli, izoleli ve izolesiz olarak farklı türlere ayrılmaktadır. Bu farklı dönüştürücü türleri arasındaki seçim, sistemin ihtiyaçları dikkate alınarak yapılmaktadır. Elektrikli taşıtlarda EDS ile birlikte kullanılacak çift yönlü bir dönüştürücü için belirleyici etkenler; performans, maliyet ve hacimdir.

Literatürde yakın zamanda yapılmış çalışmalara bakıldığında, elektrikli taşıtlarda EDS'ler için kullanılan en yaygın topolojinin yarım köprü güç dönüştürücü olduğu görülmektedir [4], [8-14]. Bu dönüştürücü ileri (motor) yönde EDS gerilimini yükselterek dc baraya, faydalı frenleme anında ise dc bara gerilimini düşürerek EDS'ye enerji aktarılmasını sağlar. Ancak dönüştürücünün yapısından dolayı, dc bara geriliminin EDS geriliminden düşük olduğu durumlarda, bu dönüştürücü EDS'ye enerji aktaramaz. Bu tip bir dönüştürücü ile gerilimin açısız hızla orantılı olarak değiştiği elektrik motorunda düşük devirlerde enerji kazanarak frenleme yapmak çoğunlukla mümkün olmayacaktır. Bu nedenle, sık frenleme yapılan şehir içi trafiğinde frenleme enerjisinin büyük bir kısmı ısıya dönüşerek kaybolacaktır. Faydalı frenleme anında ortaya çıkan enerjinin mümkün olduğunca daha iyi geri kazanılması, yakıt tüketiminin azalması ve menzilin artması açısından oldukça önemlidir.

## **1.2 Tezin Amacı**

Bu tez çalışmasında, her iki çalışma yönünde de yükseltici ve düşürücü modlarda çalışabilen kaskad bağlı çift yönlü güç dönüştürücünün kullanımı ile faydalı frenleme enerjisinin daha iyi kazanılması hedeflenmiştir. Ayrıca, önerilen topoloji daha fazla enerji geri kazanımı sağlamakla birlikte taşıtın mekanik frenleme yapmadan daha düşük devirlerde yol almasını da sağlamaktadır. Elektriksel frenin (faydalı frenleme) yetersiz kaldığı ve mekanik frenlemenin devrede olduğu durumlarda bile önerilen topoloji elektrik motorunun ürettiği ters elektromotor kuvvetine (emk) bağlı olarak enerji kazanımını sürdürebilmektedir. Gerçekleştirilen tez çalışmasında önerilen kaskad dönüştürücü, literatürde yaygın olarak kullanılan yarım köprü dönüştürücü ile deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar için iki adet 1kW'lık dönüştürücü prototipi geliştirilmiştir.

### **1.3 Orijinal Katkı**

Gerçekleştirilen tez çalışmasında, elektrikli taşıtlarda frenleme enerjisini mevcut güç dönüştürücü topolojilerinden daha iyi kazanabilen bir güç dönüştürücü topolojisi önerilmiştir. Bu önerilen topolojinin gerekli analizleri detaylı ve deneysel irdelemeli olarak sunulmuştur. Bu bağlamda, yapılan çalışma ile son yıllarda üzerinde çokça çalışma yapılan elektrikli taşıt teknolojisine ve literatürde yer alan çalışmalara katkı sağlanması hedeflenmiştir.

### ELEKTRİKLİ TAŞIT TEKNOLOJİSİNİN GELİŞİMİ

İlk elektrikli taşıt modeli Prof. Stratingh tarafından 1835 yılında Hollanda'da yapılmıştır. 1834-1836 yılları arasında Thomas Davenport bu modelden yola çıkarak ABD'de ilk elektrikli yol aracı prototipini geliştirmiştir. Üç tekerlekli olarak yapılan bu taşıtta şarj edilemeyen bataryalar kullanılmıştır. 1840 yılında Robert Davidson elektrikli lokomotifi geliştirmiş ancak yine şarj edilemeyen bataryalar kullanıldığından dolayı yeterli ilgiyi görmemiştir. Ancak, 1859 yılından sonra kurşun-asit bataryaların geliştirilmesi ve 19.yüzyılın sonlarına doğru şarj edilebilir bataryaların ticari taşıtlarda kullanılmaya başlanması ile elektrikli taşıt teknolojisi yeniden ivme kazanmıştır.

1882 yılında İngiltere'de Prof. William Ayrton ve John Perry tarafından 3 adet, tekerlekli, her biri 10 adet kurşun-asit bataryaya sahip olan elektrikli taşıt yapılmıştır. Yapılan taşıtlar 16-20 km menzile sahip olup ve 14km/saat azami hıza ulaşmışlardır. 19. yüzyılın sonları ve 20. yüzyıl başları arasında elektrikli taşıtlar altın çağını yaşamıştır. Amerika, İngiltere ve Fransa'da birçok şirket elektrikli taşıt üretimine geçmiştir [15]. Bu dönemlerde elektrikli taşıtlardaki menzil ve performansı artırma düşünceleri ortaya çıkmış ve bunun sonucunda 1916 yılında Woods tarafından ilk hibrit elektrikli taşıt üretilmiştir.

Taşıtlarda elektrik motoru kullanımı, içten yanmalı motor (İYM) kullanımına göre daha fazla verim ve daha yüksek performans sunmasına rağmen elektrikli taşıtların düşük menzile sahip olmaları ve o dönemlerde petrolün ucuz olması gibi nedenlerden dolayı 1920 yılından itibaren elektrikli taşıtlara duyulan ilgi gitgide azalmıştır. Benzinin enerji yoğunluğunun, bataryaların enerji yoğunluğuna göre çok daha yüksek olması İYM'lerin tercih edilmesinde büyük rol oynamıştır. Ayrıca İYM'lerde yakıt yükleme işlemi birkaç dakika sürerken, elektrikli taşıtlarda bataryaların şarj edilmesi birkaç saat sürmektedir. Bu nedenlerden dolayı İYM'ler 1960'a kadar yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. 1970'lerde petrol krizinin yaşanması,

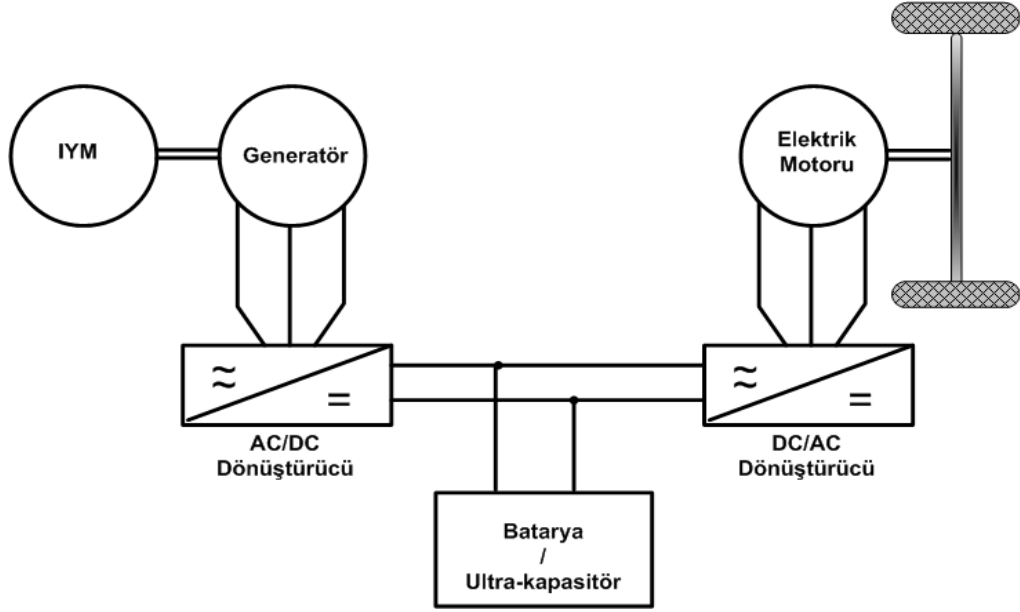
elektrikli taşıtların tekrar gündeme gelmesine neden olmuştur [16]. 1980'li yıllarda hükümetler elektrikli taşıtların çevresel avantajları nedeniyle bu taşıtlara karşı ilgi duymaya ve elektrikli taşıt programları için resmi kaynaklardan parasal destek vermeye başlamışlardır. Bu destekler ile birlikte, 1980-1990 yılları arasında birçok büyük taşıt üreticisi çok sayıda elektrikli taşıt üretmiştir. Günümüzde halen kullanılmakta olunan GM EV1, Ford Think City, Toyota RAV4, Nissan Hipermini ve Peugeot 106 Electric bunlara örnek gösterebilir. Ancak düşük menzil nedeniyle, 1990'larda büyük taşıt üreticileri tümü elektrikli taşıtların gelişmesi için batarya teknolojisinin de gelişmesi gerektiğini savunmuş ve çalışmalarını hibrit teknolojisi üzerine yoğunlaştırmışlardır. Özellikle Japon firmalarının Toyota Prius, Honda Insight ve Nissan Tino modelleri günümüzdeki hibrit teknolojinin gelişmesinde öncü olmuşlardır.

Enerji sistemlerine konu olan hibritleşme kavramı, birden fazla enerji kaynağının bir arada kullanılması anlamına gelmektedir. Konu elektrikli taşıtlara indirildiğinde hibritleşme, daha fazla yakıt ve maliyet tasarrufu sağlamak amacıyla taşıtın güç ihtiyacının farklı kaynaklardan eş zamanlı veya farklı senaryolar doğrultusunda karşılanması demektir. Hibrit taşıt sistemleri, taşıtın tahrik edilmesinde genellikle İYM'nin yanında bir elektrik motoru ve bataryadan meydana gelmektedir. Bu şekilde oluşturulan bir yapı, yakıt tüketimini ve buna bağlı olarak İYM'nin olumsuz çevresel etkilerini önemli bir oranda azaltmaktadır.

Hibrit taşıt sistemlerinde, hibritleştirme yapısı taşıt performansını etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Yukarıda bahsedilen üç farklı bileşenin (İYM, elektrik motoru ve batarya), farklı kombinasyonlarla ilişkilendirilmesi sonucunda üç farklı hibritleşme yapısı ortaya çıkmaktadır. Bu yapılar seri hibrit, paralel hibrit ve seri-paralel hibrit olarak adlandırılmaktadır.

Seri hibrit yapı temel olarak, batarya şarj ünitesini üzerinde barındıran ve tahrik motorunun enerjisini devamlı olarak batarya üzerinden karşılayacak şekilde oluşturulmuş bir yapıdır. Bu bağlantı şeklinde İYM optimum verimlilik seviyesinde çalıştırılarak generatörü tahrik eder ve doğrultucu üzerinden bataryayı şarj eder. Şekil 2.1'de seri hibrit taşıtın temel hibritleşme yapısı gösterilmektedir.

Seri hibrit yapıda kontrolün amacı, batarya şarjlılık durumunun (SOC) izlenmesidir. Batarya SOC'si belirlenen minimum değerin altına indiğinde, İYM çalıştırılarak bataryalar şarj edilir [2], [17-20]. Batarya şarjı istenilen noktaya ulaşıncaya, İYM tekrar kapatılır. Kısacası, İYM/generatör grubu kontrol edilerek batarya şarjı belirli bir aralık arasında tutulur.

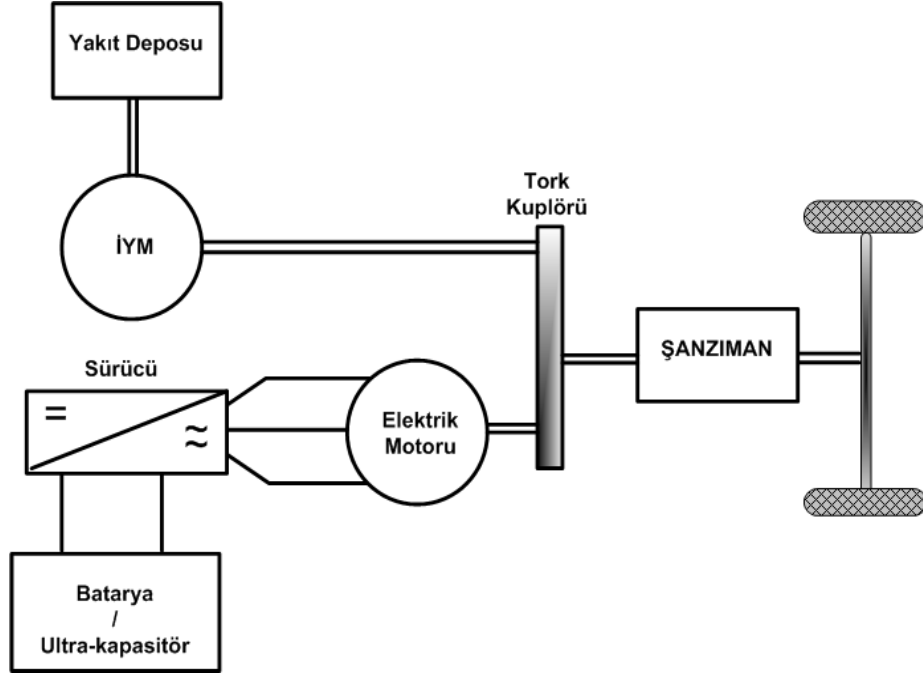


Şekil 2. 1 Seri hibrit yapı

Seri hibrit topolojisinin en büyük avantajı, İYM'nin hız ve torka bağlı olarak en verimli seviyede çalıştırılmasıdır. En verimli seviyede çalışma da, düşük yakıt tüketimi ve yüksek verim anlamına gelmektedir. Ayrıca, seri hibrit taşıtlarda dikkat edilecek diğer bir husus, şanzıman ile İYM arasında mekanik bir bağlantının olmamasıdır. Ancak, tekerlekler ile İYM arasındaki enerji iletiminde iki enerji dönüştürme aşaması (İYM/Generatör, Generatör/Motor) bulunduğundan, bu dönüştürme işlemleri sırasında enerjinin bir bölümü kaybolur. Şehir içi kullanımda avantajlı olan seri hibrit yapı, uzun sürüş mesafesinde bu dönüştürme kayıplarından dolayı avantajını kaybeder [21-22].

Paralel hibrit yapıda, hem İYM hem de tahrik motoru şaseye mekanik olarak bağlıdır. En temel paralel hibrit yapı Şekil 2.2'de verilmiştir. Bu modelde taşıt, sadece İYM ile, sadece elektrik motoru ile, ya da her ikisi aynı anda çalıştırılmak üzere üç farklı şekilde tahrik edilebilir. Böyle bir yapı, taşıtın farklı zamanlardaki farklı tork taleplerini karşılamak için değişik bağlantıların oluşturulmasına olanak sağlar [23-25].

Paralel hibrit taşıtlarda, İYM ve tahrik motorunun farklı şekillerde kullanımları mevcuttur. Bunların arasında en çok tercih edileni, düşük devirlerde daha verimli olan elektrik motorunu, yüksek devirlerde ise İYM'yi tek başına kullanmaktır. İYM tek başına kullanıldığında, tahrik motoru generatör olarak çalışarak bataryaları şarj eder.



Şekil 2. 2 Paralel hibrit yapı

Paralel hibrit taşıtlarının bir avantajı da tork kuplörüne sahip olmasıdır. Bu özellik sayesinde İYM farklı tork taleplerinde, sürekli olarak en uygun çalışma noktasında çalıştırılabilir [24-25]. Böylece daha verimli yakıt kullanımı sağlanarak, yakıt tüketimi azaltılmış olur. Paralel yapının, seri yapı karşısındaki diğer bir avantajı ise, yapısında bir adet enerji dönüştürme ünitesi bulunduğundan daha az enerji kaybının olmasıdır. Ayrıca yapılan çalışmalar, paralel hibrit yapının diğer tüm hibrit taşıt yapılarına kıyasla daha fazla yakıt tasarrufu sağladığını göstermektedir [25].

Seri-paralel yapı, paralel yapıya oldukça benzemektedir. İYM'nin şanzımana doğrudan bağlı olmayıp seri hibrit yapıda olduğu gibi generatöre bağlı olması sayesinde İYM optimum verimde çalıştırılabilmektedir. Böylelikle taşıt düşük hızlarda seri hibrit yapıya benzer şekilde çalışmaktadır. Yüksek hızlarda ise İYM devreye girer ve seri yapıdaki gereksiz enerji dönüşümleri ile kaybedilen enerji en düşük seviyeye indirilir. Burada amaç hem paralel hem de seri sistemin avantajlarını kullanarak İYM'nin en verimli noktada çalışmasını sağlamaktır [24].

İYM ile birlikte bir elektrik motorunun kullanılmasına dayanan hibrit taşıtlar, sadece İYM kullanan geleneksel taşıtlara göre hem yakıt tüketimini hem de İYM'nin olumsuz çevre etkilerini belirli bir oranda azaltmıştır. Ancak bu çözüm tam anlamıyla yeterli olmamaktadır.

Olumsuz çevresel etkilerin tamamıyla yok edilmesi ve petrole bağımlılığın kaldırılmak istenilmesinden dolayı, gelecekteki taşıtların tamamının elektrikli sistemden meydana geleceği öngörülmektedir. Bataryalı taşıtlar, yüksek maliyetleri ve düşük sürüş menziline sahip olmaları nedeniyle, tam anlamıyla seri üretime geçirilememiştir. Prototipleri yapılmış ve satışa sunulmuş olan bu taşıtların yaygınlaşması için birçok araştırmacı yoğun bir şekilde çalışmaktadır. Bu çalışmaların bir kısmı frenleme anında ortaya çıkan enerjinin geri kazanımı üzerine yoğunlaşmaktadır.

---

**ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA FAYDALI FRENLEME VE GÜÇ BİÇİMLENDİRME  
ÜNİTELERİ****3.1 Elektrikli Taşıtlarda Faydalı Frenin Önemi**

Elektrikli taşıtların yaygınlaşmasının önünde duran en büyük engel menzilin kısa olmasıdır. Bu problemin çözülmesi ise; batarya veya yakıt hücresi teknolojilerinin geliştirilmesine ya da mevcut enerjinin en verimli şekilde kullanılmasına bağlıdır. Bu bağlamda, frenleme anında ortaya çıkan enerjinin geri kazanılması oldukça önemlidir.

Bilindiği üzere, İYM'ye sahip geleneksel taşıtlarda frenleme mekanik olarak gerçekleşmektedir. Sürtünme ile gerçekleşen böyle bir frenlemede, İYM'nin sahip olduğu kinetik enerji, ısıya dönüşüp kaybolmaktadır [26]. Ancak elektrikli taşıtlarda, elektrik motorlarının faydalı frenleme olarak adlandırılan generatör çalışması ile frenleme anında oluşan bu enerji geri kazanılabilmektedir. Taşıtların şehir içi trafiğinde sık frenleme yaptığı kabul edildiğinde, frenleme anında ortaya çıkacak enerji azımsanamayacak kadar fazla olacaktır. Oluşan bu frenleme enerjisi, enerji tasarrufu açısından bir hayli önem arz etmektedir. Bahsi geçen enerjinin geri kazanımı ile %20'lere kadar enerji tasarrufu sağlanabilmektedir [27].

Frenleme anında ortaya çıkan enerji, kayıplar hesaba katılmadığında, saf kinetik enerji olarak tanımlanabilir. Bu enerji (3.1) yardımı ile kolayca hesaplanabilir.

