

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA ENERJİ YÖNETİM
STRATEJİLERİNİN, GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİNİN
VE BAĞLANTI TOPOLOJİLERİNİN PERFORMANS VE
VERİMLİLİK ÜZERİNE ETKİSİ**

Elektrik Yük. Müh. Bülent VURAL

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Svunma Tarihi : 20 Ekim 2010
Tez danışmanı : Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Celal KOCATEPE (YTÜ)
: Prof. Dr. Ali ATA (GYTE)
: Prof. Dr. Hakan ÜNDİL (İÜ)
: Doç. Dr. Erkan MEŞE (YTÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tez Çalışmasının Amacı	1
1.2 Tez Çalışmasının Araştırma Yöntemi	1
1.3 Elektrikli Taşıtların Gelişimi	3
2. TEZ KONUSU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALARIN İNCELENMESİ VE TEZ ÇALIŞMASININ KATKILARI	6
2.1 Elektrikli Taşıtlarda Yakıt Hücresi Olarak PEM YH Kullanılması	6
2.2 YH'li Elektrikli Taşıtlarda Enerji Depolama Ünitelerinin Gereksinimi	10
2.3 Elektrikli Taşıtlar için Güç Biçimlendirme Üniteleri	11
2.4 YH'li Elektrikli Taşıtlarda Hibritleştirme Topolojileri ve Kontrol Yöntemleri	20
2.5 Tez Çalışmasının Katkıları	22
2.5.1 Öngörülen ekonomik ve çevresel katkılar	22
2.5.2 Bilimsel katkılar	23
3. GÜÇ DÖNÜŞTÜRME ÜNİTESİ, ENERJİ YÖNETİMİ, HİBRTİ BAĞLANTI TOPOLOJİLERİ İLE İLGİLİ MODELLEME VE BENZETİM ÇALIŞMALARI	24
3.1 Sistem Bileşenlerinin Modellenmesi	24
3.1.1 PEM YH dinamik modeli	24
3.1.2 Lityum-iyon batarya dinamik modeli	29
3.1.3 Ultra-kapasitör dinamik modeli	32
3.1.4 Güç biçimlendirme ünitelerinin modelleri	38
3.1.4.1 Yükseltici tip dc-dc dönüştürücü	39
3.1.4.2 Yarım köprü çift yönlü dc-dc dönüştürücü	40
3.1.4.3 Çok girişli çift yönlü dc-dc dönüştürücü	41
3.2 Farklı Bağlantı Topolojileri ve Kontrol Yöntemleri için Benzetim Çalışmalarının Yapılması	43
3.2.1 Sürüş çevrimleri	43
3.2.2 Kontrol yöntemleri	46
3.2.2.1 Bulanık mantık (fuzzy-logic)	46
3.2.2.2 Dalgacık (wavelet) dönüşümü	47
3.2.3 YH/UK topolojilerinin benzetim çalışmaları	48
3.2.4 YH/BAT/UK topolojisinin benzetim çalışmaları	55

3.3	Sonuç	65
4.	GERÇEKLEŞTİRİLEN DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	67
4.1	Elektrikli Taşıtlarda Faydalı Frenleme Enerjisinin Daha İyi Kazanımı İçin Bir Dönüştürücünün Tasarımı ve Uygulaması	67
4.2	Elektrikli Taşıtlarda Yük Paylaşımı ve Enerji Yönetimi Uygulaması	72
4.2.1	Enerji yönetiminde tek başına bulanık mantık kontrolör kullanılması durumu	76
4.2.2	Enerji yönetiminde dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık tabanlı bir enerji yönetim stratejisinin kullanılması durumu	79
4.2.3	Dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık tabanlı enerji yönetim stratejisi için benzetim ve deney çalışmaların karşılaştırılması	82
4.3	Elektrikli Taşıtlarda Farklı Bağlantı Topolojilerinin Deneysel Olarak Karşılaştırılması	83
4.4	Sonuç	95
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	96
	KAYNAKLAR.....	100
	EKLER 105	
	Ek 1 Ayrık zamanlı bulanık mantık kontrolör kodları	106
	Ek 2 Deneysel çalışmalarda kullanılan güç dönüştürücülerin mikroişlemci kodları	109
	Ek 3 Tez çalışması ile ilgili yayımların listesi.....	115
	ÖZGEÇMİŞ.....	116

SİMGE LİSTESİ

A	Amper
Atm	Atmosfer basınç
B	Magnetik akı yoğunluğu
C	Coulomb (Elektrik yükü birimi)
d	Yüzde PWM
F	Farad
H	Magnetik akı şiddeti
Hz	Hertz
I _i	Akım
j	Akım yoğunluğu
J	Joule
m	Metre
mol	Mol (madde miktarı)
N _n	Bobin/trafo sarım sayısı
NL	Normal litre (Bir gazın normal hava koşullarında boşluktaki hacmi)
N _{s,p}	Seri veya paralel eleman sayısı
°C	Santigrat derece
°K	Kelvin
P	Basınç
Q	Elektrik yükü
q	Gaz akış miktarı
R _r	Direnç
Rpm	Radyan / dakika
s	Saniye
sa	Saat
T	Sıcaklık
V	Gerilim, Volt
W	Watt
Wh	Watt-saat
kWh	Kilo watt-saat
Z	Empedans
μ	Magnetik geçirgenlik
φ	Faz kaydırma açısı
ω	Açısal frekans
Ω	Ohm
Φ	Magnetik akı

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif akım (A lternatve C urrent)
BAT	Batarya
C	Kapasitör
CCF	Kapasite düzeltme etkisi (C apacity C orrection F actor)
DC	Doğru akım (D irect C urrent)
ESR	Eşdeğer seri direnç
Eşit.	Eşitlik
HB	Yarım köprü (H alf B ridge)
K _p	PI kontrolör oransal katsayısı
K _i	PI kontrolör integral katsayısı
MMF	Magneto motor kuvveti (M agneto M otor F orce)
PEM	Proton geçirgen zar (P roton E xchange M embrane)
PWM	Darbe genişlik modülasyonu (P ulse W idth M odulation)
SOC	Şarjlılık durumu (S tate o f C harge)
TCF	Sıcaklık düzeltme etkisi (T emperature C orrection F actor)
UK	Ultra-kapasitör
YH	Yakıt hücresi