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.1)$$

Frenleme enerjisinin geri kazanımı için enerji depolama ünitelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Taşıtların frenleme anında oldukça büyük bir enerji ortaya çıkmaktadır. Kullanılacak enerji

depolama ünitesi de bu yüksek enerjiyi depolayacak şekilde seçilmelidir. Ancak enerji depolama ünitesi seçiminde sistemin maliyeti de göz önünde bulundurularak, en uygun boyutlandırma yapılmalıdır [28]. Bundan dolayı, olası bir frenleme anında ortaya çıkacak maksimum gücün önceden bilinmesi gerekir. Kayıplarda dahil edildiğinde, frenleme anında ortaya çıkan güç (3.2) ile ifade edilebilir [26].

$$P_b = v(m\delta(\frac{dv}{dt}) - mgf_r - \frac{1}{2}(\rho_a C_D A_f v^2)) \quad (3.2)$$

Uygun enerji depolama sistemini seçmek için, sistemin tüm ihtiyaçları (güç ve enerji talebi, frenleme enerjisi v.b.) analiz edilmelidir. Bunun yanında, enerji depolama sistemi özelliklerinin (dinamik cevap verme süresi, enerji ve güç yoğunlukları v.b.) bilinmesi de oldukça önemlidir. Bir sonraki bölümde elektrikli taşıtlarda enerji depolama ünitelerinin özellikleri anlatılarak karşılaştırılması yapılmıştır.

### 3.2 Elektrikli Taşıtlarda Kullanılan Enerji Depolama Sistemleri

Elektrik enerjisinin depolanması, elektrik enerjisi kullanan ve gittikçe daha büyük enerji ve güç yoğunluğuna sahip enerji kaynaklarına ihtiyaç duyan taşıt sistemleri açısından son derece önemlidir. Elektrikli taşıtlarda ana kaynak ile birlikte kullanılan enerji depolama üniteleri sağladığı güç yoğunluğu ile ana kaynağın aşırı yüklenmesini önlemektedir. Böylece ana enerji kaynağının ömrü uzamakta ve boyutu küçülmektedir. Ayrıca, faydalı frenleme enerjisi geri kazanılarak, yakıt tasarrufu sağlamaktadır.

Bu bölümde, önce elektrikli taşıtlarda enerji depolama üniteleri olarak yaygınca kullanılan batarya ve UK teknolojisi hakkında bilgi verilecek, daha sonraki bölümde ise batarya ve UK teknolojisinin karşılaştırılması yapılacaktır.

#### 3.2.1 Batarya Sistemleri

Bataryalar elektrik enerjisini, kimyasal reaksiyonlar ile depolayabilmektedirler. Depolanan enerjinin kullanılması ise; ters elektrokimyasal reaksiyonlarla elektrik enerjisinin elde edilmesi ile mümkün olmaktadır [29]. Bataryalar, dört ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar; pozitif ve negatif elektrotlar, elektrolit ve ayırıcıdır. Bir hücre içerisinde bulunan bu dört ana bileşen, modüler yapıda sunulan bataryaların içerisinde birbirilerine seri olarak bağlanmış şekilde bulunurlar.

İlk batarya tipi olan kurşun-asit bataryalar 1859 yılında Gaston Plante tarafından geliştirilmiş olup, halen en yaygın olarak kullanılan batarya çeşididir. Yüksek güvenilirliği ve ucuz fiyatı nedeniyle kesintisiz güç kaynakları v.b. uygulamalarda kullanılmasına rağmen, diğer batarya çeşitlerine göre sahip olduğu düşük özgül enerji yoğunluğu nedeniyle elektrikli taşıtlarda tercih edilmemektedir. Günümüzde ticari olarak birçok batarya tipi pazarda yerini alsa da, elektrikli taşıtlarda kullanılmaya elverişli olan iki adet batarya tipi mevcuttur. Bunlar, üzerinde halen yoğun çalışmaların sürdürüldüğü nikel-metal hidrür ve lityum-iyon bataryalardır [30].

Nikel-metal hidrür bataryaların ticarileşmesi 20. yüzyılın sonlarına doğru gerçekleşmiştir. Nikel-kadmiyum bataryalara benzeyen performansına karşın, negatif elektrot olarak metal hidrür tarafından emilmiş hidrojen kullanması ile farklılık göstermektedir. Bu özelliği ile nikel-metal hidrür bataryalar 70 Wh/kg'dan fazla enerji yoğunluğuna ve 200 W/kg'dan fazla güç yoğunluğuna sahiptirler. Hücre gerilimleri 1,2 V'dur ve %80 derin deşarj koşulunda, 700 şarj/deşarj çevrimine dayanabilmektedir. Oldukça pahalı olan bu bataryalar, kurşun-asit bataryalar ile kıyaslandığında maliyetlerinin 5 kat daha fazla olduğu görülmektedir [31].

Son zamanlarda batarya teknolojisi üzerine yapılan araştırmalar en çok lityum-iyon bataryalar üzerine yoğunlaşmaktadır. Pahalı bir teknoloji olmasına rağmen sağladığı birçok avantajla tüm araştırmacıların dikkatini çekmekte ve geleceğin batarya teknolojisi olarak görülmektedir. Lityum-iyon bataryalar ilk olarak 1991 yılında Sony firması tarafından ticarileştirilmiştir. Bu bataryalarda göze çarpan ilk özellik yüksek şarj/deşarj çevrimi ve yüksek enerji yoğunluğudur. Şu andaki teknoloji ile 35kWh kapasiteye, 120 Wh/kg enerji yoğunluğuna ve 3500 derin deşarj çevrimine sahip lityum-iyon bataryalar ticari olarak üretilmektedir [32].

Lityum-iyon bataryanın yüksek maliyetinin dışındaki en büyük dezavantajı, şarj kontrolüdür. Aşırı şarj durumu bataryanın kimyasal yapısını bozmakta ve kapasitesinin azalmasına yol açmaktadır. Bu sebepten ötürü, lityum-iyon hücrelerin şarj edilmesi, şarj geriliminin maksimum değeri şarj kapasitesinin % 80'ine ulaşıncaya kadar sabit akımda gerçekleştirilir. Sonrasında sabit gerilimde düşük bir akım değerine gelene kadar şarj devam eder [33]. Hücrelerin, seri veya paralel olarak bağlanması sonucu aşırı şarj durumu meydana gelebilir. Bu nedenle, birçok üretici firma hücreleri ayrı satmak yerine, koruma ve gerilim dengeleyici devreleri ile birlikte modüller biçiminde satmaktadırlar [32].

Lityum-iyon bataryalar yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle, elektrikli taşıt uygulamaları için en uygun potansiyele sahip bataryalar olarak değerlendirilmektedir. Gelecek 15-20 yıl içinde lityum-iyon bataryanın henüz yüksek olan maliyetlerinin düşerek, elektrikli taşıtlarda kullanılabilecek ekonomik seviyeye inebileceği öngörülmektedir. Şu anda da bu bataryayı elektrikli taşıt uygulamalarında kullanılabilecek maliyet ve özelliklere getirebilmek için Japonya (Sony ve Panasonic), Avrupa (SAFT ve Varta) ve ABD’de (Duracell) çeşitli çalışmalar sürdürülmektedir.

### **3.2.2 Ultra-kapasitör Sistemleri**

Ultra-kapasitör (UK) teknolojisinin gelişimine ön ayak olan elektro-kimyasal kondansatörler ilk olarak, 1957 yılında Becker tarafından gözenekli karbon elektrot kullanılan cihazlarla yapılan deneyler sırasında, çok yüksek kapasite değerlerine erişilmesiyle fark edilmiştir. Zamanla daha yüksek kapasite değerlerine ihtiyaç duyulması, UK teknolojisinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. UK teknolojisi literatüre ilk olarak 1966 yılında Standart Oil Of Ohio (SOHIO) tarafından patenti alınarak girmiş olsa da, ticarileştirilmesi 1978’de NEC Corporation tarafından gerçekleştirilmiştir.

UK’lar, bilinen geleneksel kondansatörler ile aynı enerji depolama parametrelerine sahiptir. Ancak, şarj/deşarj anındaki enerji akışı ve sahip olduğu zaman sabiti bakımından, konvansiyonel kondansatörlerden oldukça farklıdır. Ultra-kapasitörlerde, konvansiyonel kondansatörlerdeki gibi ortak di-elektrik (common di-electric) yerine elektrolit malzemedan faydalanır [34]. Bu elektrolit malzeme iki elektrotu birbirinden fiziksel olarak ayırırken, iyon geçişine olanak sağlar. UK’lar yapısında bulunan bu elektrolit malzeme ve elektriksel çift katmanlı yapı üzerinde bulunan çok sayıdaki yüzeysel elektrot sayesinde, konvansiyonel kondansatörlere kıyasla oldukça geniş bir yüzeye sahiptirler. Bu da, birim alan başına oluşan kapasite değerinin çok daha yüksek olması anlamına gelmektedir. Normal kapasitörlerde birim alandaki kapasite değeri  $1\text{nF}/\text{cm}^2$  iken, ultra-kapasitörlerde bu değer  $50\mu\text{F}/\text{cm}^2$ ’dir [35-36].

Konvansiyonel kapasitörlerin daha fazla enerji depolamaları ancak elektrotlarına daha fazla gerilim uygulamaları ile mümkün olmaktadır. Elektrotlara uygulanan bu gerilim, di-elektrik malzemenin delinme gerilimi ile sınırlıdır. UK’lar söz konusu olduğunda, gerilim sınırlaması elektrolit çözeltinin ayrışma özelliğine bağlıdır ve genellikle bu değer 1V-5V aralığındadır [36].

UK'ların seri iç dirençleri, frekansa ve sıcaklığa bağlı olarak değişmekle beraber, batarya ve geleneksel kondansatörlere kıyasla bu değişim çok daha düşüktür. Düşük iç dirence sahip olması, yüksek güç yoğunluğuna ve yüksek şarj/deşarj verimine sahip olması anlamına gelmektedir. UK'larda şarj/deşarj anlarında, düşük iç direnci sayesinde, oluşan kayıplar çok azdır ve verimi %99 civarındadır. Ayrıca UK'lar enerjiyi elektrik alanda depoladığından ve düşük iç dirence sahip olduğundan, bu enerjiyi çok kısa bir sürede verebilmektedirler [37]. UK'lardan çekilebilecek maksimum güç (3.3)'den hesaplanabilir. Eşitlikte gözüken eşdeğer seri iç direnç (ESR), UK'nın tüm dahili elemanlarının (akım kolektörleri, elektrotlar, yalıtkan malzeme, v.s.) dirençlerinin ilave edilmesiyle hesaplanır. Ayrıcadeşarj sırasında oluşan UK gerilimi de yine ESR yardımıyla hesaplanır. Bu özelliği ile UK, kısa süreli olarak yüksek güç istenen uygulamalarda diğer enerji depolama ünitelerine üstünlük sağlamaktadır. Bunun haricinde, kimyasal deformasyona uğramamaları ve hareket eden parçaları olmadığından şarj çevrim ömürleri çok yüksektir [37].

$$P_{\max} = \frac{V^2}{4 \times ESR} \quad (3.3)$$

Enerji depolama ünitelerinde bahsedilmesi gereken diğer bir özellik enerji yoğunluğudur. Çok gözenekli, aktif karbonlu bir yapıya ve buna bağlı olarak geniş yüzey alanına sahip olması neticesinde, enerji yoğunlukları konvansiyonel kondansatörlere göre oldukça yüksektir. Depolanan enerji, her kondansatörde olduğu gibi kapasite değeri ile orantılıdır ve (3.4)'den kolayca hesaplanabilir.

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3.4)$$

UK'lar daha önceden de bahsedildiği üzere, yüksek güç yoğunluğuna sahip ünitelerdir. Ticari olarak üretilen UK'lar, dc ya da düşük frekanslı uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanmışlardır. Bunun nedeni, yüksek frekansta kapasite değerlerinin düşmesidir [38]. Düşük frekanslarda gösterdiği yüksek kapasite değeri ile birlikte UK'lar, birçok açıdan konvansiyonel kapasitörlerden daha avantajlı konuma gelmiş, birçok kullanım alanında da bataryaların yerini almaya başlamışlardır.

### 3.2.3 Enerji Depolama Sistemi Olarak Ultra-kapasitörler ile Bataryaların Karşılaştırılması

Elektrikli taşıtlarda kullanılan enerji depolama üniteleri, sistem performansı ve verimi açısından oldukça önemlidir. Sistemdeki enerji akışı esnasında göstereceği direnç, dinamik cevap hızı, farklı işletim koşullarındaki performansı gibi özellikler verimi doğrudan etkilemektedir. Her enerji depolama ünitesinin yapısı ve karakteristiği farklı olduğundan, enerji depolama ünitesi seçimi, ihtiyaca göre avantaj/dezavantajları göz önüne alınarak yapılmalıdır.

Tarihsel sürece bakıldığında, elektrik enerjisinin depolanması ilk olarak bataryalarla gerçekleştirilmiş olup, batarya teknolojisi üzerindeki çalışmalar halen tüm hızıyla sürmektedir. Ancak şu an ticari olarak bulunabilen bataryalar, yapılarından kaynaklanan kısıtlamalar nedeniyle özellikle dinamik sistemlerde yetersiz kalmaktadırlar. Diğer taraftan, elektrikli taşıt teknolojisi üzerine yapılan araştırmaların son zamanlarda tekrar ivmelenmesi ile eş zamanlı olarak ivmelenen UK teknolojisi, dinamik uygulamalarda gösterdiği performans ile bataryalara göre birçok avantaj sağlamaktadır.

Taşıt uygulamalarında enerji depolama üniteleri üzerine etki eden en önemli parametrelerden biri sıcaklıktır [38]. Taşıtın farklı hava şartlarında da çalışmasını başarıyla sürdürebilmesi istenmektedir. Bilindiği üzere bataryaların çalışması sıcaklıktan bir hayli etkilenmektedir. Diğer yandan UK'ların çalışması kimyasal reaksiyonlara dayanmadığından, +65°C ile -40°C gibi geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilmektedirler [39]. Özellikle düşük sıcaklıkta sergiledikleri performans, soğuk havalarda motorun ilk çalışma enerjisini sağlamaya oldukça elverişlidir.

Elektrikli taşıtlarda enerji devamlı olarak bir dönüşüm içerisinde. Enerjinin depolanma veya kullanıma anlarında batarya üzerinden geçen yüksek ve/veya ani şarj/deşarj akımları, bataryayı çok büyük bir deformasyona uğratır. Bataryanın şarj seviyesinde sürekli oluşan dalgalanma, batarya ömrünü ciddi bir şekilde azaltmaktadır. Dahası, bataryalar ani değişen yüklerle yeterince hızlı cevap veremezler. UK'lar bu noktada enerjiyi elektrik alanında depoladıklarından ve seri eşdeğer dirençlerinin çok düşük olmalarından dolayı büyük avantaja sahiptirler. UK'ların bu iki özelliği, çok yüksek akımlar ile şarj/deşarj olmalarını mümkün kılar.

Aynı boyut ve ağırlığa sahip batarya ve UK ünitesi karşılaştırıldığında, UK'ların sahip olduğu yüksek güç yoğunluğu göze çarpmaktadır. Bu özelliği ile UK'lar, kısa süreli yüksek güç istenen

uygulamalara ekonomik bir çözüm getirmektedir[40]. Ancak, enerji yoğunluğu söz konusu olduğunda batarya teknolojisinin ciddi bir üstünlüğü bulunmaktadır. Bunun nedeni ise; batarya elektrotlarındaki malzemenin çok fazla bir kısmının enerji depolamasına katkı sağlaması ve buna karşın UK'larda ise sadece elektrot yüzeyinin depolamada etkin olmasıdır. Enerji yoğunlukları rakamlarla verilirse; bataryalarda 25-100 Wh/kg iken UK'larda bu değer 1-10 Wh/kg'dır.

UK'lar sahip oldukları düşük enerji yoğunluklarından dolayı, elektrikli taşıt uygulamaları gibi yüksek enerji gereksinimi istenen uygulamalarda birincil enerji kaynağı olarak tercih edilmezler. Buna karşın yüksek güç yoğunluğu, hızlı dinamik cevabı, yüksek akımlarla şarj/deşarj olabilmesi v.b. gibi birçok avantajından dolayı yeni yapılan çalışmalarda yaygınca yer almaktadır. Günümüzde de araştırmalar, UK'ların bilinen en büyük dezavantajı olan düşük enerji yoğunluğunun arttırılmasına yönelmiş durumdadır.

Bu çalışma için oluşturulan sistemde enerji depolama ünitesi olarak, taşıtlarda oldukça hızlı gerçekleşen frenleme durumunda ortaya çıkan enerjiyi verimli bir şekilde geri kazanmada bataryalardan çok daha etkin olan UK kullanılması uygun görülmüştür.

### **3.3 Elektrikli Taşıtlarda Güç Biçimlendirme Üniteleri ve Gereksinimi**

Güç biçimlendirme üniteleri veya başka bir ifadeyle güç elektroniği temelli dönüştürücüler elektrikli taşıt uygulamalarının en önemli bileşenlerinden birisidir. Günümüz teknolojisi geleneksel taşıtlarda dahi taşıtın özelliklerini ve konforunu arttırmak için daha fazla elektriksel yük kullanımına doğru yönelmektedir [41]. Farklı gerilim seviyelerine sahip bu yükler arasında güç akışını sağlamak için düşük güçlü dc-dc ve dc-ac dönüştürücülere ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak elektrikli taşıtlar söz konusu olduğunda ana kaynak ve enerji depolama üniteleri ile dc bara arasında ve dc bara ile motor arasında gerekli enerji akışı ve güç dönüşümünü sağlamak için yüksek güçlü dönüştürücülere ihtiyaç duyulmaktadır. Burada kullanılacak dönüştürücüler güç takibi, gerilim regülasyonu, frenleme enerjisi kazanımı v.b. durumlarda başarılı bir performans sergilemeli ve maliyeti düşük olmalıdır.

Elektrikli taşıtlar ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar incelediğinde, sistemin topolojisine bağlı olarak tek yönlü veya çift yönlü, izoleli veya izolesiz, tek girişli veya çok girişli dönüştürücü topolojilerinin geliştirildiği görülmektedir. Bunlardan çok girişli olanları, birden fazla kaynak arasında yük paylaşımı yapmak ve gerilim regülasyonu sağlamak amacıyla

geliştirilmişlerdir [42]. Giriş kaynaklarının seri bağlı olduğu çok girişli dönüştürücü topolojileri, giriş kaynaklarından birinin çökmesi sonucunda istenen güç paylaşımını ve güç takibini sağlayamamaktadır [43-46]. Diğer taraftan, paralel bağlı olan çok girişli dönüştürücü tipleri ise çıkışı eş zamanlı besleyerek yük paylaşımına olanak sağlarlar [45-49]. Ancak frenleme enerjisinin geri kazanılabilmesi için kullanılacak dönüştürücü çift yönlü çalışabilmelidir. Literatürde bu özelliği sağlayan çok girişli dönüştürücü topolojileri bulunmasına karşın, bu dönüştürücüler kontrol zorlukları, karmaşık yapıları ve frenleme enerjisini kazanma noktasında kısıtlı bir aralıkta çalışabilmelerinden dolayı elektrikli taşıt uygulamalarında tercih edilmemektedirler [45-46], [50-52].

Dönüştürücü tipleri frenleme enerjisi kazanım performansları açısından değerlendirildiğinde, tek girişli ve çift yönlü olanların çok girişlilere kıyasla daha geniş bir aralıkta frenleme enerjisini kazanabildikleri görülmektedir. Ayrıca tek girişli dönüştürücü kullanımı sistemin karmaşıklığını, kaynakların birbirine olan bağımlılıklarını ve kontroldeki zorluğu da azaltmaktadır. Tek girişe sahip dönüştürücülerin tek yönlü çalışabilenleri genellikle enerji depolama özelliği olmayan ana kaynak ile kullanılırken, çift yönlü çalışabilenler ise enerji depolama sistemleriyle birlikte kullanılırlar [8], [11], [47], [49], [52-55]. Bu dönüştürücüler izoleli ve izolesiz olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. İzoleli olanlar, bir transformatör üzerinden elektriksel izolasyon sağlarken, yüksek maliyet ve kontrol kısıtlamalarını da beraberinde getirmektedirler [56-58]. Diğer taraftan izolesiz olan dönüştürücülerin güç elektroniği eleman sayıları az ve kontrolleri de daha kolaydır. Bu nedenlerden dolayı, elektrikli taşıtlarda genellikle EDS'lerin basit topoloji ve ucuz maliyete sahip olan izolesiz ve tek girişli güç dönüştürücüleri ile birlikte kullanımı tercih edilmektedir [59-62].

### **3.3.1 Literatürde Kullanılan İzolesiz, Çift Yönlü ve Tek Girişli DC-DC Dönüştürücü Topolojileri**

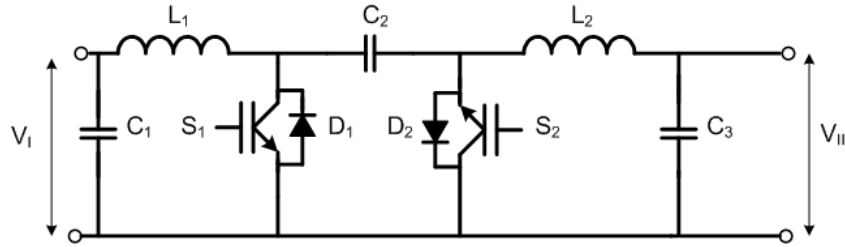
Bir önceki bölümde belirtildiği gibi, EDS'lerin çıkışında izolesiz ve çift yönlü güç dönüştürücüsü kullanımı tercih edilmektedir. Farklı yapıları sahip olan bu dönüştürücüler arasında, literatürde kabul görmüş üç adet güç dönüştürücü topolojisi bulunmaktadır. Bu topolojiler literatürde;

- 1) Cuk
- 2) SEPIC/Luo

### 3) Yarım köprü (Half bridge)

olarak isimlendirilmiştir.

Cuk dönüştürücüye ait temel devre Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Devrede iki adet endüktans ( $L_1$ ,  $L_2$ ), bir adet transfer kapasitörü ( $C_2$ ), iki adet filtre kapasitörü ( $C_1$ ,  $C_3$ ) ve iki adet güç anahtarı ( $S_1$ ,  $S_2$ ) bulunmaktadır. Devrenin yapısına bakıldığında ilk dikkati çeken, bu topolojinin yükseltici ve düşürücü yapılardan oluşmuş bir kombinasyona benzemesidir. Her iki yönde de (ileri ve geri) yükseltici ve düşürücü çalışabilen bu dönüştürücünün en büyük dezavantajı çıkış geriliminin giriş gerilimine göre terslenmesidir. Bir başka dezavantajı ise çıkış akımının  $C_2$  kondansatörü üzerinden geçmesidir. Bu durum hem kayıpların artmasına hem de kondansatörün büyümesine yol açmaktadır. Bu nedenle  $C_2$ , yüksek dalgalanma akımı ile çalışabilen ve düşük bir eşdeğer seri dirence sahip bir kondansatör olarak seçilir.



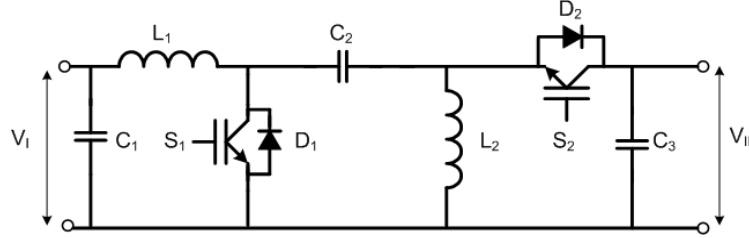
Şekil 3. 1 Cuk çift yönlü dönüştürücü topolojisi

Devrenin çalışması şu şekildedir:  $S_1$  anahtarı iletime girdiğinde, akım  $L_1$  üzerinden geçer ve  $L_1$ ’in manyetik alanında enerji depolanır.  $S_1$  kesime geçtiğinde endüktans akımı kesilemeyeceğinden, akım  $C_2$  ve  $D_2$  üzerinden yolunu tamamlar. Bu esnada  $L_1$  enerjisinin bir kısmını  $C_2$ ’ye aktarır ve  $C_2$  giriş geriliminden daha yüksek bir değere şarj edilir.  $S_1$  anahtarı tekrar iletime girdiğinde, şarjlı durumda olan  $C_2$ ,  $L_2$  endüktansı üzerinden yüke doğru deşarj olur.  $C_2$ ’nin deşarjı sırasında,  $L_2$  ve  $C_3$  çıkış için mükemmel bir L-C filtresi oluşturur ve bu esnada  $L_1$  bir sonraki periyot için tekrar enerji depolar. Devrenin ters yönde çalışması, ileri yönde çalışmasına çok benzerdir. Ters yönde çalışmada,  $S_1$  yerine  $S_2$  anahtarı anahtarlanmaktadır.

Tipik yükseltici/düşürücü dönüştürücü de olduğu gibi, giriş ile çıkış gerilimleri arasındaki ilişki (3.5)’den hesaplanabilir. Eşitlikte kullanılan negatif işaret, çıkışın terslendiğini göstermektedir. Devrenin yükseltici veya düşürücü çalışması, uygulanan darbe genişlik modülasyonunun doluluk oranına ( $d$ ) bağlıdır. Devre  $d < 0,5$  seçildiğinde düşürücü,  $d > 0,5$  seçildiğinde ise yükseltici olarak çalışmaktadır.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{d}{1-d} \quad (3.5)$$

Literatürde yer alan diğer bir izolesiz, çift yönlü güç dönüştürücüsü SEPIC/Luo topolojisidir. İki farklı dönüştürücü yapısının (SEPIC ve Luo) birleştirilmesi ile elde edilmiş olan bu dönüştürücüye ait topoloji Şekil 3.2’de verilmektedir.



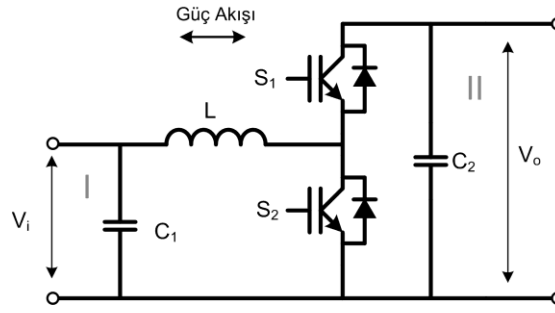
Şekil 3. 2 SEPIC/Luo dönüştürücü topolojisi

Devrenin ileri yönde çalışması şu şekildedir: S1 anahtarı ilettime geçtiğinde, L1 endüktansı giriş gerilimi altında enerji depolar. Bu esnada şarjlı durumda bulunan C2 kondansatörü, enerjisini L2 endüktansına aktarır. Yük akımının devamlılığını ise C3 çıkış kondansatörü sağlar. S1 anahtarı iletimden çıktığında, L1 endüktansı C2’yi şarj eder ve aynı zamanda yükü besler. L2 endüktansının akımı aniden kesilemeyeceği için, o da yük üzerinden akım yolunu tamamlar.

SEPIC/Luo dönüştürücüde, giriş ile çıkış arasında ilişki (3.6)’da verilmektedir. Eşitlikten açıkça görüldüğü üzere giriş ve çıkış kutuplanmaları aynıdır. Cuk dönüştürücüde olduğu gibi devrenin yükseltici veya düşürücü çalışması, aşağıdaki eşitlikte görüldüğü üzere doluluk oranına (d) bağlıdır. Aynı şekilde devre  $d < 0,5$  seçildiğinde düşürücü,  $d > 0,5$  seçildiğinde ise yükseltici olarak çalışmaktadır.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{d}{1-d} \quad (3.6)$$

Literatürde kullanılan diğer bir dönüştürücü yapısı da Şekil 3.3’de verilen yarım köprü (half bridge) topolojisidir. Görüldüğü üzere, bu topoloji iki adet güç anahtarına ve bir endüktansa sahiptir. Güç akışı çift yönlü olup, yapısı itibariyle iki farklı çalışma moduna sahiptir. İleri yönde yükseltici olarak çalışan bu dönüştürücü, geri yönde ise yalnızca düşürücü olarak çalışabilmektedir.



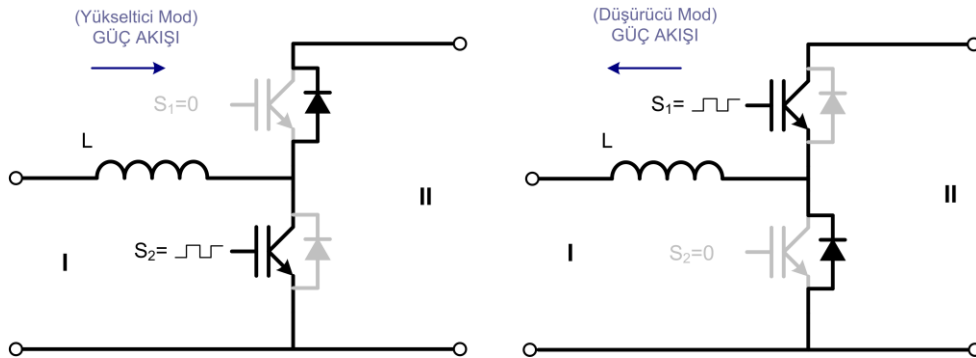
Şekil 3. 3 Yarım-köprü çift yönlü dönüştürücü topolojisi

Dönüştürücünün çalışma moduna bağlı olarak anahtarların aldığı durum Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3. 1 Yarım-köprü dönüştürücünün çalışma moduna göre anahtarların durumu

| Anahtarlar | Yükseltici Mod | Düşürücü Mod |
|------------|----------------|--------------|
| S1         | Kesimde        | PWM          |
| S2         | PWM            | Kesimde      |

Dönüştürücünün yükseltici olarak çalışması için  $S_1$  anahtarı kesimde tutularak  $S_2$  anahtarlanır. Bu çalışma modunda oluşan güç akışı şekilde gösterildiği yöndedir ( $I \rightarrow II$ ) (Şekil 3.4). Düşürücü çalışma durumunda ise,  $S_2$  anahtarı sürekli kesimde iken  $S_1$ ’in anahtarlanması ile birlikte gerilim düşürülerek enerji II’den I yönüne doğru aktarılmaktadır (Şekil 3.4). Çizelge 3.1’de görüldüğü üzere,  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarları her iki çalışma modunda da hiç bir zaman aynı anda iletimde kalmamaktadır.



Şekil 3. 4 Yarım köprü çift yönlü dönüştürücünün çalışma durumları

İleri yönde yükseltici olarak çalışma durumunda, çıkış ile giriş gerilimleri arasındaki ilişki (3.7)'de verilmektedir. PWM doluluk oranının altında bulunan rakamsal indisler, ait oldukları anahtarları göstermektedir.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-d_2} \quad (3.7)$$

Geri yönde düşürücü olarak çalışması durumunda ise, çıkış ve giriş gerilimleri arasındaki bağıntı (3.8)'den hesaplanabilmektedir.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = d_1 \quad (3.8)$$

Elektrikli taşıtlarda kullanılmaya uygun olan bu üç topolojinin (Cuk, SEPIC/Luo ve yarım köprü dönüştürücü) bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Cuk dönüştürücünün sağladığı en önemli avantaj, hem kaynak hem de yük tarafında bulunan endüktanslar sayesinde giriş ve çıkış akım dalgalanmalarının çok az olmasıdır. Bu sebeple, yakıt hücreli sistemlerde kullanımı daha uygundur. Ancak, giriş ve çıkış kutuplanmasının ters olması ve transfer kapasitörünün çok büyük olması önemli dezavantajlarındandır. Buna ek olarak, yarım-köprü dönüştürücüye göre sahip olduğu ilave endüktans ve kapasitör de maliyeti arttırmaktadır. SEPIC/Luo dönüştürücüye bakıldığında ise, Cuk dönüştürücü gibi ilave pasif elemanlara sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, çıkış akımı süreksiz olduğundan, burada kullanılacak çıkış kapasitörü Cuk dönüştürücüye oranla daha büyük olacaktır. Diğer yandan, tek endüktansa sahip yarım-köprü dönüştürücü ekonomik açıdan avantajlı konumdadır. Ayrıca, daha düşük endüktans kaybı olacağından, verimi de diğer dönüştürücülere göre daha yüksektir. Ancak, SEPIC/Luo dönüştürücü de olduğu gibi çıkış akımı süreksizdir ve çıkış kapasitörünün değeri yüksek olacaktır.

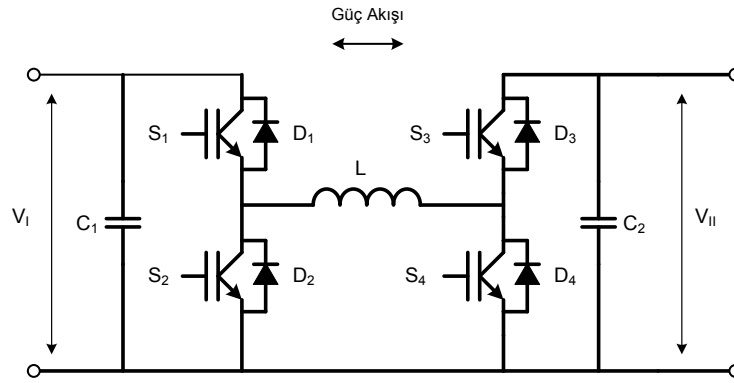
Dönüştürücüler kıyaslanırken daha sağlıklı bir değerlendirme açısından elemanlar üzerinde oluşan akım ve gerilim streslerine de bakılmalıdır. Literatürde bu konu üzerine birçok çalışma yapılmıştır [59-60], [62]. Elde edilen sonuçlara göre; yarım-köprü dönüştürücünün endüktansı ile Cuk ve SEPIC/Luo dönüştürücülerinin kaynak tarafındaki endüktanslarının akım değerlerinin aynı olduğu görülmüştür. Cuk ve SEPIC/Luo dönüştürücülerin sahip oldukları diğer endüktansın değeri ise kaynak tarafındaki endüktansın yaklaşık iki katı

kadardır. Ayrıca, yarım-köprü dönüştürücüsünün aktif elemanları üzerindeki akım ve gerilim stresi de diğerlerine kıyasla oldukça düşüktür.

Verim ve maliyet açısından oldukça avantajlı olan yarım-köprü dönüştürücü, bu özelliklerine ilave olarak basit topolojiye ve kontrol kolaylığına da sahiptir. Bu özellikleri ile literatürde yer alan çalışmalarda sıklıkla tercih edilmiştir. Ancak, daha öncede belirtildiği gibi yarım-köprü dönüştürücü, yapısı nedeniyle geri yönde sadece düşürücü olarak çalışabilmektedir. Bu nedenle elektrikli taşıtın düşük hızlarına bağlı olarak bara geriliminin enerji depolama ünitesinin gerilim seviyesinin altına inmesi durumunda, faydalı frenleme enerjisinin kazanılması mümkün olmayacaktır. Buradaki kayıp enerjinin geri kazanımı yakıt tasarrufu açısından büyük önem arz etmektedir. Bu problemin çözümü için, hem frenleme anında kaybolan enerjinin geri kazanımı sağlayacak hem de yarım-köprü dönüştürücü topolojisinin avantajlarını taşıyacak bir yapı bulunması amacıyla detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Bu araştırma sonucu, detayları bir sonraki bölümde verilecek olan kaskad bağlı çift yönlü çalışabilen dönüştürücü kullanımının uygun olacağı öngörülmüştür.

### 3.3.2 Önerilen Kaskad Çift Yönlü DC-DC Dönüştürücü

Şekil 3.5’de topolojisi gösterilen kaskad çift yönlü dönüştürücü, iki yarım köprü topolojinin ardarda bağlanması ile elde edilmiş bir dönüştürücüdür. Dönüştürücünün ikinci kısmı, bir önceki bölümde detaylıca anlatılan yarım köprü dönüştürücünün aynısıdır.



Şekil 3. 5 Kaskad çift yönlü dönüştürücü topolojisi

Yarım köprü dönüştürücüden türetilen bu yeni dönüştürücü, yarım köprü dönüştürücünün sağladığı yüksek verimi ve sahip olduğu ekonomik avantajı da beraberinde getirmektedir. Bu sayede, literatürde kullanılan diğer çift yönlü topolojilere göre de üstünlük sağlamaktadır. Ayrıca, hem ileri (motor sürme) yönünde hem geri (faydalı frenleme) yönünde yükseltici ve

düşürücü olarak çalışabildiğinden, yarım köprü dönüştürücünün faydalı frenleme enerjisini kazanmakta yetersiz kaldığı durumlarda (düşük hızlarda) iyi bir performans sergileyeceği öngörülmektedir.

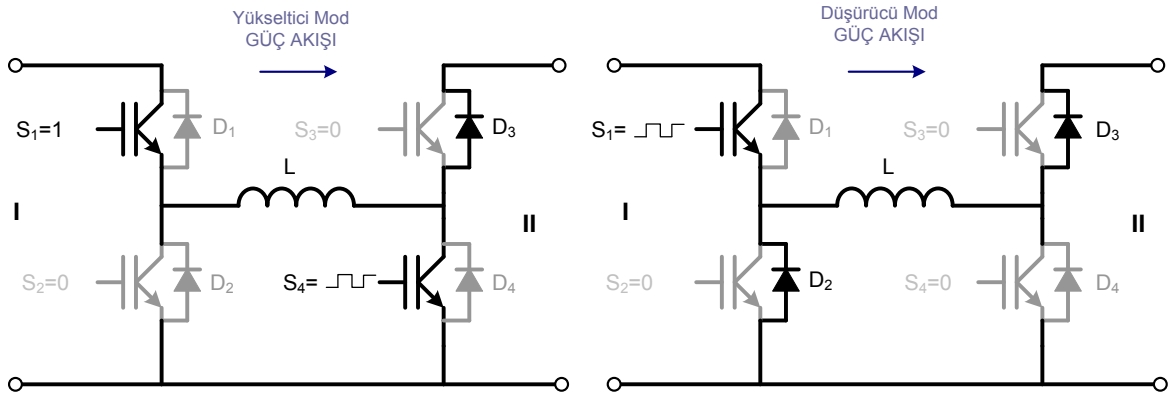
Kaskad bağlı topolojinin çalışma mantığı yarım köprü dönüştürücüye benzetmekle beraber, her çalışma modunda en az bir anahtar sürekli olarak iletimde kalmakta veya anahtarlanmaktadır. Çalışma modlarına bağlı olarak anahtarların aldıkları durumlar Çizelge 3.2’de verilmektedir.