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 PEM tipi yakıt hücresinin çalışması.....	7
Şekil 2.2 İzolesiz çift yönlü, çok girişli bir dc-dc dönüştürücü yapısı	13
Şekil 2.3 İzoleli, çok girişli ve çift yönlü bir dc-dc dönüştürücü yapısı.....	13
Şekil 2.4 Akı toplamsallığı temeline dayalı çok girişli, çift yönlü dc-dc dönüştürücü yapısı..	15
Şekil 2.5 Akı toplamsallığı prensibi ile çalışan dc-dc dönüştürücünün magnetik devresi	16
Şekil 2.6 Kaskad bağlı çift yönlü yükseltici ve düşürücü tip dc-dc dönüştürücü yapısı	19
Şekil 2.7 Kaskad topolojinin ileri yönde çalışma durumları	19
Şekil 2.8 Kaskad topolojinin geri yönde çalışma durumları	20
Şekil 2.9 Elektrikli taşıtlar hibrit bağlantı yapıları	21
Şekil 3.1 PEM YH elektriksel eşdeğer devre	24
Şekil 3.2 YH akım-gerilim eğrisi ve çalışma bölgeleri	26
Şekil 3.3 YH (MATLAB&Smulink ortamındaki) dinamik modeli	29
Şekil 3.4 Batarya empedansı eşdeğer devresi.....	31
Şekil 3.5 Batarya dinamik modeli	32
Şekil 3.6 UK elektriksel eşdeğer devresi.....	33
Şekil 3.7 MATLAB&Simulink ortamında oluşturulan UK dinamik modeli	37
Şekil 3.8 UK benzetim modeli için karşılaştırılmalı sonuçlar.....	38
Şekil 3.9 Yükseltici tip dc-dc dönüştürücü topolojisi	39
Şekil 3.10 Yükseltici tip dc-dc benzetim modeli.....	39
Şekil 3.11 Yükseltici tip dc-dc dönüştürücü için PI kontrolörü	40
Şekil 3.12 Yarım köprü çift yönlü dc-dc dönüştürücü topolojisi	40
Şekil 3.13 Yarım köprü çift yönlü dc-dc dönüştürücü benzetim modeli	41
Şekil 3.14 Çok girişli çift yönlü dc-dc dönüştürücü topolojisi ve benzetim modeli	42
Şekil 3.15 ECE-15 sürüş çevrimine göre güç talebi.....	43
Şekil 3.16 ECE-15 sürüş çevrimine göre taşıt hızının zamana bağlı olarak değişimi.....	44
Şekil 3.17 UDDS sürüş çevrimine göre taşıtın güç talebi.....	45
Şekil 3.18 UDDS sürüş çevrimine göre taşıt hızının zamana bağlı olarak değişimi.....	45
Şekil 3.19 Bulanık mantık kontrolörün işleyiş sürecine ait şematik gösterim.....	47
Şekil 3.20 Dalgacık dönüşümünün tek seviyeli filtreleme uygulaması.....	47
Şekil 3.21 YH/UK bağlantı topolojileri.....	48
Şekil 3.22 UK şarjlılık durumlarının (SOC) değişimi.....	50
Şekil 3.23 YH gerilim değişimleri.....	50
Şekil 3.24 Hidrojen tüketimleri	51
Şekil 3.25 Çok girişli dönüştürücüye sahip YH/UK hibrit topolojisi.....	51
Şekil 3.26 Dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık tabanlı kontrol sistemi.....	52
Şekil 3.27 Bulanık mantık kural yüzeyi	52
Şekil 3.28 Dalgacık dönüşümü ile YH ve UK referans güç sinyallerinin elde edilmesi.....	53
Şekil 3.29 Çok girişli çift yönlü dönüştürücülü YH/UK hibrit topolojisi için benzetim sonuçları.....	54
Şekil 3.30 Topoloji-1 ve 3 için hidrojen tüketimi değişimleri	55
Şekil 3.31 Dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık tabanlı enerji yönetimi.....	56
Şekil 3.32 Bulanık mantık kontrolör kural tabanı.....	56
Şekil 3.33 Dalgacık dönüşümü kullanılarak elde edilen UDDS güç profili ayrışımı.....	58
Şekil 3.34 YH sistemi çıkış gücünün değişimi.....	60
Şekil 3.35 Batarya sistemi çıkış gücünün değişimi.....	61
Şekil 3.36 UK sistemi çıkış gücünün değişimi.....	62
Şekil 3.37 YH yığıcı geriliminin değişimi.....	63
Şekil 3.38 Batarya sistemi şarj seviyesinin değişimi.....	63

Şekil 3.39 UK sistemi şarj seviyesinin değişimi	64
Şekil 3.40 DC yük barası geriliminin değişimi.	64
Şekil 3.41 İhtiyaç duyulan hidrojen akışı miktarının değişimi.....	65
Şekil 4.1 Yarım köprü çift yönlü dönüştürücü topolojisi	67
Şekil 4.2 Yarım köprü çift yönlü dönüştürücünün çalışma durumları	68
Şekil 4.3 Çift yönlü dönüştürücü prototipleri için hazırlanan test platformu blok şeması.	69
Şekil 4.4 Çift yönlü dönüştürücü prototipleri için hazırlanan test platformu.....	69
Şekil 4.5 Çift yönlü dönüştürücüler için oluşturulan kontrol algoritması	70
Şekil 4.6 Kaskad ve yarım köprü dönüştürücülerde bara gerilimi değişimi	71
Şekil 4.7 Kaskad ve çift yönlü dönüştürücülerde UK gerilimi değişimi.....	71
Şekil 4.8 Kaskad ve çift yönlü dönüştürücülerde dc motor hızının değişimi.....	72
Şekil 4.9 Test platformu bağlantı topolojisi	73
Şekil 4.10 Test platformu	73
Şekil 4.11 Yükseltici tip dönüştürücü	75
Şekil 4.12 Tüm sistemin kontrol algoritması.....	75
Şekil 4.13 Enerji yönetim stratejileri.....	76
Şekil 4.14 YH sistemi çıkış gücü	77
Şekil 4.15 YH sistemi çıkış gerilimi.....	77
Şekil 4.16 YH sistemi ortalama hücre gerilimi	78
Şekil 4.17 UK sistemi çıkış gücü	78
Şekil 4.18 UK sistemi çıkış gerilimi.....	79
Şekil 4.19 YH sistemi çıkış gücü	80
Şekil 4.20 YH sistemi çıkış gerilimi.....	80
Şekil 4.21 YH sistemi ortalama hücre gerilimi	81
Şekil 4.22 UK sistemi çıkış gücü	81
Şekil 4.23 UK sistemi çıkış gerilimi.....	82
Şekil 4.24 Dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık tabanlı enerji yönetim stratejisi için benzetim ve deneysel çalışmaların karşılaştırmalı sonuçları	83
Şekil 4.25 Test platformu	84
Şekil 4.26 Düşürücü-yükseltici tip dönüştürücü	86
Şekil 4.27 Düşürücü-yükseltici tip dönüştürücünün kontrol algoritması.....	86
Şekil 4.28 Bulanık mantık tabanlı kontrol algoritması.....	86
Şekil 4.29 Bulanık mantık kural tabanı	87
Şekil 4.30 Bağlantı topolojileri.....	88
Şekil 4.31 Bağlantı topolojisi-1 için deneysel sonuçlar	89
Şekil 4.32 Bağlantı topolojisi-2 için deneysel sonuçlar	90
Şekil 4.33 Bağlantı topolojisi-3 için deneysel sonuçlar	91
Şekil 4.34 Bağlantı topolojisi-4 için deneysel sonuçlar	92
Şekil 4.35 Bağlantı topolojisi-5 için deneysel sonuçlar	93