Çizelge 3. 2 Kaskad dönüştürücünün çalışma moduna göre anahtarların durumu

| Anahtarlar | İleri Yön<br>(Motor Sürme) |          | Geri Yön<br>(Faydalı Frenleme) |          |
|------------|----------------------------|----------|--------------------------------|----------|
|            | Yükseltici                 | Düşürücü | Yükseltici                     | Düşürücü |
|            | Mod                        | Mod      | Mod                            | Mod      |
| $S_1$      | İletimde                   | PWM      | Kesimde                        | Kesimde  |
| $S_2$      | Kesimde                    | Kesimde  | PWM                            | Kesimde  |
| $S_3$      | Kesimde                    | Kesimde  | İletimde                       | PWM      |
| $S_4$      | PWM                        | Kesimde  | Kesimde                        | Kesimde  |

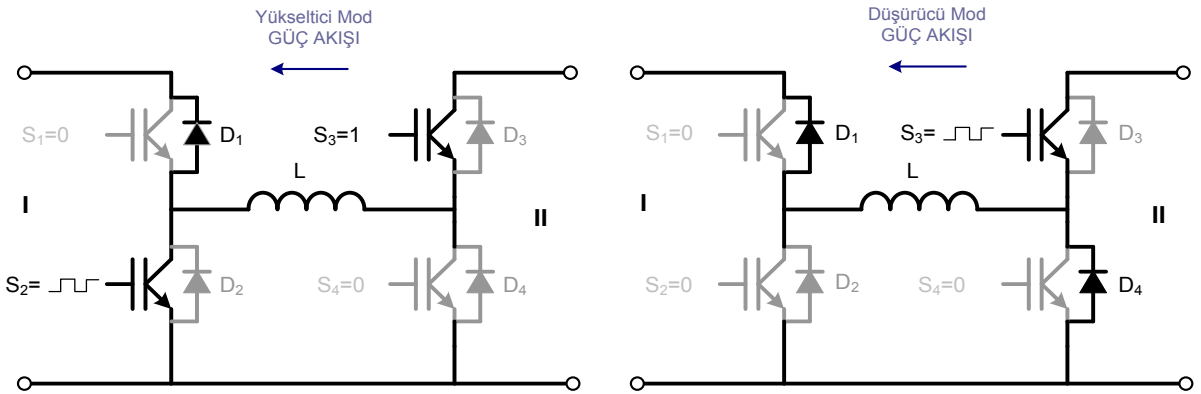
Dönüştürücüyü ileri yönde yükseltici çalıştırmak için  $S_1$  anahtarı devamlı olarak iletimde tutulur ve  $S_4$ ’e PWM uygulanır. Bu esnada diğer anahtarlar kesimdedir (Şekil 3.6).  $S_4$ ’ün anahtarlanma olayı detaylı olarak incelendiğinde;  $S_4$  iletime girdiğinde giriş kaynağı endüktansa enerji aktarır ve çıkış kondansatörü yükü besler.  $S_4$  kesime sokulduğunda ise, giriş kaynağı ve endüktans,  $S_3$  anahtarına ters paralel bağlı diyotu iletime sokarak çıkış kondansatörünü ve yükü birlikte beslerler.

İleri yönde düşürücü çalışma modunda (Şekil 3.6); sadece  $S_1$  anahtarlanırken, diğer tüm anahtarlar kesimde tutulur.  $S_1$ ’in anahtarlanması durumunda oluşan enerji akışı şu şekildedir;  $S_1$  iletimdeyken giriş kaynağı endüktansa enerji aktarır ve yükü besler.  $S_1$  kesime sokulduğunda ise endüktans üzerinde oluşan gerilim ile  $S_2$  anahtarına ters paralel bağlı diyot iletime girer ve endüktansta depolanan enerji yükü besler. Genel olarak ileri yönde her iki çalışma modunda da güç akışı I yönünden II yönüne doğrudur.



Şekil 3. 6 Kaskad topolojinin ileri yönde çalışma durumları

Geri yönde çalışma modları da, ileri yönde çalışma modlarına benzemektedir. Ancak güç akışı II yönünden I yönüne doğru gerçekleşir. Geri yönde yükseltici çalışma,  $S_3$ 'ün devamlı iletimde tutulması ve  $S_2$ 'nin anahtarlanmasıyla elde edilir (Şekil 3.7). Düşürücü çalışma ise, yalnızca  $S_3$ 'ün anahtarlanması ile gerçekleşir ve bu esnada diğer tüm anahtarlar kesimde tutulur (Şekil 3.7).



Şekil 3. 7 Kaskad topolojinin geri yönde çalışma durumları

Bu topolojide çıkış ile giriş gerilimleri arasındaki oran (3.9)'dan hesaplanabilir. Bu eşitlik, dönüştürücünün her iki yönde de çalışması durumunda geçerlidir. Burada PWM işaretlerinin doluluk oranlarının ( $d$ ) altında bulunan indisler, ilgili oldukları anahtarları göstermektedir. “ $d$ ” ve “ $y$ ” indisleri sırasıyla; düşürücü ve yükseltici anahtarları belirtmektedir.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{d_d}{1 - d_y} \quad (3.9)$$

Önerilen kaskad topolojinin bu avantajlarına ek olarak, ilave herhangi bir aktif veya pasif eleman kullanmadan ve sadece güç anahtarlarının anahtarlama sıralarını değiştirerek, sıfır-

gerilim altında (ZVS) ve sıfır-akım altında (ZCS) anahtarlama yapılabilmektedir [63]. Bu yumuşak anahtarlama metodunu kullanarak, anahtarlama kayıpları ve dolayısıyla dönüştürücü kayıpları büyük ölçüde azaltılabilir ki bu da daha küçük hacim ve daha yüksek güç yoğunluğunun sağlanması anlamına gelmektedir.

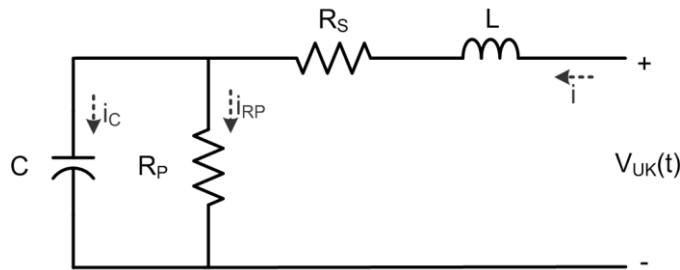
Sahip olduğu avantajlar dikkate alındığında önerilen kaskad çift yönlü dönüştürücünün, faydalı frenleme enerjisini daha verimli bir şekilde kazanabileceği öngörülmektedir. Sonraki bölümlerde bu doğrulamak amacıyla yapılan benzetim ve deneysel çalışmalar sonuçları yer almaktadır.

**BENZETİM ÇALIŞMALARI**

Bu bölümde, önerilen kaskad topolojinin performans analizini yapabilmek ve çalışma modlarını görebilmek amacı ile gerçekleştirilen benzetim çalışmaları yer almaktadır. Bu amaçla öncelikle kaskad dönüştürücü, UK ve kalıcı mıknatıslı dc motor modelleri oluşturularak sistem entegrasyonu sağlanmıştır. Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında hedeflenen başarı, kaskad dönüştürücünün kalıcı mıknatıslı dc motoru ECE-15 sürüş çevriminin hız ve güç profillerini referans alarak sürmesi ve referans gücün negatif olduğu durumlarda frenleme enerjisini en iyi şekilde kazanabilmesidir. Böylece dönüştürücünün deneysel tasarımına geçilmeden ön analiz yapılmıştır.

**4.1 Ultra-kapasitör Modeli**

Benzetim çalışmalarında Şekil 4.1’de gösterilen UK modelinden yararlanılmıştır. Bu model basit bir yapıya sahip olmasına rağmen UK dinamik davranışını başarılı bir şekilde temsil etmektedir. Bunun yanında literatürde çok daha karmaşık yapıya sahip ve UK davranışını daha iyi modelleyen çalışmalar da bulunmaktadır. Ancak, bu modeller kullanıldığında simulasyon süresi uzamakta ve buna bağlı olarak karmaşık sistemlere entegre edilmeleri noktasında tercih edilmemektedirler.



Şekil 4. 1 UK modelinin elektriksel eşdeğer devresi

Yapılan benzetim çalışmasında sıcaklığın UK seri direnci üzerinde oluşturduğu etki de modele dahil edilmiştir. Ancak simulasyon süresinin kısa olması istendiğinden, diğer karmaşık modellerin aksine UK kapasite değeri sabit alınmıştır. Eşdeğer devrede  $R_s$  ile gösterilen parametre UK'nın eşdeğer seri direncini göstermektedir.  $R_p$  ise UK uçları açık devre iken kendiliğinden oluşan (self) deşarjı temsil eden paralel eşdeğer dirençtir. C parametresi modelde sabit kabul edilen kapasiteyi, L ise UK'nın anlık akım değişimlerine karşı gösterdiği endüktif etkiyi temsil etmektedir. Eşdeğer devrede kullanılan tüm parametreler Çizelge 4.1'te verilmiştir.

Çizelge 4. 1 UK dinamik modelinde kullanılan parametreler

|           |                                                            |
|-----------|------------------------------------------------------------|
| $R_s$     | UK eşdeğer seri direnci ( $\Omega$ )                       |
| C         | UK kapasitörü (F)                                          |
| $R_p$     | UK paralel eşdeğer direnci ( $\Omega$ )                    |
| L         | UK eşdeğer seri endüktansı (H)                             |
| $V_{UK}$  | UK çıkış gerilimi (V)                                      |
| $V_C$     | C uç gerilimi (V)                                          |
| $V_C^0$   | Başlangıç UK gerilimi (V)                                  |
| $V_{R_s}$ | $R_s$ uç gerilimi (V)                                      |
| $V_{R_p}$ | $R_p$ uç gerilimi (V)                                      |
| $V_L$     | L uç gerilimi (V)                                          |
| i         | UK şarj/deşarj akımı (A)                                   |
| $i_c$     | C şarj/deşarj akımı (A)                                    |
| $i_{rp}$  | UK self-deşarj akımı (A)                                   |
| $I_C$     | UK kaçak akımı (A)                                         |
| T         | Sıcaklık ( $^{\circ}C$ )                                   |
| TCF       | $R_s$ elemanın değeri için sıcaklık düzeltme katsayısı     |
| ESR       | UK kataloğunda belirtilen eşdeğer seri direnç ( $\Omega$ ) |

UK eşdeğer devresinden açıkça görüldüğü gibi UK'nın uç gerilimi,

$$V_{UK} = V_C - V_{R_s} - V_L \quad (4.1)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Seri direnç üzerinde oluşan gerilim düşümü  $V_{R_s}$  ve endüktans gerilimi  $V_L$  gerilimleri sırası ile,

$$V_{R_s} = R_s \cdot i \quad (4.2)$$

$$V_L = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilir. C kapasitörünün uç gerilimi ise (4.4) ile gösterilmektedir.

$$V_C = V_C^0 - \frac{1}{C} \cdot \int i_c dt \quad (4.4)$$

Bu eşitliklerde kullanılan akım ifadeleri  $i_{RP}$  ve  $i_c$  sırasıyla,

$$i_{RP} = \frac{V_C}{R_p} \quad (4.5)$$

$$i_c = i - i_{RP} \quad (4.6)$$

şeklindedir. Self-deşarjı temsil eden  $R_p$  direnci ise,

$$R_p = \frac{V_{UK_{MAX}}}{I_C} \quad (4.7)$$

ile hesaplanmaktadır. Eşitlikteki  $I_C$  değeri katalog bilgisinde verilen UK kaçak akımıdır.  $R_s$  direnci ise sıcaklığa bağlı olan ESR'yi temsil etmektedir. ESR yine üretici firmanın sağladığı katalogda belirtilen eşdeğer seri iç direncidir.  $R_s$  ile ESR arasındaki ilişki,

$$R_s(T) = TCF \times ESR \quad (4.8)$$

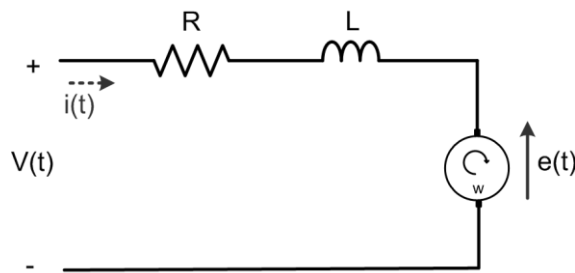
şeklindedir. TCF ise sıcaklığa bağlı bir katsayı olup,



Benzetim çalışması yapılan kalıcı mıknatıslı dc motor için yararlanılan elektriksel eşdeğer devre Şekil 4.3'te görülmektedir. Elektriksel eşdeğer devrede gösterilen R rotor direncini, L rotor endüktansını ve  $e(t)$  endüklenen gerilimi temsil etmektedir. Endüklenen gerilim, rotorun kalıcı mıknatıs tarafından üretilen sabit akı çizgileri içerisinde dönmesiyle oluşmaktadır. Bu gerilim genellikle zıt elektromotor kuvvet (emk) olarak adlandırılır.

Çizelge 4. 2 Kalıcı mıknatıslı dc motor modelinde kullanılan parametreler

|          |                                 |
|----------|---------------------------------|
| R        | Rotor direnci ( $\Omega$ )      |
| L        | Rotor self-endüktansı (H)       |
| $e(t)$   | Elektromotor kuvveti (V)        |
| $w(t)$   | Açısal hız (rad/sn)             |
| $i(t)$   | Motor akımı (A)                 |
| $V(t)$   | Motor uç gerilimi (V)           |
| $K_m$    | Moment sabiti (Nm/A)            |
| $T_m(t)$ | Mil momenti (Nm)                |
| $K_f$    | Zıt emk sabiti (V/rad.sn)       |
| J        | Atalet ( $\text{Nm/rad/sn}^2$ ) |
| $T_L(t)$ | Yük momenti (Nm)                |
| B        | Sürtünme sabiti (Nm/rad.sn)     |
| $\eta$   | Verim                           |
| $P_m(t)$ | Mekanik güç (Nm/rad.sn)         |
| $P_e(t)$ | Elektriksel güç (W)             |



Şekil 4. 3 Kalıcı mıknatıslı dc motor elektriksel eşdeğer devresi

Şekil 4.3'te açıkça görüldüğü gibi motor uçlarındaki gerilim ifadesi,

$$V(t) = i(t) \cdot R + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (4.10)$$

şeklindedir. Endüklenen zıt emk ise açısal hızla orantılı olup,

$$e(t) = K_f \cdot \omega(t) \quad (4.11)$$

şeklinde ifade edilir. Buradaki  $K_f$  değeri zıt emk sabitidir. Değeri ise kalıcı mıknatısın akı yoğunluğuna, armatürün relüktansına ve armatürdeki sarım sayısına bağlıdır. Bu eşitliğe göre motor devrinin artması ile motorun çekeceği akımın düşeceği açıkça görülmektedir. Mil momenti ise (4.13)'de görüldüğü gibidir.

$$T_m(t) = J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + B \cdot \omega(t) + T_L(t) \quad (4.12)$$

Mil momentinin akıma bağlı ifadesi,

$$T_m(t) = K_m \cdot i(t) \quad (4.13)$$

şeklinde olup, eşitlikteki  $K_m$  parametresi moment sabitini temsil etmektedir. Bu sabit, zıt emk sabitinde olduğu gibi kalıcı mıknatısın akı yoğunluğuna, armatürün relüktansına ve armatürdeki sarım sayısına bağlıdır. Milden alınan mekaniksel güç açısal hıza ve mil momentine bağlı olup,

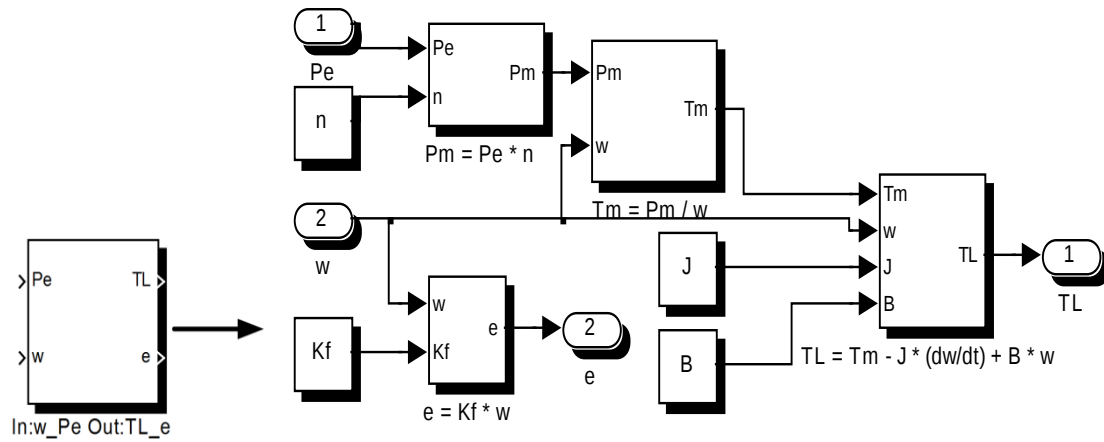
$$P_m(t) = T_m(t) \cdot \omega(t) \quad (4.14)$$

ile ifade edilebilmektedir. Diğer bir önemli parametre olan motor veriminin ifadesi ise, motor milinden alınan mekanik gücün sargılara uygulanan elektriksel güce oranı

$$P_e(t) = \frac{P_m(t)}{\eta} \quad (4.15)$$

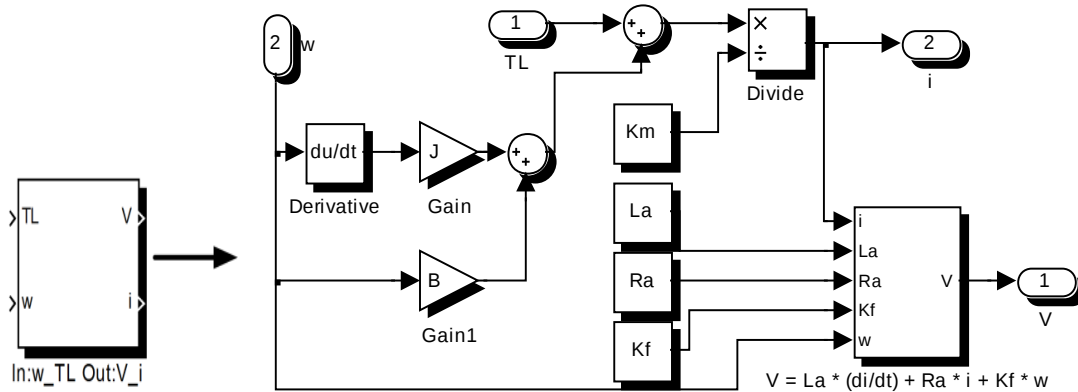
şeklindedir. Dc motor modellenmesinde iki farklı alt model oluşturulmuştur. Bunlardan birincisi, motora verilen elektriksel gücün ve buna karşılık gelen açısal hızın bilinmesi durumunda yük momentinin bulunmasıdır. Diğerisi ise, yük momentinin ve açısal hızın

bilinmesi durumunda motor akımının belirlenmesidir. Bu çerçevede oluşturulan modeller sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4. 4 Elektriksel gücün ve buna karşılık gelen açısal hızın bilinmesi durumunda yük momentinin bulunması için oluşturulan model

Şekil 4.4’de gösterilen modelde iki adet giriş ve yukarıda verilen matematiksel denklemler kullanılarak elde edilen bir adet çıkış bulunmaktadır. Modelin amacı girişine uygulanan elektriksel güç ve açısal hıza karşılık gelen yük momentini belirlemektir. Böylece, gücü ve devri bilenen bir sisteme ne kadar yük momenti uygulandığı hesaplanabilmektedir.