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 YH çeşitleri ve özellikleri	7
Çizelge 3.1 YH modeli parametreleri.....	25
Çizelge 3.2 Batarya modeli parametreleri	30
Çizelge 3.3 k_1 , k_2 ve k_3 katsayılarının çevrim sıcaklığına bağlı değerleri.....	32
Çizelge 3.4 UK dinamik modelindeki parametreler	34
Çizelge 3.5 ECE-15 sürüş çevriminin özellikleri	44
Çizelge 3.6 UDDS sürüş çevriminin özellikleri	46
Çizelge 3.7 YH modeli parametre değerleri.....	49
Çizelge 3.8 UK modeli parametre değerleri.....	49
Çizelge 3.9 PEM YH parametreleri ve değerleri.....	59
Çizelge 3.10 Batarya ünitesi değerleri.....	59
Çizelge 3.11 UK ünitesi değerleri	59
Çizelge 4.1 Test edilen çift yönlü dönüştürücülerin enerji depolama ünitesi ve referans gerilim değerlerine bağlı çalışma durumları.....	70
Çizelge 4.2 PlugPower® GenCore PEMYH teknik özellikleri.....	73
Çizelge 4.3 Maxwell® Boostcap BMOD0165 P048 teknik özellikleri	74
Çizelge 4.4 Maxwell® Boostcap BMOD0430 P016 UC teknik özellikleri.....	74
Çizelge 4.5 Fırçasız doğru akım motorunun teknik özellikleri	74
Çizelge 4.6 PlugPower® Nexa PEMYH teknik özellikleri.....	85
Çizelge 4.7 Batarya gruplarının teknik özellikleri.....	85
Çizelge 4.8 Programlanabilir elektronik yük bankasının teknik özellikleri	85
Çizelge 4.9 Yakıt tüketimi ve kazanılan faydalı frenleme enerjisi bakımından topolojilerin karşılaştırılması sonuçları.....	94

ÖNSÖZ

Tez çalışması süresince karşılaştığım problemler karşısında ve zihinsel olarak yorgun düştüğüm anda bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren ve bu tezi hazırlayabilecek aşamaya gelmemde en büyük desteği veren çok kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU'na, benzetim çalışmalarında yardımlarından dolayı Elk Y. Müh. Ozan Erdiñ'e, deneysel çalışmalar sürecinde destek veren Arş. Gör. A. Rıfat Boynueğri'ye ve Elk. Müh. Serkan Düşmez'e çok teşekkür ediyorum. Ayrıca, beni yetiştiren anneme ve bu günleri görmesini çok istediğim ve kaybetmiş olduğum babama şükranlarımı sunuyorum. Geride kalan üç yıl boyunca yoğun çalışma saatlerimden hiç şikayet etmeden desteğini esirgemeyen fedakar eşime de ayrıca teşekkür ediyorum.

Bu çalışmanın belli kısımları, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 107M355 no'lu proje kapsamında ve Yıldız Teknik Üniv. Tarafından 29-04-02-01 no'lu Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında desteklenmiştir.

ÖZET

Geleneksel içten yanmalı taşıtların temel enerji kaynağı olan petrolün, artan talebe karşın rezervleri giderek tükenmektedir. Buna ilave olarak taşıtların olumsuz çevresel etkilerinin de giderek artması, birçok taşıt üreticisini elektrikli taşıtlarla ilgili çalışmalara yönlendirmiştir. Bütün bunlara ek olarak, içten yanmalı motorlu taşıtların özellikle düşük devirlerde verimlerinin az olması da elektrikli taşıtları daha cazip kılmaktadır. Elektrikli taşıtlar ile ilgili sürdürülen çalışmalar geniş bir alana yayılmakla birlikte, elektrikli taşıtların verimini ve menzilin arttırmaya yönelik olanlar daha öne çıkmaktadır. Elektrikli taşıtlarda verim ve menzil artırma amacı ile gerçekleştirilen çalışmalar da kendi içinde, çözüm bekleyen farklı noktalara yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmaların bir kısmı faydalı frenleme enerjisinin daha iyi geri kazanımına, en iyi enerji yönetim stratejisinin geliştirilmesine ve enerji kaynaklarının farklı bağlantı topolojilerinin etkilerine yoğunlaşmaktadır.

Bu tez çalışmasında da yukarıda belirtilen alanlar ile ilgili devam eden çalışmalara katkı sağlamak amacı ile benzetim, deneysel ve tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları süresince, tüm sisteme ait her alt bileşenin bir dinamik modeli oluşturulmuş ve sistem entegrasyonu sağlanmıştır. Oluşturulan tüm sistem üzerinde, farklı bağlantı yapıları ve farklı güç dönüştürücü topolojileri için çalışmalar tamamlanmıştır. Deneysel çalışmalar süresince ise, güç biçimlendirme ünitelerinin tasarımları ve prototipleri gerçekleştirilerek, test platformları kurulmuştur. Bu test platformları üzerinde farklı enerji yönetim stratejileri, farklı güç biçimlendirme topolojileri ve farklı bağlantı yapıları için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen tüm benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar irdelenerek sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Elektrikli taşıtlar; faydalı frenleme; yakıt hücresi; batarya; ultra-kapasitör; enerji yönetim stratejisi; bulanık mantık; dalgacık dönüşümü; modelleme; güç dönüştürücüler

ABSTRACT

Depleting of petroleum, the main energy source for the vehicles with conventional internal combustion engines (ICE), and the growing negative effects of vehicles on environment have directed several vehicle manufacturers towards studies on electric vehicles. Besides, the low efficiency of ICEs especially at lower rpms has made electric vehicles more attractive. Present researches concerning electric vehicles concentrate in several topics however, the researches effort on yield and range more than other topics. Recovering regenerative braking energy, energy management strategy with load sharing and comparison of different hybrid topologies are the topics have become prominent in EV applications.

In the consideration of above matter, this study deals with comparison of simulation and experimental studies in regenerative braking energy, energy management strategy and different hybrid topologies. During simulation studies mathematical and electrical models are developed in detail. Besides, test benches are utilized for testing different power conditioning units, energy management strategies and hybrid topologies. The results and analysis of simulation and experimental studies are given.

Key words: Electric vehicles; regenerative braking; fuel-cell; battery; ultra-capacitor; energy management strategy; fuzzy logic; wavelet; modeling; power conditioning units

1. GİRİŞ

1.1 Tez Çalışmasının Amacı

Geleneksel içten yanmalı taşıtların egzoz gazlarının (emisyonunun) neden olduğu olumsuz çevresel etkilere ilave olarak, fosil kökenli yakıt rezervlerinin de giderek azalması elektrikli taşıtlara olan ilgiyi arttırmıştır. Elektrikli taşıtlar ile ilgili çalışmalar çok yönlü olmakla birlikte, verimliliği ve menzili arttırmaya yönelik olanlar daha öne çıkmaktadır. Verimlilik ve menzil ile ilgili çalışmalar da farklı alanlara ayrılmaktadır. Bu çalışmaların belirli bir kısmı taşıt mekaniği odaklı iken, bir kısmı ise elektrik motoru ve güç dönüştürücüleri üzerine yoğunlaşmıştır. Ayrıca, mevcut sistemlerin (güç kaynakları, elektrik motoru, güç dönüştürücü vb.) daha etkili kullanılması amacı ile kontrol odaklı çalışmalar da yapılmaktadır. Bunlara ek olarak, faydalı frenleme enerjisinin en iyi şekilde geri kazanılmasına yönelik yapılan çalışmalar da büyük ilgi görmektedir.

Tez çalışmasında, yukarıda belirtilen çalışma alanları kapsamında elektrikli taşıt teknolojisinin gelişimine katkı sağlanması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen benzetim ve deneysel çalışmalar ile;

- Faydalı frenleme enerjisinin daha iyi geri kazanılmasında güç dönüştürücülerin etkisi,
- Yük paylaşımli enerji yönetiminin verimlilik ve performans üzerine olumlu katkısı,
- Enerji kaynakları ve enerji depolama sistemlerine ait farklı bağlantı topolojilerinin verimlilik ve performans açısından karşılaştırılması,

irdelenmiştir.