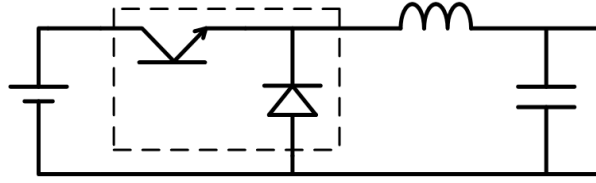


Şekil 4. 5 Yük momentinin bilinmesi durumunda motor akımının bulunması için oluşturulan model

Şekil 4.5'te verilen model ise, motorun açısal hızının ve motora uygulanan yük momentinin bilinmesi durumunda motor akımının ve geriliminin hesaplanabilmesi amacı ile oluşturulmuştur. Kalıcı mıknatıslı dc motorun MATLAB&Simulink® ortamında oluşturulan

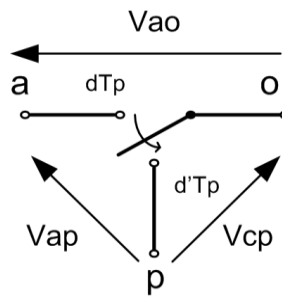


İlk olarak Şekil 4.7’de gösterilen düşürücü tip dönüştürücü ele alınmıştır. Kutu içine alınmış aktif ve pasif anahtar çifti detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 4. 7 Düşürücü tip dönüştürücü yapısı ve anahtar çifti

Yukarıda belirtilen üç uçlu anahtar dönüşümü Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Şekilde gösterilen a, o, p sırasıyla aktif, ortak, pasif uçları temsil etmektedir.



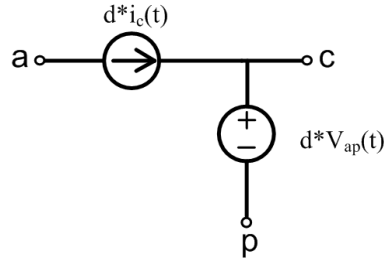
Şekil 4. 8 Üç uçlu anahtar gösterimi

Bu modelleme tekniğinde, aktif anahtar kontrollü akım kaynağı ile pasif anahtar ise kontrollü gerilim kaynağı ile modellenmektedir. Bu kaynakların değerlerini belirlemek için aktif anahtarın çalışma aralığı incelenmelidir.  $dT_p$  süresince aktif anahtar kapalı konuma gelir ve aktif uç ortak uca bağlanır.  $d'T_p$  ile gösterilen ve anahtarın kesimde olduğu aralıkta ise pasif uç ortak uca bağlanır. Bu bilgi ile ortalaması alınmış akım ve gerilim değerleri Çizelge 4.3 yardımı ile hesaplanabilir.

Çizelge 4. 3 PWM anahtarın terminal akım ve gerilim ifadeleri

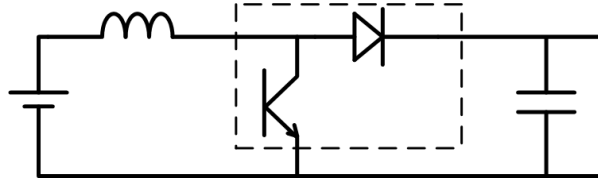
| $dTs$                 | $d'Ts$        |
|-----------------------|---------------|
| $i_a(t)=i_c(t)$       | $i_a(t)=0$    |
| $V_{cp}(t)=V_{ap}(t)$ | $V_{cp}(t)=0$ |

Modelleme sonucu oluşacak olan dalga şekilleri bir periyot süresince zamana göre ortalaması alınmış dalga şekilleridir. Şekil 4.9’da, modellenen düşürücü tip dönüştürücüdeki anahtar çiftinin son hali bağımlı kaynakların alması gereken değerler ile birlikte verilmiştir.



Şekil 4. 9 Zamana göre ortalaması alınmış PWM anahtar modeli

İkinci dönüştürücü yapısı olan yükseltici tip dönüştürücü Şekil 4.10'da gösterilmektedir.

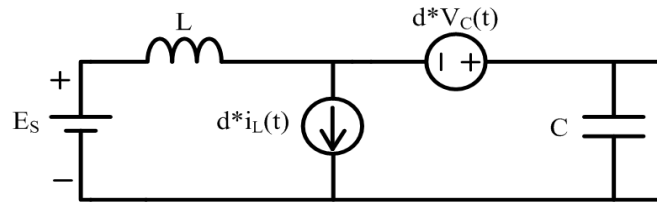


Şekil 4. 10 Yükseltici tip dönüştürücü yapısı ve anahtar çifti

Düşürücü tip dönüştürücüde olduğu gibi yukarıda gösterilen anahtar çifti PWM anahtar modeli ile değiştirilmiştir. Modeli tamamlamak için kontrollü kaynakların değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, aktif anahtarın anahtarlanma olayı incelenmiş ve bu değerlerin belirlenmesinde etkili olan  $dT_s$  (çok küçük) zaman aralığının sonuçları Çizelge 4.4'te verilmektedir.

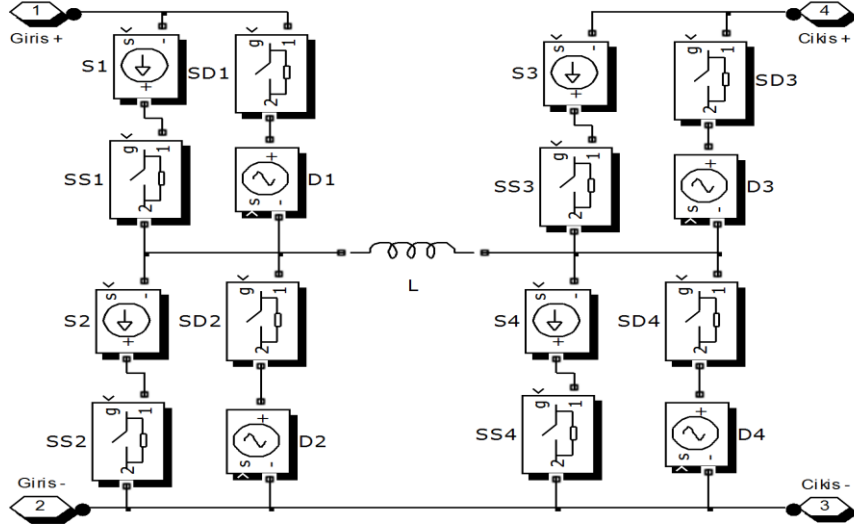
Çizelge 4. 4 PWM anahtarın terminal akım ve gerilim ifadeleri

| $dT_s$             |
|--------------------|
| $i_a(t)=i_L(t)$    |
| $V_{cp}(t)=V_o(t)$ |



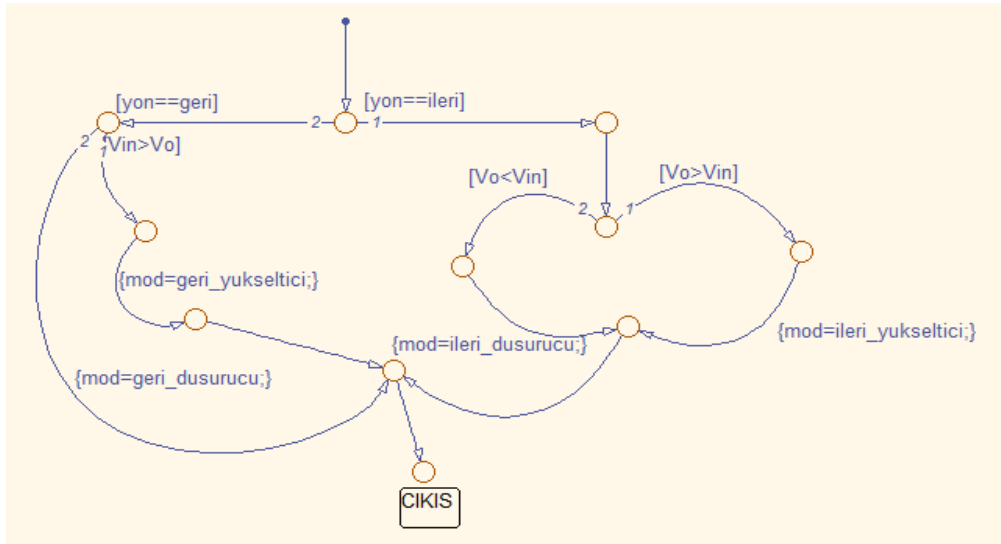
Şekil 4. 11 Yükseltici tip dönüştürücü için PWM anahtar modeli

Şekil 4.11'de yükseltici dönüştürücü için oluşturulmuş PWM anahtar modelinin son hali gösterilmektedir.



Şekil 4. 12 Kaskad topoloji PWM anahtar modeli

Kaskad topolojide bulunan 4 adet anahtar çifti, PWM anahtar modelleri ile değiştirilirse Şekil 4.12’de görülen model elde edilmektedir.  $SS_{1,2,3,4}$  olarak adlandırılan anahtarlar, ilgili kolun devreye alınmasını veya devreden çıkarılmasını sağlamaktadır. Modelde gözüken akım ve gerilim kontrollü kaynakların değerleri, yukarıda verilen düşürücü ve yükseltici tip dönüştürücüler için bulunan eşitliklerin kullanılmasıyla belirlenmiştir.

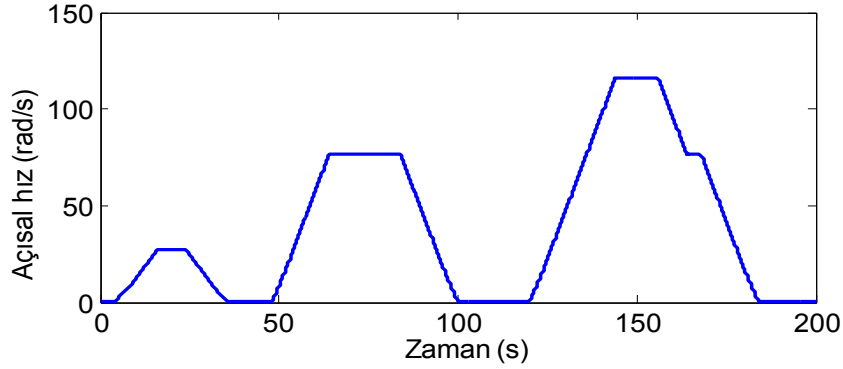


Şekil 4. 13 Mod seçimi için oluşturulan MATLAB&Stateflow şeması

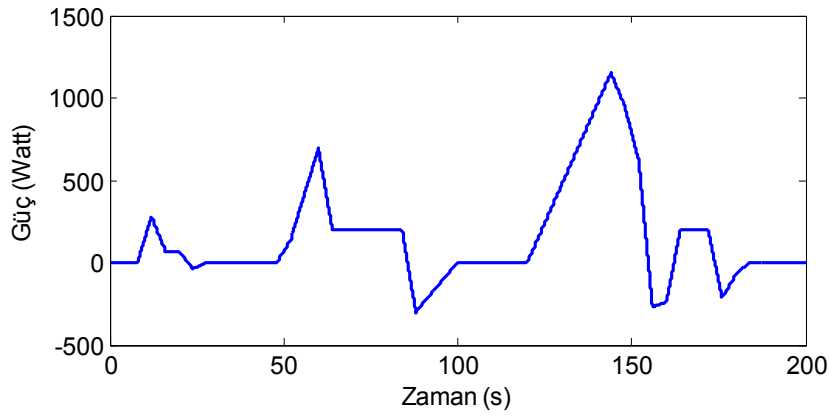
Modelin çalışmasında ilk önce dönüştürücünün hangi modda çalışacağına karar verilir. Bu işlem Şekil 4.13’te gösterilen ve MATLAB&Stateflow ortamında geliştirilen algoritma ile gerçekleştirilmiştir. Mod seçimi yapıldıktan sonra kontrolör tarafından tüm anahtarlara



Oluşturulan dc motor modelinde açısal hız bilgisinden yararlanıldığından birimi km/sa olarak verilen referans hız grafiği teker yarıçapı ( $r$ ) 0,45m alınarak açısal hıza çevrilmiştir. Sisteme uygulanan referans açısal hız grafiği Şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4. 16 ECE-15 sürüş çevriminin zamana bağlı açısal hız profili ( $r = 0,45m$ )



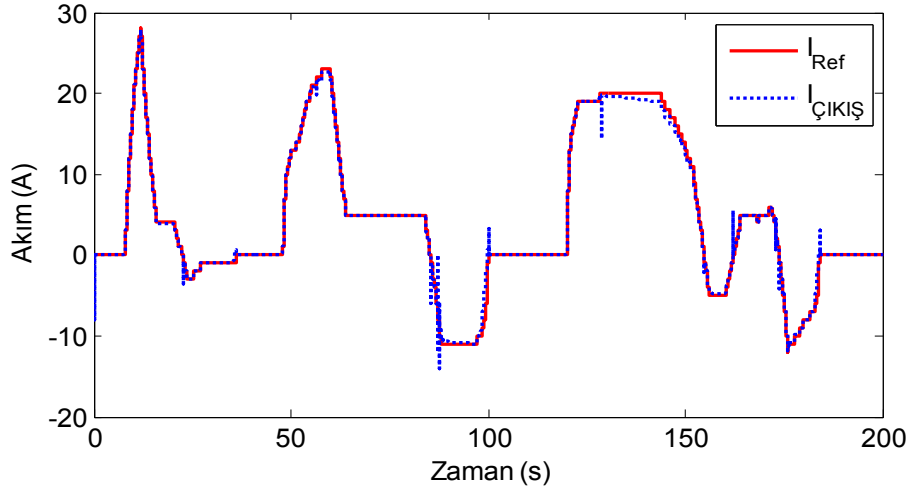
Şekil 4. 17 ECE-15 sürüş çevriminin zamana bağlı normalize edilmiş güç profili

Referans güç eğrisi olarak ECE-15 sürüş çevriminin güç değişimi alınmıştır. Ancak sistemde ana güç kaynağı olarak 500F'lık UK kullanıldığından, güç eğrisi 1/10 oranında normalize edilmiştir. Sisteme referans güç olarak uygulanan normalize edilmiş ECE-15 güç değişimi Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Bu güç değişimi, motor milinden elde edilmesi istenen mekaniksel gücü temsil etmektedir.

Referans güç değişimi kullanılarak motorun farklı devirlerde ürettiği ters emk gerilim değerleri ile motordan akması gereken akım değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan ters emk gerilimleri dc motorun elektriksel eşdeğer devresinde bulunan bağımlı gerilim kaynağına uygulanmıştır. Böylece herhangi bir “t” anında, referans verilen açısal hız ile orantılı olarak üretilen ters emk gerilimi elde edilebilmektedir. Elektriksel eşdeğer devrede ters emk gerilimi

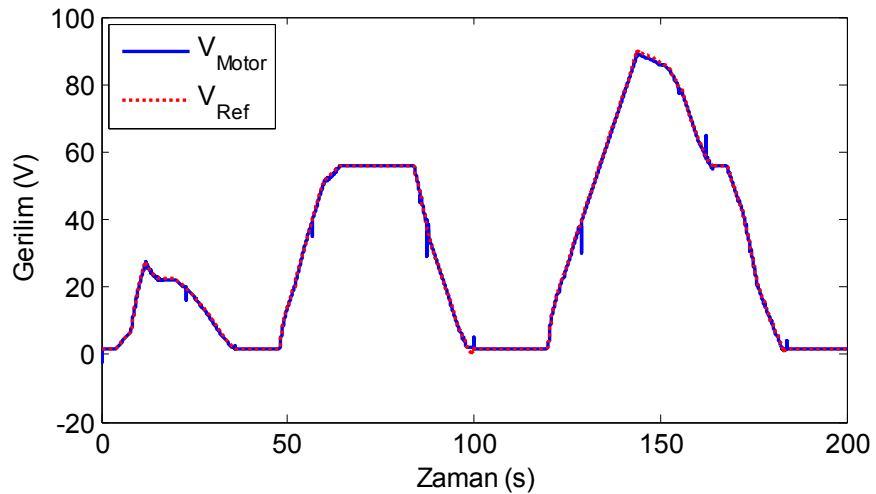
mevcut iken, matematiksel ifadeler sonucu hesaplanan motor akımının devre üzerinden geçmesi istenmektedir. Böylelikle istenen anlık mekaniksel güç sağlanabilmektedir.

Devre üzerinden istenen akımın geçebilmesi, önerilen kaskad topolojinin yapısı ve kontrolör ile ilgilidir. Burada PI kontrolör kullanılmış olup, motor akımının hesaplanan referans akım değerine yakınsaması hedeflenmiştir.



Şekil 4. 18 Dc motor akım değişimi ve referans akım eğrisi

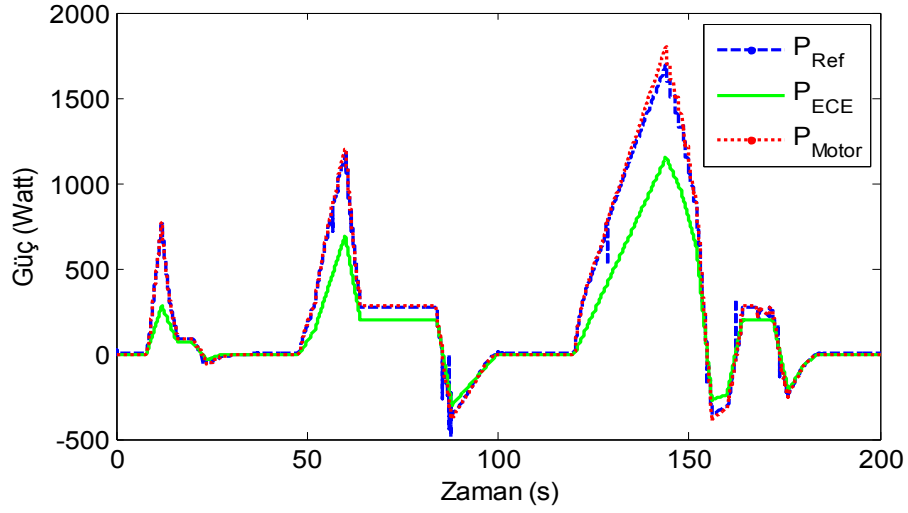
Benzetim çalışması sonucunda ölçülen motor akımı ve ilgili referans akım değeri Şekil 4.18'de verilmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi çıkış akımı referans akım değerini başarıyla takip etmiştir.



Şekil 4. 19 Dc motor gerilim değişimi ve referans gerilim eğrisi

Motor akımının istenen değerde tutulmasına takiben motor uçlarında oluşan gerilim Şekil 4.19’da gösterilmiştir.

Şekilden görüldüğü üzere motor uçlarındaki gerilim beklendiği gibi referans gerilim ile aynı değere sahiptir. Modlar arası geçişlerde akımda oluşan çentikler nedeniyle gerilimde de aynı zaman aralıklarında çentikler meydana gelmiştir.