Tez süresince yapılan deneysel çalışmalar, oluşturulan test platformları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede sadece üzerine odaklanan çalışma alanları ile ilgilenilmiş, taşıtın elektriksiz olmayan diğer dinamikleri kapsam dışı tutulmuştur.

1.2 Tez Çalışmasının Araştırma Yöntemi

Elektrikli taşıtın mekanik ve diğer elektriksiz olmayan tüm aksamaları ile ilgili yapılabilecek çalışmalar tezin amacı dışında olduğundan, deneysel çalışmalar gerçek bir taşıt yerine iki ayrı test platformu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir test platformu üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar iki ayrı proje kapsamında destek almıştır. Bu test platformlarından

birincisi TÜBİTAK 1001 kapsamında desteklenmiş olup, gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile yakıt hücresi (YH) ve ultra-kapasitör (UK) hibrit yapısına uygulanacak yük paylaşımı ve enerji yönetiminin etkileri gözlemlenmiş ve irdelenmiştir. Diğer test platformu ise Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında desteklenmiş olup, gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda ise YH, batarya (BAT) ve UK'dan oluşan farklı hibrit yapıların karşılaştırmaları yapılmıştır. Elektrikli taşıt sistemlerinin testlerinde kullanılan standart sürüş çevrimlerine ait azami güç değerleri 10 kW ve katları seviyesindedir. Bu yüksek güç değerlerine bağlı olarak bir elektrikli taşıt sisteminin maliyetini büyük oranda YH ve/veya batarya sistemleri oluşturmaktadır. İkinci test platformu için sağlanan desteğin kısıtlı olması nedeni ile özellikle YH ve batarya maliyetlerini azaltmak amacı ile güç değerleri normalize edilmiştir. Buna göre standart YH tipleri incelenerek, YH sistemi için azami güç değeri 1,2 kW olarak belirlenmiştir. Ancak YH sistemlerinde en yüksek verim kısmi yüklenme durumlarında elde edildiğinden, tüm sistem için azami güç değeri 1 kW olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra maliyeti yüksek olan lityum-iyon bataryalar yerine, yine şarj-deşarj ömürleri ve verimleri yüksek olan VRLA (Valf Regulated Lead Acid) bataryalar tercih edilmiştir (Bentley ve Stone, 2005; Lam vd., 2007; Nakayama vd., 2003).

Bu tez çalışması süresince en iyi yük paylaşımını sağlamaya yönelik gerçekleştirilen benzetim ve deneysel çalışmalarda, daha önceki çalışmalarda yararlanılan dalgacık dönüşümü (wavelet transform) yöntemi kullanılmıştır. Dalgacık dönüşümü yöntemi ile yük taleplerindeki değişimler düşük ve yüksek frekanstaki bileşenlerine ayrıştırılarak yük talepleri sınıflandırılmıştır. Daha sonra bu sınıflandırmaya göre yük talebindeki değişimin hangi kaynaktan karşılanacağına (YH, UK veya BAT) karar verilmiştir. Ayrıca enerji yönetimi için de, bulanık mantık tabanlı kontrol algoritmaları kullanılmıştır. Bunlara ek olarak faydalı frenleme enerjisini en iyi şekilde geri kazanmak ve enerji yönetim stratejisini en iyi şekilde uygulayabilmek amacı ile güç biçimlendirme ünitesi prototipleri geliştirilmiştir.

Tez çalışması süresince deneysel çalışmaların öncesinde gerekli benzetim çalışmaları tamamlanmıştır. Bu benzetim çalışmalarında aşağıdaki yöntem ve süreç izlenmiştir:

- Her bir alt sisteme (YH, UK, BAT ve güç biçimlendirme ünitelerine) ait dinamik modeller oluşturulmuştur
- Elde edilen modellerin entegrasyonu sağlanmıştır.
- Entegrasyonu tamamlanan tüm hibrit sistem/sistemler için yapılan benzetim çalışmaları tamamlanarak, elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

Yapılan benzetim çalışmalarında, MATLAB® & Simulink® ve SimPowerSystems® yazılımları

kullanılarak model tabanlı tasarım, geliştirme ve iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Benzetim çalışmaları tamamlandıktan sonra, test platformları kurularak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar süresince izlenen yöntem ve süreç:

- Deneysel çalışmalarda ilk olarak faydalı frenleme enerjisini en iyi şekilde geri kazanabilecek, en uygun yük paylaşımı ve enerji yönetimine olanak sağlayacak güç biçimlendirme ünitesi prototipleri geliştirilmiştir.
- Güç biçimlendirme ünitesi prototipleri geliştirildikten sonra, deneysel çalışmalar için gerekli test platformunun kurulumu tamamlanmıştır.
- Tamamlanan test platformu üzerinde deneysel çalışmalar yapılarak, elde edilen sonuçların belirli bir kısmı benzetim çalışmaları ile irdelenmiş, diğerler sonuçlar ise kendi aralarında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Benzetim ve deneysel çalışmalarda uygulanan enerji yönetim stratejisi açısından dikkate alınan kriterler:

- DC bara geriliminin uygun bir aralıkta tutulabilmesi,
- Test sürecinde ana kaynağın yeterli olmadığı durumlarda enerji depolama sistemlerinin güç talebindeki artışı zamanında karşılayabilmesi,
- Yük taleplerinin uygun güç kaynağı ile karşılanabilmesi için yük paylaşımının doğru yapılması,
- Faydalı frenleme enerjisinin en iyi şekilde geri kazanılması,
- Enerji depolama sistemlerinin şarjlılık durumu takip edilerek, belirlenen uygun bir seviyede tutulması,

olarak ele alınmıştır.

1.3 Elektrikli Taşıtların Gelişimi

Elektrikli taşıtların geçmişi içten yanmalı motorlu taşıtlar kadar eskiye dayanmaktadır. İlk elektrikli taşıt prototipi 1830 yılında üretilmiştir. Bu ilk prototipte enerji kaynağı olarak tekrar şarj edilemeyen bataryalar kullanılmıştır. Ancak, batarya teknolojisindeki gelişmeye bağlı olarak 19. yüzyılın sonlarına doğru bataryalar, ticari olarak üretilen taşıtlarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu dönemde tekrar şarj edilebilir bataryaların geliştirilmesi ile elektrikli taşıt sistemleri büyük bir kullanım alanına sahip olmuştur. Özellikle 1920'li yıllarda çok sayıda elektrikli taşıt üretiminin gerçekleştirildiği görülmektedir (Larminie ve Lowry, 2003). Elektrikli taşıtlar, ilk ortaya çıktıkları yıllarda içten yanmalı motora sahip taşıtlar ile kıyaslandıklarında performans ve verimlilik açısından oldukça iyi bir konumdaydılar. Ancak elektrikli taşıtların menzillerinin kısa olması diğer yanda petrolün ucuz olması ve benzinin enerji yoğunluğunun yüksek olması elektrikli taşıtlara olan ilgiyi giderek azaltmıştır.