Şekil 4. 20 Dc motor güç değişimi ve referans güç eğrisi

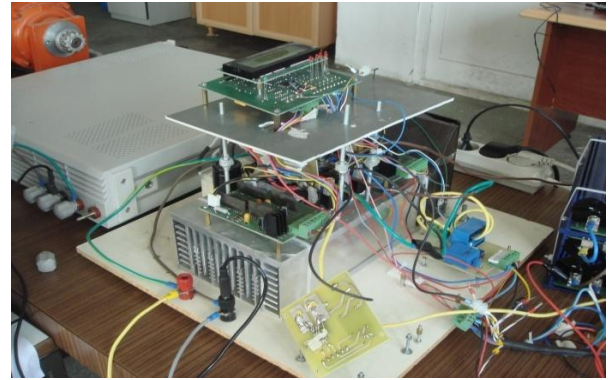
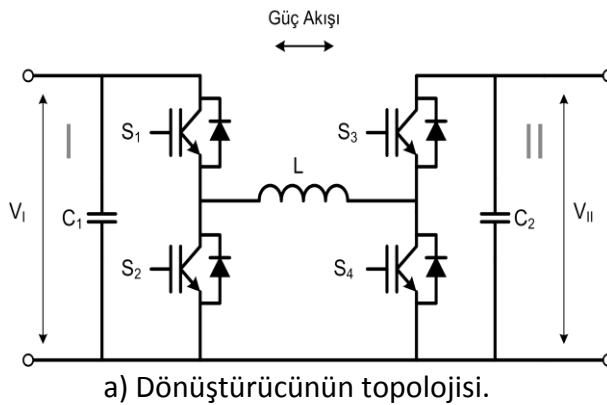
Motor uçlarında oluşan gerilim ile motor akımının çarpılması sonucu bulunan güç değeri Şekil 4.20’de verilmiştir. Beklendiği gibi sağlanan güç, referans güç eğrisini takip etmektedir. Dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta elde edilen güç değişimi referans güç değişimi ile örtüşmesine rağmen, normalize edilmiş ECE-15 güç değişimi ile örtüşmemektedir. Bunun nedeni daha önceden de belirtildiği gibi ECE-15 güç değişimi mekaniksel güç referansı olarak alınmasıdır. Sargılara uygulanan elektriksel gücün mekaniksel güce dönüşmesi esnasında oluşan kayıplar göz önüne alındığında, uygulanan elektriksel gücün daha büyük olması beklenmektedir. Şekilden de elektriksel gücün daha büyük olduğu görülmektedir. Aradaki fark ise sargılarda harcanan kayıpları göstermektedir.

Benzetim çalışmasında kalıcı mıknatıslı dc motor, kaskad dönüştürücünün dört çalışma modunda kullanarak referans hız değerinde başarıyla tutulmuştur. Benzetimden elde edilen sonuçlarla, kaskad dönüştürücünün yarım köprü dönüştürücüye göre daha iyi bir yük paylaşımı sağlayabileceği ve taşıtın çalışma koşullarına bağlı olarak frenleme enerjisini daha

iyi kazanabileceği öngörölmüştür. Dönüştürücü performanslarını karşılaştırmalı olarak irdelleyebilmek için bir sonraki bölümde dönüştürücüler deneysel olarak karşılaştırılmıştır.

## DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN DENEYSEL KARŞILAŞTIRILMASI

Önerilen kaskad topolojinin frenleme enerjisi kazanımında öngörülen üstün performansını doğrulamak amacıyla deneysel bir platform oluşturulmuş ve yarım köprü dönüştürücü ile karşılaştırılması yapılmıştır. Kaskad topolojinin yarım köprü topolojiyi yapısında barındırması nedeniyle deneysel çalışmalarda Şekil 5.1.b’de görülen kaskad yapıya sahip dönüştürücü prototipi kullanılmıştır. Yarım köprü topolojisi ile yapılacak olan deneyler esnasında, dönüştürücünün  $S_1$  anahtarı devamlı olarak iletimde,  $S_2$  ise devamlı olarak kesimde tutulur. Böylece, kaskad dönüştürücü gereken durumlarda yarım köprü dönüştürücü olarak çalıştırılabilmektedir.

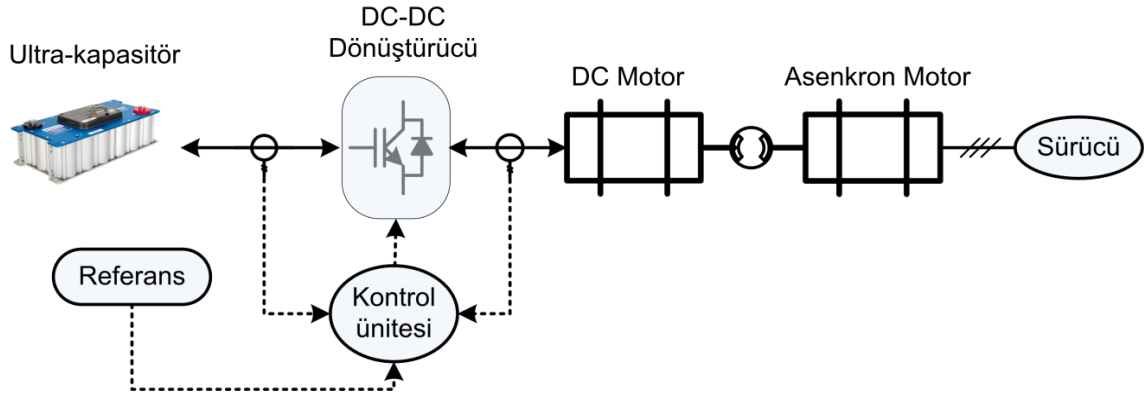


Şekil 5. 1 Deneysel çalışmalar için gerçekleştirilen deney seti

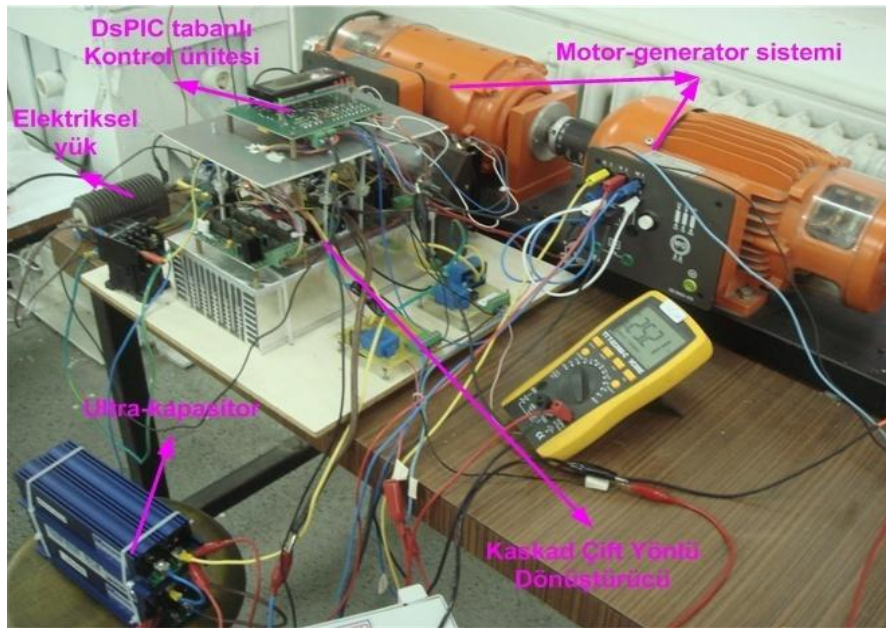
Tasarlanan dönüştürücüde  $1000 \mu F$ ,  $250 V$ ’luk filtre kondansatörleri ( $C_1$  ve  $C_2$ ) ve  $52 \mu H$ ,  $30 A$ ’lık endüktans kullanılmıştır. Dönüştürücüye ait kontrol, sürücü ve algılayıcı kartlarının açık devre şemaları sırasıyla, EK-A, EK-B ve EK-C’de verilmiştir.

### 5.1 Test Platformu ve Kontrol Algoritması

Deneysel çalışmanın yapıldığı test platformunun blok şeması Şekil 5.2’de gösterilmektedir. Burada kullanılan motor-generator sistemi ile yokuş aşağı inen bir taşıtın benzetimi gerçekleştirilmiştir. Dönüştürücülerin frenleme enerjisi kazanımlarındaki performanslarını görebilmek için sisteme dört farklı sürüş çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 5. 2 Hazırlanan test platformunun blok şeması



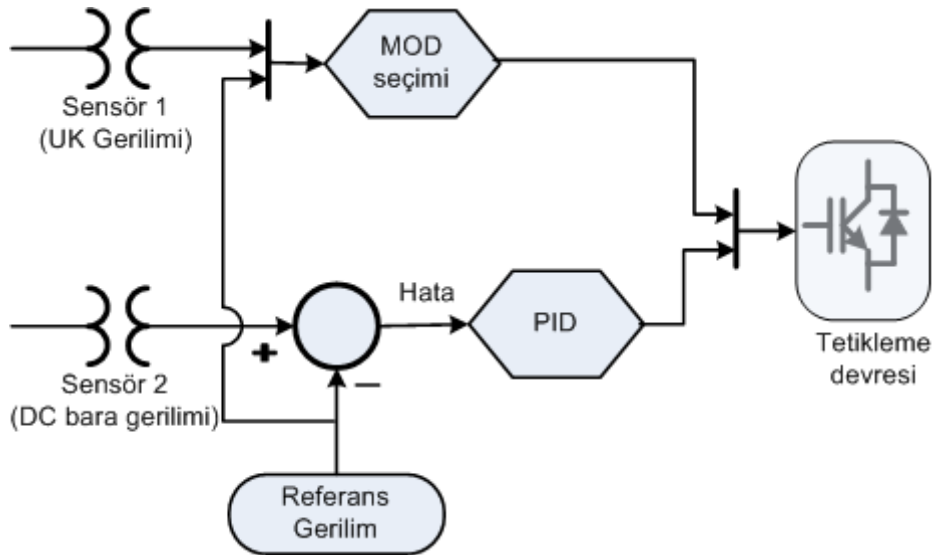
Şekil 5. 3 Deneysel çalışmalar için hazırlanan test platformu

Şekil 5.2’de gösterilen sistemde haricen sürülen asenkron motor yardımı ile taşıtın yokuş aşağı hareket etmesi esnasında oluşan ataletle eşdeğer bir atalet üretir. Asenkron motora mekanik milinden bağlı olan dc motor, taşıtın ana tahrik motorunu temsil etmektedir. Sürüş çevrimleri sırasında, asenkron motor tarafından tahrik edilen dc motor, generatör olarak çalışır ve sargılarında oluşan ters elektro-motor kuvvetine bağlı olarak dc gerilim üretir.

Motor uçlarında oluşan bu enerji, güç dönüştürücüsü üzerinden EDS'e aktarılır. Bu sayede taşıt enerji kazanarak faydalı frenleme yapar. Bu çalışmada EDS olarak, üç adet seri bağlı Maxwell Boostcap® BMOD0058 UK ünitesi kullanılmıştır (Şekil 5.3).

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü gibi sistemde, elektriksel yükü temsil eden bir de direnç bulunmaktadır. Bu yük, dönüştürücülerin bara gerilimi istenilen seviyeye indirilemediği anlarda devreye sokulur ve mekanik frenlemeyi temsil eder. Böyle bir durumun oluşması, dönüştürücülerin yapılarına, taşıtın çalışma koşullarına ve EDS'in anlık SOC'ine bağlıdır. Bahsi geçen durum oluştuğunda, elektriksel yük motor uçlarına röle üzerinden bağlanır. Böylelikle, motor uçlarındaki enerji elektriksel yük üzerinde harcanır ve motor hızı daha da düşürülebilir.

Her iki dönüştürücünün kontrolünde de aynı algoritma kullanılmıştır. Uygulanan kontrol algoritması, motor uçlarının bağlı olduğu dc bara geriliminin referans gerilimi takip etmesi üzerine kurulmuştur. Kontrolör olarak dsPIC 30F4011 mikro-denetleyicisi kullanılmıştır. Gerilim kontrolü için oluşturulan algoritma Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Kontrol için gerekli olan EDS ve dc bara gerilim bilgileri, gerilim algılayıcıları ile kontrolöre aktarılır. Sürüş çevrimine göre belirlenen referans gerilim değeri ile dc bara gerilimi arasındaki fark (hata), PI kontrolörün girişine uygulanır. PI çıkışı ise, gerekli kontrol sinyallerinin üretilmesinde kullanılır. Daha sonra, bu kontrol sinyalleri sürme devresi üzerinden, bara gerilimini istenilen seviyeye getirmek için güç anahtarlarına uygulanır.



Şekil 5. 4 Gerilim kontrolü için oluşturulan algoritma

Dönüştürücülerin çalışma modları tezin 3.3.1 ve 3.3.2 kısımlarında detaylı olarak anlatıldığı üzere, taşıtın çalışma anındaki EDS ve bara gerilimlerinin seviyelerine bağlıdır. Kontrolörün

bara gerilimini referans gerilim seviyesinde tutması istendiğinden, mod seçiminde bara gerilimi yerine referans gerilim kullanılmıştır. Çizelge 5.1’de EDS gerilimi ile referans gerilim arasındaki ilişkiye bağlı olarak dönüştürücülerin çalışma modları verilmiştir.

Çizelge 5. 1 EDS ve referans gerilim değerlerine bağlı olarak dönüştürücülerin çalışma modları

| Topolojiler                 | Çalışma yönü        | Eğer $V_{Ref} > V_{EDS}$ ise | Eğer $V_{Ref} < V_{EDS}$ ise |
|-----------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|
| <b>Yarım Köprü Topoloji</b> | İleri yönde çalışma | Yükseltici çalışma modu      | -                            |
|                             | Geri yönde çalışma  | Düşürücü çalışma modu        | -                            |
| <b>Kaskad Topoloji</b>      | İleri yönde çalışma | Yükseltici çalışma modu      | Düşürücü çalışma modu        |
|                             | Geri yönde çalışma  | Düşürücü çalışma modu        | Yükseltici çalışma modu      |

Yukarıdaki çizelgede verilen mod seçimi ve PI algoritmasına uygun olarak elde edilen kontrol sinyalleri dsPIC tabanlı kontrol ve sürücü devresi tarafından güç anahtarlarına uygulanmıştır. Kontrol algoritması için yazılan kod EK-D’de verilmiştir.

## 5.2 Deneysel Sonuçlar

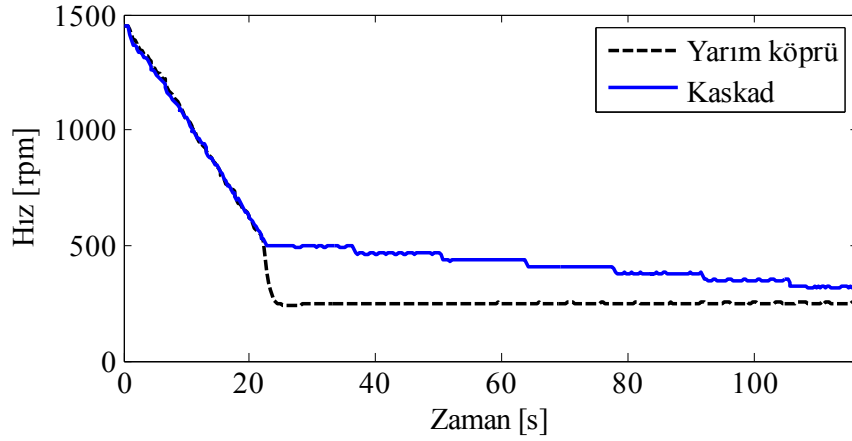
Bu bölümde gerçekleştirilen yarım köprü ve kaskad dönüştürücü prototiplerine farklı sürüş çevrimleri uygulanarak frenleme enerjisi kazanım performansları irdelenmiştir. Çalışmalarda EDS olarak UK kullanıldığından dolayı sürüş çevrimleri sonunda kazanılan enerjiler (4.1) ile hesaplanmıştır.

$$E_{UC} = \frac{1}{2} C (V_f^2 - V_i^2) \quad (5.1)$$

Eşitlikte bulunan  $E_{UC}$ ,  $C$ ,  $V_f$  ve  $V_i$  sembolleri sırasıyla UK ünitesinin kazandığı enerji, kapasitesi, sahip olduğu son gerilim değeri ve başlangıç gerilim değerini göstermektedir.

### 5.2.1 Yumuşak ve Sert Frenleme Testi

Her iki dönüştürücünün de frenleme enerjisi kazanımında sergiledikleri performansı görebilmek için uygulanan bu ilk test süresince yokuş aşağı inen bir taşıta hem yumuşak hem de sert frenlemeyi içerisinde barındıran bir sürüş çevrimi uygulanmıştır. Kullanılan dönüştürücülere bağlı olarak dc motor hız değişimi Şekil 5.5'te görülmektedir.

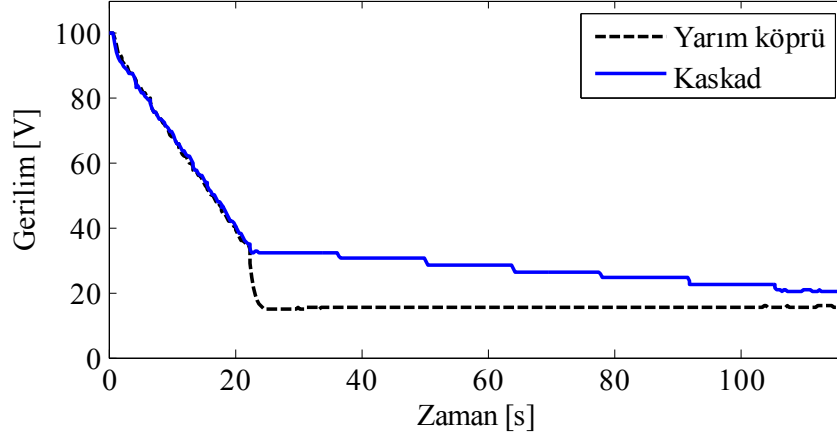


Şekil 5. 5 Yumuşak ve sert frenleme durumunda dc motor hız değişimi

Şekil 5.5'ün ilk 22 saniyelik kısmı sert frenlemeyi temsil ederken, sürüş çevriminin kalan kısmı yumuşak frenlemeyi temsil etmektedir. Böyle bir testin uygulanma amacı, dönüştürücülerin dinamik durumlarda gösterdikleri performansı analiz etmektir. Şekil 5.5'ten görüldüğü gibi, belirli bir devire kadar her iki dönüştürücü de düşürücü modda çalışarak aynı performansı sergilemektedirler. Bu benzerliğin nedeni, her iki dönüştürücüde de aynı eleman değerleri ve aynı kontrol yönteminin kullanılmasıdır.

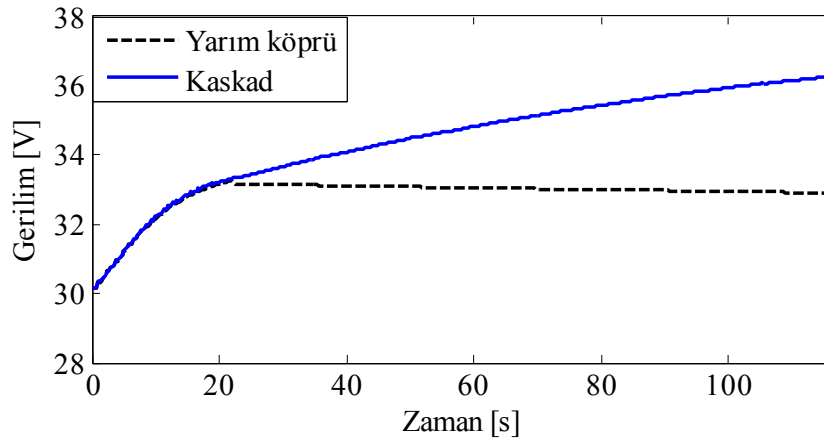
Daha önce bölüm 3.3.1'de ayrıntılı olarak belirtildiği gibi yarım köprü dönüştürücü, güç akışı motordan UK ünitesine doğru olduğu durumlarda (fren çalışma durumunda) yapısından dolayı yükseltici olarak çalışmamaktadır. Bu nedenle, yarım köprü dönüştürücünün UK ve bara gerilimlerine bağlı olarak belirli bir andan sonra frenleme enerjisini kazanarak motor hızını düşüremeyeceği daha önceden öngörülmüştü. Bu öngörü yarım köprü dönüştürücünün yaklaşık 22. Saniyeden sonra dc motor hızını istenilen hız seviyesine indirememesi ile doğrulanmaktadır. Dönüştürücülerin hızı istenilen seviyeye düşüremedikleri zaman aralıklarında, hızı daha da düşürmek için motor uçlarına elektriksel yük bağlanmıştır. Ayrıca burada düşürülen hız seviyesi, seçilen sabit rezistif yüke bağlıdır. Diğer taraftan, kaskad

dönüştürücü ise hem yumuşak frenleme hem de sert frenleme durumlarında, motor hızını istenilen seviyeye indirmeyi başarmıştır.



Şekil 5. 6 Yumuşak ve sert frenleme durumunda dc motor uç gerilim değişimi

Dönüştürücülerin çalışması esnasında zamana bağlı olarak motor uçlarında oluşan gerilim Şekil 5.6'da verilmiştir. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 incelendiğinde, motor uç geriliminin motor hızıyla orantılı olduğu açıkça görülmektedir. Kontrolöre verilen referans gerilim değeri aynı zamanda bir hız değerine karşılık geldiğinden, oluşturulan sistem bir anlamda hız kontrollü çalışmaktadır. Bu nedenle, diğer deneysel sonuçlarda motor uç gerilim değişimi verilmemiştir.



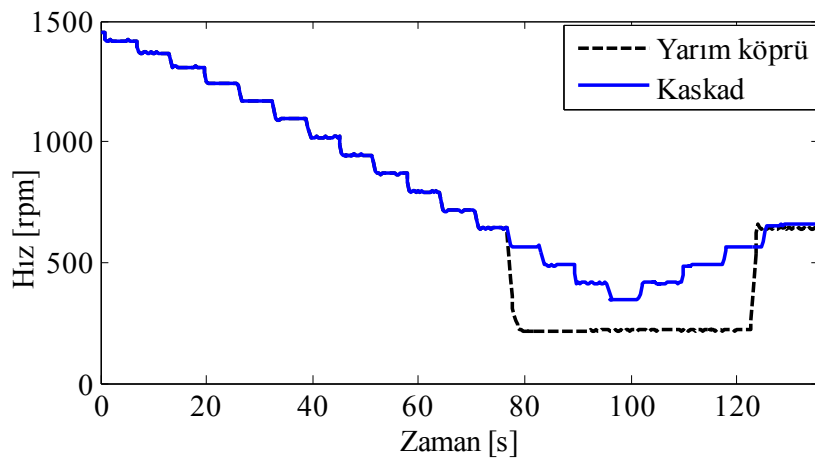
Şekil 5. 7 Yumuşak ve sert frenleme durumunda UK gerilim değişimi

Depolanan enerjiden dolayı UK geriliminde oluşan değişim Şekil 5.7'te gösterilmektedir. Açıkça görüldüğü üzere, kaskad dönüştürücü yarım köprü dönüştürücüye oranla UK'de daha fazla enerji depolanmasını sağlamıştır. (5.1)'i kullanarak enerji kazanımları hesaplandığında, önerilen kaskad topolojinin 3950 joule (J), yarım köprü topolojinin ise 1676 J enerji kazanımı

sağladığı görülmektedir. Bu test için kıyaslama yapıldığında önerilen topoloji geleneksel topolojiye göre %135 daha fazla enerji kazanmıştır.

### 5.2.2 Kademeli Frenleme Testi

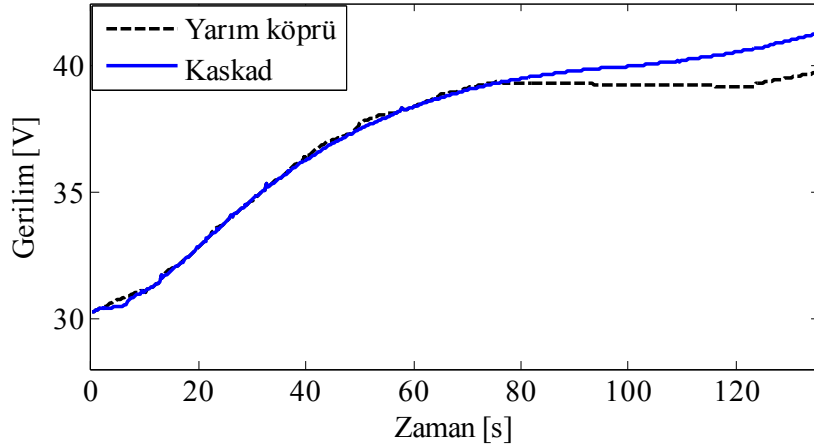
Kademeli frenleme testinde dönüştürücülerin performansını analiz etmek amacıyla yine yokuş aşağı inen bir taşıtın kademeli olarak fren yapması durumu göz önüne alınmıştır. Her iki topoloji için motor hız değişimi ve UK gerilim değişimi sırasıyla Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da verilmektedir.



Şekil 5. 8 Kademeli frenleme durumunda dc motor hız değişimi

Şekil 5.8’de görüldüğü gibi yarım köprü dönüştürücünün hızı daha da düşürmekte yetersiz kaldığı 80. ve 120. saniyeler arasında elektriksel yük devreye girmiştir. Grafiklerden kaskad topolojinin beklendiği gibi hem istenilen hız değerini sağladığı hem de frenleme enerjisi kazanımı bakımından daha üstün bir performans ortaya koyduğu açıkça görülmektedir. Önerilen topoloji ile motor hızı ve buna bağlı olarak bara gerilimi istenilen seviyeye indirebilmekte ve daha fazla enerji kazanımı sağlanmaktadır. Depolanan bu enerji, hibrit sistemlerde sistemin genel verimliliğini önemli ölçüde artıracaktır.

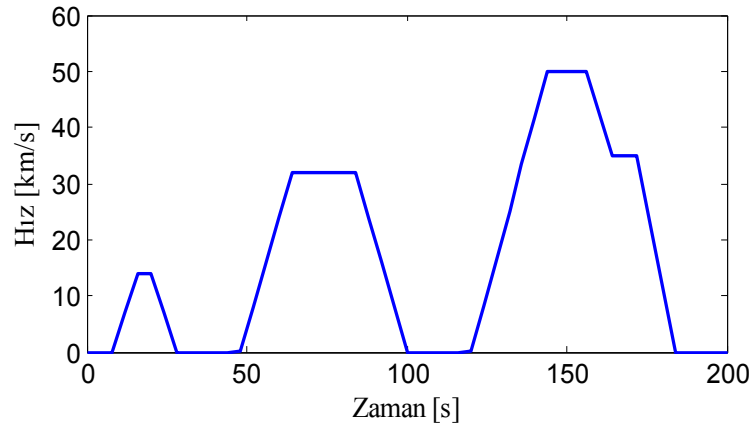
Bu deneyin sonuçları da kaskad topolojinin frenleme enerjisi kazanımındaki üstünlüğünü göstermektedir. Depolanan enerjilere bakıldığında; kaskad topoloji kullanıldığında 7613 J, yarım köprü topoloji kullanıldığında ise 6284 J depolandığını görmekteyiz. Bu, depolanan enerjide %21’lik bir artış sağladığı anlamına gelmektedir.



Şekil 5. 9 Kademeli frenleme durumunda UK gerilim değişimi

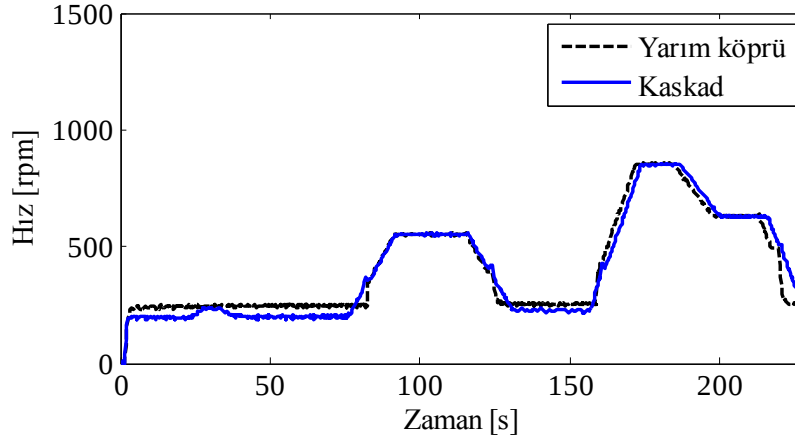
### 5.2.3 Normalize Edilmiş ECE-15 Sürüş Çevrimi ile Yapılan Test

Yapılan son deneyde Şekil 5.10'da gösterilen ECE-15 sürüş çevriminin hız değişimi referans alınmıştır. Bu değişim, mevcut motor-generatör sistemi göz önüne alınarak motor devri şeklinde normalize edilip uygulanmıştır.

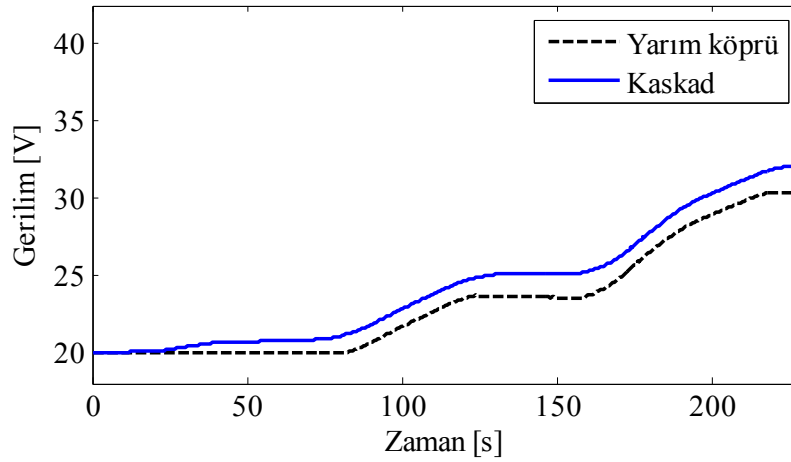


Şekil 5. 10 ECE-15 sürüş çevriminin zamana bağlı hız profili

Deneye ilişkin hız ve UK gerilim değişimleri sırasıyla Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de verilmektedir. Bu sürüş çevrimi süresince kaskad ve yarım köprü topolojilerin depoladıkları enerji miktarları sırasıyla 6163 J ve 4997 J'dür. Dönüştürücülere referans olarak ECE-15 sürüş çevrimi uygulandığında kaskad topolojinin yarım köprü topolojiye kıyasla %23 daha fazla enerji depoladığı görülmüştür. Gerçek verilere dayalı olan ECE-15 sürüş çevriminde de önerilen topolojinin çok daha iyi sonuç verdiği açıkça görülmektedir.



Şekil 5.11 ECE-15 sürüş çevrimi esnasında motor hızı değişimi



Şekil 5.12 ECE-15 sürüş çevrimi esnasında UK gerilim değişimi

Ancak referans alınan sürüş çevrimi (Şekil 5.10) ile dönüştürücü performansları (Şekil 5.11) dikkate alındığında, kaskad dönüştürücünün de bazı durumlarda frenleme enerjisini kazanmada yetersiz kaldığı görülmektedir. Bunun nedeni, dönüştürücü tasarlanırken seçilen giriş ve çıkış gerilimleri arasındaki orandır. Bu oran, dönüştürücünün tasarım aşamasında 0.5 olarak seçilmiştir. Yani, giriş gerilimi çıkış geriliminin iki katını geçtiği durumlarda dönüştürücü girişe enerji aktaramaz. Bu sebeple, kaskad dönüştürücü bara gerilimi ve buna bağlı olarak motor hızını daha düşük seviyelere indiremez. Bu oranı yükseltmek, tasarlanan dönüştürücünün kesintili modda çalışmasına yol açar. Kesintisiz modda çalışmak ve aynı zamanda bu oranı yükseltmek için ise, dönüştürücü endüktansı daha büyük seçilmelidir.

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrikli taşıtlarda kullanılan dc-dc güç dönüştürücüsü yük paylaşımı, frenleme enerjisinin kazanımı ve dolayısıyla sistem performansı hususlarında büyük rol oynamaktadır. Burada kullanılacak dönüştürücünün iyi bir performans sergilemesinin yanında ucuz ve basit bir yapıya sahip olması istenir. Bu nedenle literatürde daha çok yarım köprü güç dönüştürücüsü tercih edilmektedir. Bu çalışmada ise, yarım köprü dönüştürücünün avantajlarına sahip olan ve çift yönlü düşürücü-yükseltici olarak çalışabilen kaskad dönüştürücü topolojisinin kullanımı önerilmiştir.

Öncelikli olarak kaskad dönüştürücünün zamana göre ortalaması alınmış PWM anahtar modeli oluşturulmuştur. Modelin çalışmasını test edebilmek için giriş tarafında bir UK, çıkış tarafında ise bir kalıcı mıknatıslı dc motor bulunan sistemin benzetimi yapılmıştır. Benzetim çalışmaları sürecinde, her alt sistem için dinamik bir model oluşturulmuş ve nihai olarak sistem entegrasyonu sağlanmıştır. Alt bileşenlerden biri olan UK modeli oluşturulurken klasik RC modelden daha iyi sonuç veren RLC eşdeğer devresinden, diğer bir alt bileşen olan kalıcı mıknatıslı motor modelinde ise elektriksel eşdeğer devresinden yararlanılmıştır. Sürüş çevrimi olarak normalize edilmiş ECE-15 sürüş çevrimi kullanılmıştır. Önerilen kaskad topoloji referans akım değerini ve dolayısıyla referans güç değerini başarıyla takip etmiştir.

Benzetim çalışmasında başarılı sonuçların elde edilmesinin ardından, önerilen kaskad topolojinin faydalı frenleme çalışma anlarında geleneksel yarım köprü dönüştürücüye oranla daha başarılı bir performans sergileyeceği öngörülmüş ve iki topolojinin deneysel karşılaştırmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmada dönüştürücü performanslarını farklı frenleme koşullarında kıyaslayabilmek amacı ile yumuşak, sert, kademeli frenleme profilleri ve ECE-15 sürüş çevriminin sisteme normalize edilmiş hız profili ayrı testlerde referans alınmıştır.

Deneyisel alışmalar sonucunda UK'da depolanan enerjiye bakıldığında, kaskad dönüştürücünün çok daha başarılı bir şekilde frenleme enerjisini kazandığı görülmektedir. Kaskad topolojinin kullanılması ile yarım-köprü topolojiye göre enerji kazanımlarında; yumuşak ve sert frenleme çevriminde %135, kademeli frenleme çevriminde %21, normalize edilmiş ECE-15 çevriminde ise %23'lük artış sağlanmıştır. Ayrıca, deneyisel sonuçlar incelendiğinde geleneksel topolojinin faydalı frenleme yaparak motor devrini daha düşük seviyelere indirmekte yetersiz kaldığı açıkça görülmektedir. Diğer yandan önerilen kaskad topoloji bu bağlamda çok daha iyi sonuçlar sunmaktadır. Buna ek olarak, topolojinin her iki yönde de başarılı bir şekilde düşürücü ve yükseltici çalışabilmesi yk paylaşımının kritik öneme sahip olduğu hibrit sistemlerde de rahatça kullanılabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, yarım köprü dönüştürücünün yaygın kullanımına karşın önerilen kaskad topoloji, sağladığı birçok avantaj sayesinde elektrikli taşıtlarda tercih edilebilir bir performans sergilemiştir.

- [1] Powers, W.F. ve Nicastrì P.R., (2000), "Automotive Vehicle Control Challenges in the 21st Century", *Control Eng. Practice*, 8(6):605–618.
- [2] Emadi, A., Rajashekara, K., Williamson, S.S. ve Lukic, S.M., (2005), "Topological Overview of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations", *IEEE Trans Vehicular Technology*, 54(3):763–770.
- [3] Gao, D., Jin, Z. ve Lu, Q., (2008), "Energy Management Strategy Based on Fuzzy Logic for a Fuel Cell Hybrid Bus", *Journal of Power Sources*, 185(1):311-317.
- [4] Erdinc, O., Vural, B., Uzunoglu, M. ve Ates, Y., (2009), "Modeling and Analysis of an FC/UC Hybrid Vehicular Power System Using a Wavelet-Fuzzy Logic Based Load Sharing and Control Algorithm", *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 34(12):5223-5233.
- [5] Campanari, S., Manzolini, G. ve Garcia de la Iglesia, F., (2009), "Energy Analysis of Electric Vehicles Using Batteries or Fuel-Cells Through Well-to-Wheel Driving Cycle Simulations", *Journal of Power Sources*, 186(2):464-477.
- [6] Rodatz, P., Paganelli, G., Sciarretta, A. ve Guzzella, L., (2005), "Optimal Power Management of an Experimental Fuel Cell/Supercapacitor-Powered Hybrid Vehicle", *Control Engineering Practice*, 13(1):41-53.
- [7] Paladini, V., Donato, T., Risi, A. D. ve Laforgia, D., (2007), "Super-capacitors Fuel-cell Hybrid Electric Vehicle Optimization and Control Strategy Development", *Energy Conversion and Management*, 48(11):3001-3008.
- [8] Marie-Francoise, J.N., Gualous, H., Outbib, R. ve Berthon, A., (2005), "42 V Power Net with Supercapacitor and Battery for Automotive Applications", *Journal of Power Sources*, 143(1-2):275-283.
- [9] Thounthong, P., Raël, S. ve Davat, B., (2006), "Control Strategy of Fuel Cell/Supercapacitors Hybrid Power Sources for Electric Vehicle", *Journal of Power Sources*, 158(1):806-814.
- [10] Erdinc, O., Vural, B. ve Uzunoglu, M., (2009), "A Wavelet-Fuzzy Logic Based Energy Management Strategy for a Fuel-cell/Battery/Ultra-capacitor Hybrid Vehicular Power System", *Journal of Power Sources*, 194(1):369-380.
- [11] Ates, Y., Erdinc, O., Uzunoglu, M. ve Vural, B., (2010), "Energy Management of an FC/UC Hybrid Vehicular Power System Using a Combined Neural Network-Wavelet Transform Based Strategy", *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 35(2):774-783.

- [12] Camara, M. B., Gualous, H., Gustin, F., Berthon, A. ve Dakyo, B., (2010), "DC/DC Converter Design for Supercapacitor and Battery Power Management in Hybrid Vehicle Applications-Polynomial Control Strategy", IEEE Trans Industrial Electronics, 57(2):587-597.
- [13] Dixon, J., Nakashima, I., Arcos, E. F. ve Ortuzar, M., (2010), "Electric Vehicle Using a Combination of Ultracapacitors and ZEBRA Battery", IEEE Trans Industrial Electronics, 57(3):943-949.
- [14] Hajizadeh, A. ve Golkar, M. A., (2010), "Control of Hybrid Fuel Cell/Energy Storage Distributed Generation System Against Voltage Sag", Electrical Power and Energy Systems, 32:488-497.
- [15] Larminie, J. ve Lowry, J., (2003), Electric Vehicle Tecnology Explained, John Wiley&Sons, West Sussex, England.
- [16] Chau, K. T. ve Wong, Y. S., (2002), "Overview of Power Management in Hybrid Electric Vehicles", Energy Conversion and Management, 43(15):1953-1968.
- [17] Wouk, V., (1995), "Hybrids: Then and Now," IEEE Spectrum, 32(7):16–21.
- [18] Wyczalek, F. A., (2000), "Hybrid Electric Vehicles—Year 2000", in Proc. 35th IEEE Intersoc. Energy Conv. Eng. Conf., Jul. 2000, Las Vegas, NV, 1:349–355.
- [19] Albert, I. J., Kahrimanovic, E. ve Emadi, A., (2004), "Diesel Sport Utility Vehicles with Hybrid Electric Drive Trains", IEEE Trans. Veh. Technol., 53(4):1247–1256.
- [20] Sciarretta, A., Back, M. ve Guzzella, L., (2004), "Optimal Control of Paralel Hybrid Electric Vehicles", IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., 12(3):352–363.
- [21] Kalan, B. A., Lovatt, H. C., Brothers, M. ve Buriak, V., (2002), "System Design and Development of Hybrid Electric Vehicles", in Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., 2002, Australia, 2:768–772.
- [22] Welchko, B. A. ve Nagashima, J. M., (2003), "The Influence of Topology Selection on the Design of EV/HEV Propulsion Systems," IEEE Power Electronics, 1(2):36–40.
- [23] Gale, A. R. ve Degner, M. W., (2002), "Voltage Trade-off Evaluation for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications", in Proc. IEEE Workshop Power Electron. Transport.", Oct. 2002, Auburn Hills, 11–15.
- [24] Lin, C. C., Peng, H., Grizzle, J. W. ve Kang, J. M., (2003), "Power Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Truck," IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., 11(6):839–849.
- [25] Delprat, S., Lauber, J., Guerra, T. M. ve Rimaux, J., (2004), "Control of a Paralel Hybrid Power Train: Optimal Control", IEEE Trans Vehicular Technology, 53(3):872–881.
- [26] Yimin, G., Liping, C. ve Mehrdad, E., (1999), "Investigation Of The Effectiveness Of Regenerative Braking For EV And HEV", SAE International SP-1466, Paper No.1999-01-2910
- [27] Siemens, Enerji Verimliliği ve Çevreye Duyarlılık, [http://www.siemens.com.tr/i/Assets/Enerji/EnerjiVerimliliği/Siemens Enerji Verimliliği ve Çevreye Duyarlilik.pdf](http://www.siemens.com.tr/i/Assets/Enerji/EnerjiVerimliliği/Siemens_Enerji_Verimliliği_ve_Cevreye_Duyarlilik.pdf), (2009).