İçten yanmalı motorlu taşıtların menzillerinin daha fazla olmasının nedeni, sahip oldukları

enerji yoğunluğunun (özgül enerjisinin) bataryaların enerji yoğunluğuna kıyasla oldukça büyük olmasıdır. Burada enerji yoğunluğu ile belirtilen, kg başına depolanabilen enerji miktarını ifade etmektedir. Bir içten yanmalı motorda kullanılan yakıtın enerji yoğunluğu yaklaşık 9000 Wh/kg iken, örnek olarak bir lityum-iyon bataryanın enerji yoğunluğu 95 Wh/kg ve bir kurşun asit bataryanınki ise yaklaşık 30 Wh/kg'dır. Bu değerler taşıtların verimlerine bağlı olarak içten yanmalı motor için 1800 Wh/kg, batarya için ise 27 Wh/kg değerine düşmektedir. Bu durumda bile enerji yoğunlukları arasında içten yanmalı motorların lehine 70 kat bir fark vardır. Diğer bir ifade ile aynı menzile sahip olabilmesi elektrikli taşıtta mevcut bataryadan 70 adet kullanılmalıdır. Ayrıca bir bataryayı tamamen şarj edebilmek için birkaç saat gerekirken, içten yanmalı bir motor için gerekli yakıtı yüklemek birkaç dakikada gerçekleşmektedir. Tüm bunlar içten yanmalı motorlu taşıtların neden daha öne çıktığını göstermektedir. Yukarıda belirtilen avantajları nedeni ile 1920-1960'lı yıllar arasında içten yanmalı motorlu taşıtlar hakim konumda kalmışlardır.

Ancak, 1960'ları takip eden yıllarda artan petrol fiyatları ve içten yanmalı motorlu taşıt sayısına bağlı olarak giderek artan olumsuz çevresel etkileri ile birlikte elektrikli taşıtlar üzerine yapılan çalışmalar yeniden artmaya başlamıştır. Bütün dünyayı etkileyen ve 1970'li yılların ortalarında meydana gelen petrol kriziyle, otomotiv üreticileri yatırımlarının bir kısmını elektrikli taşıtlara yöneltmiştir (Chau ve Wong, 2002). Bu yatırımlar ile birlikte, büyük taşıt üreticileri 1990'lı yıllara kadar farklı tip ve modelde elektrikli taşıt prototipi geliştirmişlerdir. Ancak, bu prototipler gerek performans, gerekse menzil açısından içten yanmalı motorlu taşıtlarla kıyaslanabilecek düzeyde değildir (Joshi ve Deshmukh, 2006). Tamamen elektrikli taşıtlardaki menzil problemini aşmak için içten yanmalı motor ile elektrikli motorun birlikte kullanıldığı hibrit taşıtların geliştirilmesi üzerine çalışmalar başlatılmıştır. Hibrit elektrikli taşıt fikri ilk kez 1916 yılında geliştirilen prototip ile ortaya çıkmış olsa da (Ünlü vd., 2003), ticari olarak üretimleri 1990'lı yıllarda belirli firmalar (Toyota-Prius, Honda-Civic Hybrid) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Hibrit elektrikli taşıtlarda, elektrik motoru ile içten yanmalı motorun iyi yönlerinin birlikte kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaçla farklı hibrit yapılar üzerinde çalışılmıştır. Bu hibrit yapılardan en çok bilinenleri seri, paralel ve seri-paralel (karma) hibrit taşıtlardır (Emadi vd.,2005). Bu hibrit yapılar sayesinde taşıt verimi artarken, içten yanmalı motorun çevreye olumsuz etkileri azaltılmaktadır. Ayrıca (elektrik motorunun frenleme anında generatör modunda çalıştırılarak) faydalı frenleme sayesinde yakıt tasarrufuna önemli ölçüde katkı sağlanmaktadır (Larminie ve Lowry, 2003; Mierlo vd., 2006).

Hibrit taşıtların, yukarıda belirtildiği gibi birçok olumlu yönlerinin olmasına rağmen taşıt sistemleri için nihai bir çözüm olarak görülmemektedir. Uzun dönemde tamamen elektrikli taşıtlara geçilmesi hedeflenmektedir ve ana kaynak olarak da lityum-iyon ya da türevleri olan bataryalar öngörülmektedir. Ancak elektrikli taşıtlarda alternatif enerji kaynakları ile ilgili yapılan çalışmalarda, YH'li elektrikli taşıtlar geleceğin taşıtlarından biri olarak ön plana çıkmaktadır (Mierlo vd., 2006). Elektrikli taşıtlarda YH'lere olan bu ilginin en önemli nedenleri ise; YH sistemlerinde yakıt olarak doğrudan kullanılabilen hidrojenin doğada en fazla bulunan element olması ve YH'lerin sıfır emisyon sağlama potansiyelidir.

Geleceğin elektrikli taşıtlarında temel enerji kaynağı olarak düşünülen YH'ler ile ilgili çalışmalar, YH maliyetlerini azaltmak, verimi artırmak ve hidrojenin depolanması ile ilgili henüz aşılamamış problemlere çözüm getirme üzerine yoğunlaşmaktadır. Yapılan bu çalışmalarda elde edilecek olumlu gelişmelere paralel olarak YH'li elektrikli taşıtların yakın bir gelecekte otomotiv sektöründe önemli bir yere sahip olacağı öngörülmektedir.

Tez çalışmasında elektrikli taşıtların gelişimine katkı sağlamak amacı ile gerçekleştirilen benzetim ve deneysel çalışmalarda, farklı enerji yönetim stratejileri, farklı güç dönüştürücü topolojileri ve hibrit sistem bağlantıları için karşılaştırmalı testler yapılmıştır. Yapılan testlerden edilen sonuçlar sistem performansı, yakıt (hidrojen) tüketimi ve faydalı frenleme enerjisinin geri kazanılması açısından irdelenerek verilmiştir.

2. TEZ KONUSU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALARIN İNCELENMESİ VE TEZ ÇALIŞMASININ KATKILARI

Elektrikli taşıt tasarımı konusunda dünyada ileri teknoloji uygulayan ve geliştiren Japonya (Honda, Hyundai, Toyota), Almanya (Volkswagen, BMW), ABD (Ford, Daimler-Chrysler) v.b. gibi ülkelerde prototip üretim çalışmaları devam etmektedir. Yakın bir gelecekte de tamamen elektrikli taşıtların yüksek adetlerde piyasaya sürülmesi planlanmaktadır. Ticari amaçla yapılan çalışmaların yanında bu alanda bilimsel olarak da birçok çalışma yapılmıştır ve bu çalışmalar artarak devam etmektedir. Bu çalışmaları dört ana başlık altında toplamak mümkündür. Bu başlıklar detaylandırılarak ilerleyen kısımlarda (2.1-2.4) incelenmiştir.

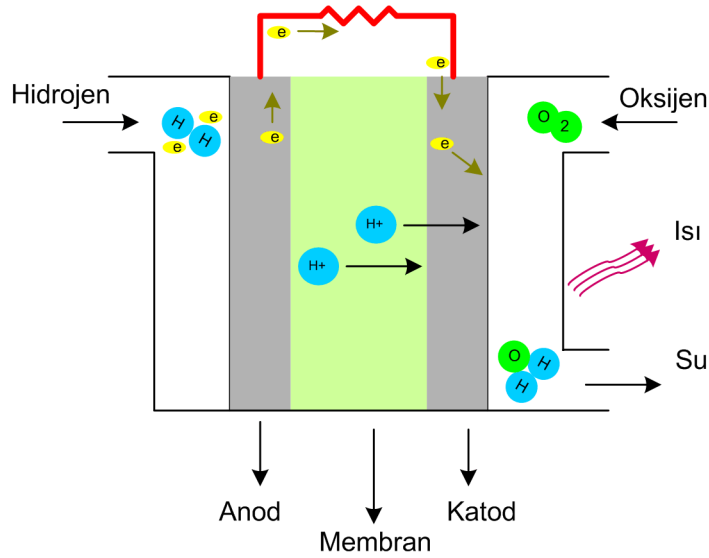
2.1 Elektrikli Taşıtlarda Yakıt Hücreleri Olarak PEM YH Kullanılması

Temel olarak YH, yakıtın (hidrojen) kimyasal enerjisini doğru akım elektrik enerjisine çeviren bir elektro-kimyasal enerji dönüştürücüdür (Barbir, 2005). Yakıt ekonomisi, performans ve çevresel avantajları gibi nedenlerle YH'ler, elektrikli taşıt üretimine yönelik büyük otomotiv şirketlerinin ilgisini çekmiştir (Westbrook, 2005). Ayrıca YH'ler genel olarak düşük gürültü seviyesinde ve içten yanmalı motorlara kıyasla yüksek verimle çalışabilmektedirler (Barbir, 2005). Bütün bu avantajlara karşılık YH sistemleri hala konvansiyonel sistemlerden daha ağır ve hantal durumdadır. Bu nedenle gelecekteki teknolojik gelişmeler daha çok performans artırma, hacim ve maliyet azaltma üzerine odaklanmaktadır (Helmolt ve Eberle, 2007). YH sistemleri arasında (Çizelge 2.1), yüksek verimliliğinin yanı sıra, hacim ve ağırlık açısından sahip olduğu avantajları nedeniyle, Polimer Elektrolit veya Proton Geçirgen Membran (Polymer Electrolyte – Proton Exchange Membrane, PEM) YH sistemleri günümüzde taşıt uygulamaları için en uygun YH sistemleridir (Rodatz vd., 2005; Barbir, 2005; Larminie ve Dicks, 2003).

Çizelge 2.1 YH çeşitleri ve özellikleri

YH türü	Çalışma sıcaklığı [°C]	Elektrolit türü	Yakıt türü	Oksitleyici türü	Verim (%)
Alkalin YH	70-100	Potasyum hidroksit	Doğrudan Hidrojen	Saf oksijen	50-70
Erimiş Karbonlu YH	650	Erimiş karbon çözeltisi	Doğal gaz ya da hava gazından elde edilen hidrojen ve karbon monoksit	Havadan elde edilen oksijen	40-55
Fosforik Asit YH	160-210	Dengelenmiş fosforik asit	Doğal gazdan elde edilen hidrojen	Havadan elde edilen oksijen	35-50
Katı Oksit YH	800-1000	Seramik katı oksit	Doğal gaz ya da hava gazından elde edilen hidrojen ve karbon monoksit	Havadan elde edilen oksijen	45-60
PEM YH	50-100	Proton geçirgen polimer	Doğrudan hidrojen	Saf ya da havadan elde edilen oksijen	35-60

Ayrıca PEM YH'ler, diğer YH türlerine ile kıyasla daha düşük sıcaklıkta çalışmakta ve buna bağlı olarak ilk çalışma anında daha hızlı devreye girebilmektedirler (Larminie ve Dicks, 2003). PEM YH, hidrojen ve oksijenin elektro-kimyasal reaksiyonundan ortaya çıkan enerjiyi doğrudan elektrik ve ısı enerjisi formuna çeviren ve buna bağlı olarak güç üreten bir sistemdir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 PEM tipi yakıt hücresinin çalışması

PEM YH sistemine sahip bir taşıtın kullanılması ile içten yanmalı motorlu bir taşıta göre

toplamda 2,5-2,7 kat daha az enerji tüketimi ve 2,6 kat daha az sera gazı emisyonu sağlanabilir (Hussain, Dincer ve Li, 2007; Ouyang vd. ,2006). Ancak PEM YH sistemlerinin yüksek maliyet ve kısa ömür gibi dezavantajları, PEM YH sistemine sahip taşıtların ticari olarak üretilmesini zorlaştırmaktadır (Ouyang vd. ,2006). Ancak günümüzde birçok büyük taşıt üreticisinin, bu dezavantajları en aza indirmek ve PEM YH'li taşıtların ticarileştirilmesini sağlamak amacıyla yoğun çalışmaları bulunmaktadır (Honda, 2004).

PEM tipi YH'ye sahip elektrikli taşıtlar için yakıt olarak kullanılan hidrojen, taşıta doğrudan veya taşıtın içerisinde hidrojene dönüştürülen bir hidrojen taşıyıcısıyla verilmektedir (Senol, Ucgul ve Acar, 2006). YH sistemleri, günümüzde zararlı etkileri artan ve çevresel problemlere neden olan karbondioksit emisyonunu, yakıt olarak doğrudan hidrojen kullanıldığında tamamen ortadan kaldırmaktadır. Yapılan araştırmalar neticesinde yakıt dönüştürücü (reformer) sisteminin taşıtlarda kullanılması, dönüştürücü sisteminde hidrojen elde edilmesi işleminde emisyon gerçekleşmesi nedeni ile tavsiye edilmemektedir (Hussain, Dincer ve Li, 2007). Bu yönüyle taşıtlarda hidrojen tankı kullanılarak depolama sisteminin oluşturulması otomotiv sanayinin de tercihi olmuştur. Ancak, hidrojenin depolanmasındaki belirli problemlerin henüz çözülememesi, YH'lerin elektrikli taşıtlarda kullanılmasını geciktiren diğer bir nedendir.

Hidrojen depolama ile ilgili problemler, tercih edilen depolama yöntemine göre değişmektedir. Bilinen hidrojen depolama yöntemleri, yüksek basınçta sıkıştırma, sıvılaştırma, hidrokarbonlar, hidrürler ve karbon nano tüplerdir. Hidrojen depolamada en çok bilinen yöntem, hidrojenin yüksek basınçta sıkıştırılarak, çelik, alüminyum bazlı veya karbon kompozit tüplerde depolanmasıdır (Barbir, 2005). Çelik ve alüminyum bazlı tüplerde depolanan hidrojenin depo ağırlığına oranı %2-5 iken karbon kompozit tüplerde bu oran %11,3 kadar yükselmektedir.

Hidrojen depolamada diğer bir yöntem olan sıvılaştırmada, hidrojen gazı düşük sıcaklıklarda ve sıkıştırma yöntemine kıyasla daha düşük basınçlarda sıvılaştırılarak depolanmaktadır (Barbir, 2005). Bu yöntemde depolanan hidrojenin, depolama tankının ağırlığına oranı yaklaşık %26'dır. Ancak, sıvılaştırma büyük miktarlarda hidrojen depolamak için oldukça pahalı bir yöntemdir. Bu yöntemle depolanacak hidrojen miktarı için gereken enerji, aynı hidrojen miktarından elde edilecek enerjinin %28'i civarındadır.