- [28] Douglas, H. ve Pillay, P., (2005), "Sizing Ultracapacitors for Hybrid Electric Vehicles", Industrial Electronics Society 31st Annual Conference of IEEE (IECON 2005), 6-10 Nov.2005, 1599-1604.
- [29] Gemici, S.S., (2006), "Elektrikli Ulaşım Sistemlerinde Enerji Depolama Yöntemlerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [30] Burke, A., (2009), "Performance Testing of Lithium-ion Batteries of Various Chemistries for EV and PHEV Applications", ZEV Symposium, Sept. 22, 2009.
- [31] Tırıs, M., (2003), "Elektrikli Araçlar", TÜBİTAK-MAM Yayını, Kocaeli.
- [32] Atabay, M., (2006), "Lityum-iyon Bataryaların Fotovoltaik Sistemlerde Uygulanabilirliğinin Diğer Batarya Tipleri ile Karşılaştırılmalı Olarak Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [33] Chu, A. ve Braatz P., (2002), "Comparison of Commercial Supercapacitors and High Power Lithium-ion Batteries for Power-assist Applications in Hybrid Electric Vehicles: I. Initial Characterization", Journal of Power Sources, 112(24):236-246.
- [34] Schindall, J., (2007), "The Charge of the Ultracapacitors", IEEE Spectrum 44(11): 42-46.
- [35] Brandhorst, H.W. Jr. ve Zheng, C., (2001), "Achieving a High Pulse Power System Through Engineering the Battery-capacitor Combination", Applications and Advances, The Sixteenth Annual Battery Conference, 2001, 153-156.
- [36] Faggiolia, E., Renaa, P., Danell, V., Andrieu, X., Mallant, R. ve Kahlen, H., (1999), "Supercapacitors for the Energy Management of Electric Vehicles", Journal of Power Sources, 84(2):261-269.
- [37] Miller, J.R., Capacitor Energy Storage for Stationary-Power Applications, <http://www.battcon.com/PapersFinal2004/MillerPaper2004.pdf>, (2011).
- [38] Bullard, G.L., Lee, H.L. ve Morris, J.L., (1989), "Operating Principles of the Ultracapacitor", IEEE Transactions on Magnetics, 25(1):102-106.
- [39] Maxwell Technologies, UltraCapacitor Product Guide, [http://www.maxwell.com/ultracapacitors/manuals/ultracap\\_product\\_guide.pdf](http://www.maxwell.com/ultracapacitors/manuals/ultracap_product_guide.pdf), (2006).
- [40] Mierlo, J. V., Maggetto, G. ve Lataire, P., (2006), "Which Energy Source for Road Transport in the Future? A Comparison of Battery, Hybrid and Fuel Cell Vehicles", Energy Conversion and Management, 47(17):2748-2760.
- [41] Emadi, A., Williamson, S. S. ve Khaligh, A., (2006), "Power Electronics Intensive Solutions for Advanced Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicular Power Systems", IEEE Trans Power Electronics, 21(3):567-577.
- [42] Matsuo, H., Wenzhong, L., Kurokawa, F., Shigemizu, T. ve Watanabe, N., (2004), "Characteristics of the Multiple-Input DC-DC Converter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 51(3):625-631.
- [43] Ozpineci, B., Tolbert, L.M. ve Zhong, D., (2004), "Multiple Input Converters for Fuel Cells", IEEE Industry Applications Conference 39th IAS Annual Meeting, 3-7 Oct. 2004, 2:791-797.

- [44] Yalamanchili, K.P., Ferdowsi, M. ve Corzine, K., (2006), "New Double Input DC-DC Converters for Automotive Applications", Vehicle Power and Propulsion Conference VPPC '06 IEEE, 6-8 Sept. 2006, 1-6.
- [45] Tao, H., Kotsopoulos, A., Duarte, J.L. ve Hendrix M.A.M., (2005), "Multi-Input Bidirectional DC-DC Converter Combining DC-Link and Magnetic-Coupling for Fuel Cell Systems", Industry Applications Conference, 2-6 Oct. 2005, 3:2021-2028.
- [46] Tao, H., Duarte, J. L. ve Hendrix, M. A. M., (2006), "Novel Zero-Voltage Switching Control Methods for a Multiple-Input Converter Interfacing a Fuel Cell and Supercapacitor", IEEE Conference on Industrial Electronics IECON 2006, Nov. 2006, 2341-2346.
- [47] Yaow-Ming, C., Yuan-Chuan, L. ve Feng-Yu, W., (2002) "Multi-Input DC/DC Converter Based on the Multi-Winding Transformer for Renewable Energy Applications", IEEE Trans Industry Applications, 38(4):1096 – 1104.
- [48] Huang-Jen, C., Hsiu-Ming, H., Li-Wei, L. ve Ming-Hsiang, T., (2005), "A Multiple-Input DC/DC Converter for Renewable Energy Systems", IEEE International Conference on Industrial Technology ICIT 2005, 14-17 Dec. 2005, 1304-1308.
- [49] Liu, H., Mao, C., Lu J. ve Wang, D., (2009), "Electronic Power Transformer with Supercapacitors Storage Energy System", Electric Power Systems Research, 79(8):1200-1208.
- [50] Di Napoli, A., Crescimbeni, F., Rodo, S. ve Solero, L., (2002), "Multiple Input DC-DC Power Converter for Fuel-Cell Powered Hybrid Vehicles", IEEE Power Electronics Specialists Conference Pesc 02, 23-27 June 2002, 4:1685-1690.
- [51] Di Napoli, A., Crescimbeni, F., Solero, L., Caricchi, F. ve Capponi F.G., (2002), "Multiple-Input DC-DC Power Converter for Power-Flow Management in Hybrid Vehicles", Industry Applications Conference, 13-18 Oct. 2002, 3:1578-1585.
- [52] Solero, L., Lidozzi, A. ve Pomilio, J.A., (2005), "Design of Multiple-Input Power Converter for Hybrid Vehicles", IEEE Transactions on Power Electronics, 20(5):1007-1016.
- [53] Marchesoni, M. ve Vacca, C., (2007), "New DC–DC Converter for Energy Storage System Interfacing in Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles", IEEE Trans Power Electronics, 22(1):301-308.
- [54] Farzanehfard, H., Beyragh, D.S. ve Adib, E., (2008), "A Bidirectional Soft Switched Ultracapacitor Interface Circuit for Hybrid Electric Vehicles", Energy Conversion and Management, 49(12):3578-3584.
- [55] Kirubakaran, A., Shailendra J. ve Nema R.K., (2009), "A Review on Fuel Cell Technologies and Power Electronic Interface", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(9):2430-2440.
- [56] Tolbert, L.M., Peterson, W.A., White, C.P., Theiss, T.J. ve Scudiere, M.B., (2002), "A Bi-directional DC-DC Converter with Minimum Energy Storage Elements", Industry Applications Conference 37th IAS Annual Meeting, 13-18 Oct. 2002, 3:1572-1577.
- [57] Peng, F.Z., Hui, L., Gui-Jia, S. ve Lawler, J.S., (2004) "A New ZVS Bidirectional DC-DC

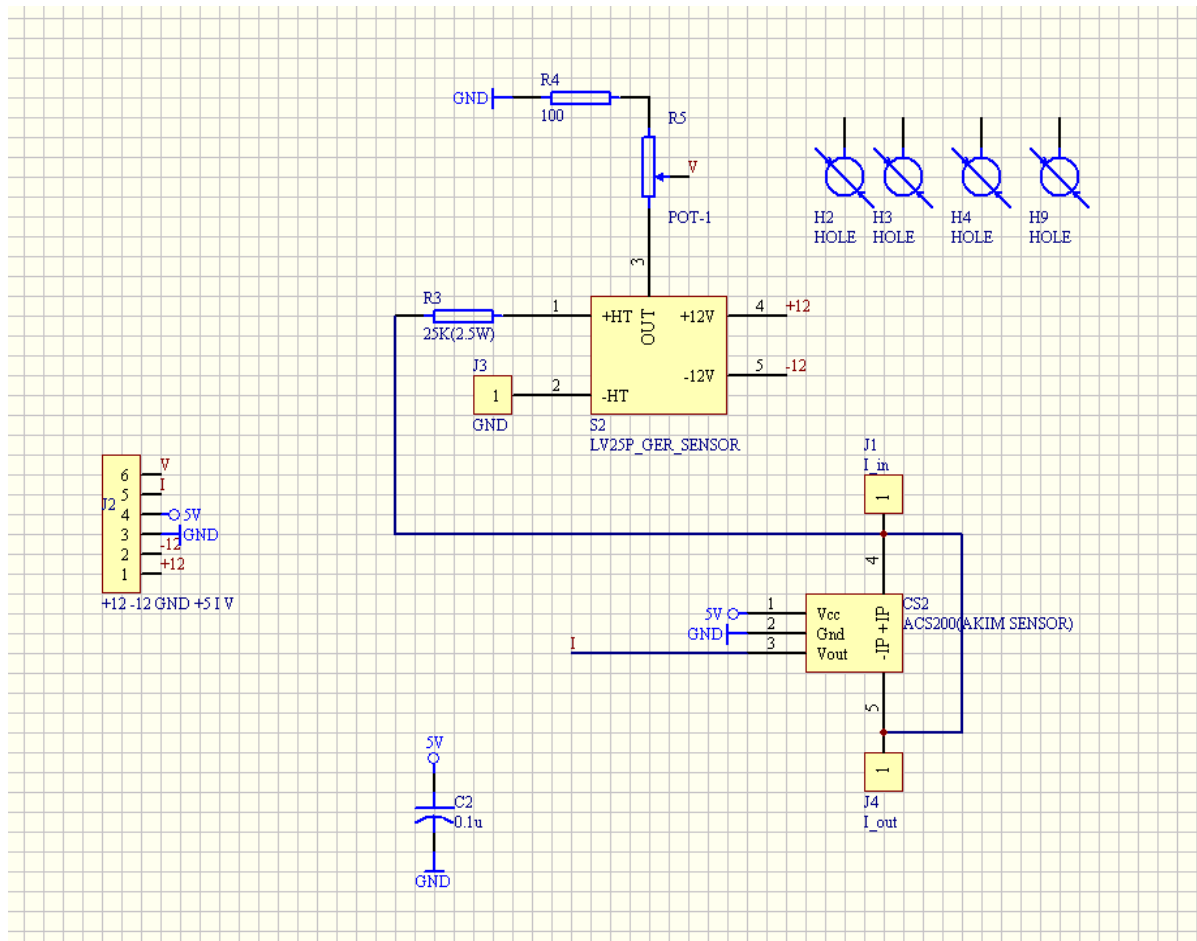
Converter for Fuel Cell and Battery Application”, IEEE Transactions on Power Electronics, 19(1):54-65.

- [58] Cacciato, M., Caricchi, F., Giuhlii, F. ve Santini, E., (2004), “A Critical Evaluation and Design of Bi-directional DC/DC Converters for Super-capacitors Interfacing in Fuel Cell Applications”, IEEE Industry Applications Conference, 3-7 Oct. 2004, 2:1127-1133.
- [59] Amjadi, Z. ve Williamson, S. S., (2010), “Power-Electronics-Based Solutions for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Energy Storage and Management Systems”, IEEE Trans Industrial Electronics, 57(2):608-616.
- [60] Schupbach, R.M. ve Balda, J.C., (2003), “Comparing DC-DC Converters for Power Management in Hybrid Electric Vehicles”, Electric Machines and Drives Conference IEMDC’03, IEEE international, 1-4 June, 3:1369-1374.
- [61] Haiping, X., Gang M., Changfu, S., Xuhui, W. ve Li, K., (2003), “Implementation of a Bi-directional DC-DC Converter in FCEV”, Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems ICEMS 2003, 9-11 Nov. 2003, 1:375-378.
- [62] Zhiguo, K., Chunbo, Z., Shiyan, Y. ve Shukang, C., (2006), “Study of Bidirectional DC-DC Converter for Power Management in Electric Bus with Supercapacitors”, Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC’06, 6-7 Sept., 1-5.
- [63] Waffler, S. ve Kolar, J.W., (2009), “A Novel Low-Loss Modulation Strategy for High-Power Bi-directional Buck+Boost Converters”, IEEE Trans Power Electronics, 24(6):1589-1599.
- [64] Vural, B., Uzunoglu, M., Erdinc, O., Onar, O. C., (2009), “A Dynamic Ultra-Capacitor Model for Vehicular Applications,” *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, 595-598, Capri, Italy, June 9-11, 2009.





## ALGILAYICI KARTININ AÇIK DEVRE ŞEMASI



## KONTROL ALGORİTMASI İÇİN OLUŞTURULAN C KODU

```

////////////////////////////////////MODE////////////////////////////////////
void modeSelection(void)
{
    if(refVol<5){
        mode=Shut_Mode;
        Reset_Durumu=1;
    }
    else{
        if(Reset_Durumu){
            Reset_Durumu=0;
            SIFIRDAN_BASLA=1;
            if(V_out>refVol){
                direction=regenerative;
                mode=DC_LINK_to_BAT_BUCK;
            }
            else{
                direction=motoring;
                mode=BAT_to_DC_LINK_BUCK;
            }
        }
        else if((rOut==0)&&(direction==regenerative)&&((refVol+0.5)>V_out)){
            direction=motoring;
            SIFIRDAN_BASLA=1;
            mode=BAT_to_DC_LINK_BUCK;
        }
        else if((rOut==0)&&(direction==motoring)&&((refVol-0.5)<V_out)){
            mode=DC_LINK_to_BAT_BUCK;
            SIFIRDAN_BASLA=1;
            direction=regenerative;
        }
        if(direction==regenerative){
            if((mode==DC_LINK_to_BAT_BUCK)&&(rOut==TAM_PWM)&&(V_out>(refVol+0.5)))
                mode=DC_LINK_to_BAT_BOOST;
            else if((mode==DC_LINK_to_BAT_BOOST)&&(rOut==0)&&(V_out<(refVol-0.5)))

```

```

SIFIRDAN_BASLA=0;
mode=DC_LINK_to_BAT_BUCK;
}
}

    if(direction==motoring){
if((mode==BAT_to_DC_LINK_BUCK)&&(rOut==TAM_PWM)&&(refVol>(V_out+0.5)))
mode=BAT_to_DC_LINK_BOOST;
else if((mode==BAT_to_DC_LINK_BOOST)&&(rOut==0)&&(refVol<(V_out-0.5)))
SIFIRDAN_BASLA=0;
mode=BAT_to_DC_LINK_BUCK;
}
}
}
if(modeOld!=mode)
modeRefresh=1;
modeOld=mode;
}

////////////////////////////////////////PID////////////////////////////////////////
double PIDCalc( PID *pp, double NextPoint )
{
double dError,
Error,
resultTemp;

Error = pp->SetPoint - NextPoint;
dError = pp->LastError - pp->PrevError;

resultTemp = (pp->Proportion * Error
+ pp->Integral * (pp->SumError+Error)
+ pp->Derivative * dError );
if(mode==BAT_to_DC_LINK_BOOST)
{
    if (resultTemp>YARI_PWM)
        return YARI_PWM;
}

else if(DC_LINK_to_BAT_BUCK)
{
    if (resultTemp>TAM_PWM)
        return TAM_PWM;
}
else if(mode==DC_LINK_to_BAT_BOOST)
{
    if (resultTemp>YARI_PWM)
        return YARI_PWM;
}
}

```

```
else if(mode==BAT_to_DC_LINK_BUCK )
{
    if (resultTemp>TAM_PWM)
        return TAM_PWM;
}
if (resultTemp<0)
    return 0;
pp->SumError += Error;
pp->PrevError = pp->LastError;
pp->LastError = Error;
return resultTemp;
}
```

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** :Serkan DÜŞMEZ  
**Doğum Tarihi ve Yeri** :23/03/1985 İstanbul  
**Yabancı Dili** :İngilizce  
**E-posta** :serkan\_dusmez@hotmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

| Derece | Alan                  | Okul/Üniversite             | Mezuniyet Yılı |
|--------|-----------------------|-----------------------------|----------------|
| Lisans | Elektrik Mühendisliği | Yıldız Teknik Üniversitesi  | 2009           |
| Lise   | Fen Bilimleri         | Özel Amerikan Robert Lisesi | 2005           |

### YAYINLARI

#### Makale

1. B.Vural, A. R. Boynuegri, I. Nakir, O. Erdinc, A. Balıkcı, M. Uzunoglu, H. Gorgun, **S. Dusmez**, “Fuel Cell and Ultra-Capacitor Hybridization: A Prototype Test Bench Based Analysis of Different Energy Management Strategies for Vehicular Applications”, Int. Journal of Hydrogen Energy, Volume 35, Issue 20, 2010, Pages 11161-11171.

#### Bildiri

1. B. Vural, **S. Dusmez**, and M. Uzunoglu, “An improved power conditioning unit for energy storage systems in hybrid electrical vehicles”, *v5th International Aegean Symposium and Exhibition (IEESE-5)*, June 2010, Denizli, Turkey.

2. B. Vural, M. Uzunoglu, **S. Dusmez**, E. Ugur, O. Erdinc , “Small Scale Test Bench Based Performance Analysis of a Fuel Cell/Ultra-capacitor Hybrid Vehicular Power System with an Improved Power Conditioning Unit”, in Proc. *2nd IEEE International Conference on*

*Sustainable Energy Technologies (ICSET'10)*, December 2010, Kandy, Sri Lanka.

3. B. Vural, M. Uzunoglu, **S. Dusmez**, E. Ugur, B. Yagcitekin, “Elektrikli Taşıtlarda Yakıt Hücresi, Batarya ve Ultra-kapasitörün Farklı Bağlantı Topolojileri İçin Deneysel Bir Karşılaştırma”, *Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ELECO' 2010*, Kasım 2010, Bursa.

### **Proje**

1. Elektrikli Taşıtlar için Yakıt Hücresi/Ultra-Kapasitör/Batarya Hibridizasyonunun Tasarımı ve Uygulaması, YTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü, Proje No: 29-04-02-01, 4 Mayıs 2009 – ... (Proje Araştırmacısı)