Hidrojen depolamadaki veya elde etmedeki bir diğer yöntem ise, metanol veya etanol gibi

hidrokarbonlu yakıtlardır (Barbir, 2005). Bu hidrokarbonların içerdikleri hidrojen miktarı, hidrokarbonun toplam miktarının büyük bir çoğunluğunu oluşturmaktadır. Yüksek sıcaklıkta su buharı ile yapılan ayrıştırma neticesinde, hidrokarbonun %70-75'i oranında hidrojen elde edilebilmektedir. Ancak ayrıştırma sonucu ortaya çıkan karbondioksit ve karbonmonoksit gibi gazlar bu yöntem için bir dezavantajdır.

Hidrojenin metallerde, alaşımlarda ve ara metallerde hidrür olarak depolanabilmesi büyük bir avantaj sunmaktadır. Ancak, tüp ağırlığı önemli bir sorun oluşturmaktadır. Günümüzde ticari olarak kullanılan metal hidrür tüplerde depolanan hidrojenin oranı %4,5 civarındadır. Bununla birlikte tekralanan doldurma-boşaltma sayısına bağlı olarak bu oran giderek azalmaktadır. Bu nedenle, ağırlığının %10,5 oranında hidrojen depolamaya olanak sağlayan sodyum bor hidrür ile ilgili çalışmalar daha öne çıkmıştır (Schell vd., 2005). Sodyum bor hidrür ile hidrojen depolamanın en önemli avantajı, depolanan hidrojenin oda sıcaklığında geri alınabilmesi ve bunun katalizör (rutenyum, platin, nikel, kobalt veya metal oksit karışımlar) yardımı ile kontrol edilebilmesidir (Kim vd., 2004). Sodyum bor hidrür kullanımındaki en önemli dezavantaj, hidrojen ayrışımında ortaya çıkan metaboratı tekrar sodyum bor hidrüre dönüştürmek için yüksek enerji gereksinimidir.

Nano teknolojik gelişmelere paralel olarak hidrojen depolamada üzerinde çalışılan diğer bir yöntem ise karbon nano tüplerdir. Karbonun gözenekli küçük partiküller haline getirilebilmesi ve karbon atomları ile hidrojen gazı molekülleri arasında oluşan çekim kuvveti (Van Der Waal's), karbon nano tüp yöntemi ile hidrojen depolamayı elverişli duruma getirmektedir (Darkrim, 2002). Bu sayede %68'e varan ağırlık oranlarında hidrojen depolanabilmektedir. Karbon nano tüp yönteminin günümüzdeki en önemli dezavantajı ise maliyetlerinin çok yüksek olmasıdır.

Hidrojen depolama ve elde etme ile ilgili çalışmalar yukarıda detaylandırıldığı gibi çok yönlü olarak devam etmektedir. Ancak günümüzde hidrojenin taşıt içerisinde doğrudan kullanılabilmesine yönelik, "sodyum borohidrit" teknolojisi kullanılarak depolanması üzerine yapılan çalışmalara daha ağırlık verilmiştir. Bu teknoloji ile oluşturulan ve depolanan yakıtın patlama riski yoktur. Böylece hidrojenin yüksek basınçta depolanmasında meydana gelebilecek patlama riskinin beraberinde getirdiği güvenilirlik problemi de ortadan kaldırılmış olur. Ayrıca bu teknoloji ile birlikte birim hacimde hidrojen depolama verimliliği artmakta ve böylece ihtiyaç duyulan hidrojen depolama sisteminin boyutları azaltılmaktadır. Bu durum, hidrojen depolama sisteminin taşıt içerisinde kapladığı yerden dolayı ortaya çıkan problemi de

önemli bir ölçüde azaltılmaktadır

2.2 YH'li Elektrikli Taşıtlarda Enerji Depolama Ünitelerinin Gereksinimi

Bir elektrikli taşıtın tahrik edilmesinde gerekli bütün enerji talebinin karşılanması için tek başına bir YH sistemini kullanmak, özellikle taşıt uygulamalarında sıkça karşılaşılan anlık yüklenmelerde kullanışlı olmamaktadır (Emadi vd., 2005). Bunun yanı sıra, bütün güç talebinin YH tarafından karşılanması istenirse, hem sistemin boyutunda hem de maliyetinde artış meydana gelmektedir. Ayrıca, mevcut YH sistemleri frenleme enerjisini kazanma yeteneğine sahip değildirler. Bütün bu nedenlerden dolayı YH sisteminin bir enerji depolama ünitesiyle hibrit bir şekilde kullanılmasıyla toplam maliyette düşüş ve taşıt performansında önemli bir artış elde edilebilecektir. Ayrıca, faydalı frenleme enerjisinin geri kazanılabilmesi sayesinde enerji tasarrufu da arttırılabilecektir.

Birçok hibrit uygulamada batarya, enerji depolama sistemi olarak kullanılmaktadır (Corbo vd., 2007; Jeong vd., 2005; Ouyang vd., 2006). Ancak, günümüzde ticari olarak mevcut olan bataryaların düşük çevrim ömrü, uzun tekrar şarj etme süresi ve düşük güç yoğunluğu gibi dezavantajları bulunmaktadır (Gualous vd., 2003). Bunun yanı sıra, hızlı değişen yük talepleri bataryanın kimyasal yapısına zarar verebilmektedir. Bu nedenle hibrit sistemlerde enerji depolama ünitesi olarak tek başına bataryaları kullanmak optimum bir çözüm için yeterli olmamaktadır. Batarya sistemlerine alternatif olarak, süper-kapasitör ve çift katmanlı kapasitör olarak da bilinen ultra-kapasitörler (UK) taşıt uygulamalarında enerji depolama ünitesi olarak kullanımı açısından da araştırılmaktadırlar (Gualous vd., 2003). UK'ların geleneksel kapasitörlere ve bataryalara kıyasla üstün özellikleri mevcuttur. UK'lar bataryalara göre daha fazla güç yoğunluğuna ve geleneksel kapasitörlere göre daha fazla enerji yoğunluğuna sahiptirler (Rodatz vd., 2005). UK'lar uzun bir çevrim ömrüne sahip olmakla birlikte geniş sıcaklık aralıklarında da sorunsuz çalışabilmektedirler (Rodatz vd., 2005; Lajnef vd., 2007). Ayrıca, yüksek güç taleplerinin karşılanmasında yapısal olarak bataryalardan daha etkili olmaları da önemli avantajlarındandır. Fakat UK'ların en önemli dezavantajı, batarya sistemleri ile kıyaslandığında oldukça düşük bir enerji yoğunluğuna sahip olmalarıdır (Pasquier vd., 2003).

Batarya ve UK'ların yukarıda belirtilen özellikleri dikkate alındığında, ikisinin hibrit olarak birlikte kullanılması ile, bataryaların yüksek enerji yoğunluğu ve UK'ların yüksek güç yoğunluğu birleştirilerek çok daha verimli bir enerji depolama sistemi ortaya çıkacaktır (Gao

vd., 2008). Ayrıca bataryanın, sistemin temel yük talebinin karşılanmasında ana kaynak olarak tercih edilmesi durumunda da UK ile birlikte kullanılması daha avantajlı olacaktır.

2.3 Elektrikli Taşıtlar için Güç Biçimlendirme Üniteleri

Günümüzde artık birçok büyük taşıt üreticisi (Toyota, Honda, Ford) YH'li elektrikli taşıtları, uzun dönem sürdürülebilir alternatif itici güce sahip taşıt sistemleri için ulaşılabilecek son nokta olarak öngörmektedir. Ancak YH sistemini, tek başına bir elektrikli taşıtın tüm güç ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla kullanmak yerine bir enerji depolama sistemi ile birlikte kullanmak daha uygun bir çözüm olacaktır. YH ile bir enerji depolama sistemi gibi iki farklı elektriksel güç kaynağını birlikte kullanabilmek için ise güç elektroniğine dayalı uygun bir güç dönüştürücüsü tasarımı gerekmektedir.

Güç elektroniği teknolojisindeki gelişmeye paralel olarak dc-dc dönüştürücüler ile ilgili yapılan çalışmalarda, gereksinimlere göre farklı dönüştürücü yapıları ve kontrol yöntemleri geliştirilmektedir. Alternatif enerji kaynakları ve enerji depolama sistemleri gibi birden fazla kaynağın birlikte kullanılmasına yönelik geliştirilen dc-dc dönüştürücülerde ise çift yönlü ve/veya çok girişli yapıya sahip olan türleri daha çok öne çıkmaktadır.

Bunlardan tek girişli ve çift yönlü yapıya sahip dönüştürücüler (Jain vd., 1997; Tolbert vd., 2002; Cacciato vd., 2004) genellikle enerji depolama üniteleri ile birlikte kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir. Bu dönüştürücüler izoleli ve izolesiz olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. İzolesiz olan dönüştürücülerin tasarımlarının sade olması sayesinde güç elektroniği eleman sayıları az ve kontrolleri de daha kolaydır (Haiping vd., 2003). Bunun yanında yüksek güçler için tasarımlarındaki zorluklar ve izolesiz olmaları dezavantajlarıdır. İzoleli olan türler, tasarımlarında transformatör kullanıldığı için daha yüksek güçlerde yapılabilmektedirler (Jain vd., 1997; Tolbert vd., 2002; Peng vd., 2004; Cacciato vd., 2004). Ancak izoleli türlerinden geri-dönümlü (flyback) yapıdaki dönüştürücülerde güç sınırlaması bir dezavantajdır (Cacciato vd., 2004).

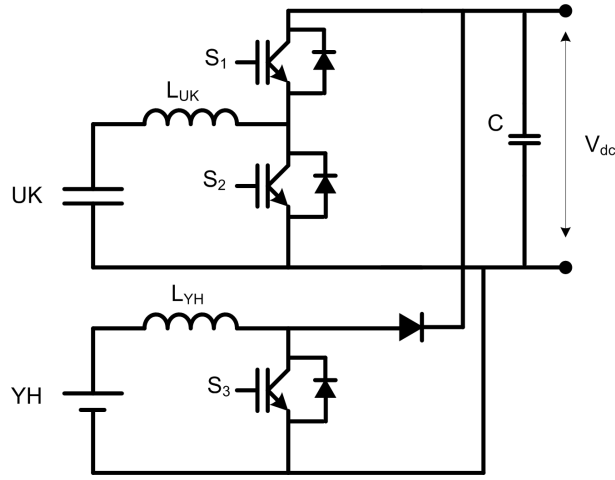
Çok girişli dc-dc dönüştürücüler, Matsuo vd.'nin 2004 yılında yapmış oldukları çalışmada belirtildiği üzere, birden fazla kaynağın birlikte kullanılarak, güç talebini gerilim regülasyonunu da sağlayarak karşılamak amacı ile geliştirilmişlerdir. Çok girişli dönüştürücüler; giriş kaynakları seri (Marchesoni vd., 2007-Ozpineci vd., 2004) veya paralel bağlı (Doobs ve Chapman, 2003-Tao vd., 2006), izoleli (Yaow vd., 2002- Tao vd., 2006) veya izolesiz (Marchesoni vd., 2007-Di Napoli vd., 2002b) ve tek yönlü (Doobs ve Chapman,

2003; Yaow vd., 2002; Huang vd., 2005) veya çift yönlü (Yalamanchili vd, 2006- Di Napoli vd., 2002b; Tao vd., 2006; Liu ve Li, 2006) olmak üzere farklı türlere ayrılmaktadır.

Giriş kaynakları seri bağlı dönüştürücüler genellikle çok girişli yerine, çok seviyeli olarak tanımlanmaktadır. Çift yönlü olanları enerji depolama üniteleri ile birlikte kullanılmaya uygundur (Yalamanchili vd, 2006; Ozpineci vd., 2004). Ancak giriş kaynaklarından birinin çökmesi sonucu çıkışa güç aktarımında problem oluşmaktadır (Tao vd., 2005,2006). Bu nedenle çok seviyeli dönüştürücüler, birden fazla kaynak ile çıkışı eşzamanlı beslemeye uygun değildir. Çok seviyeli dönüştürücüler uygulamalarda genellikle giriş gerilimini katlamak amacı ile tercih edilmektedirler (Marchesoni ve Vacca, 2007; Ozpineci vd., 2004).

Çok seviyeli dönüştürücülerin yük paylaşımındaki yetersizliklerinden dolayı girişindeki kaynakların paralel bağlandığı, çok girişli dönüştürücüler geliştirilmiştir. Girişteki kaynakları paralel bağlı olan dönüştürücülerde kaynaklardan biri çökse bile diğer kaynak sistemi beslemeye devam edebilmektedir. Ancak çıkışı eşzamanlı besleyemeyen tiplerinde yük paylaşımı yapılamamaktadır (Matsuo vd., 2004; Dobbs ve Chapman, 2003). Bu nedenle girişteki kaynaklar ile çıkışı eşzamanlı besleyebilen çok girişli dönüştürücüler daha ön plana çıkmaktadır (Solero vd., 2005; Di Napoli vd., 2002a;2002b; Yaow vd., 2002; Huang vd., 2005; Tao vd., 2005; Liu vd., 2006).

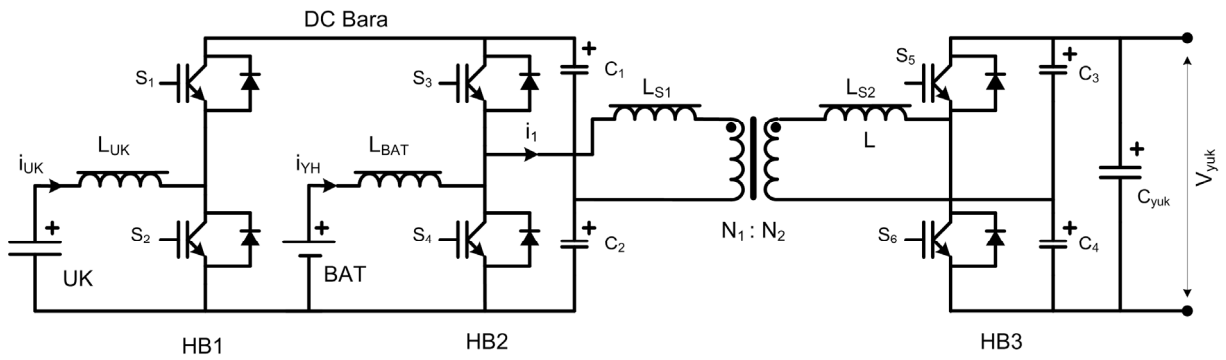
Bu tip dönüştürücüler yük paylaşımına ve böylece yük değişimine bağlı olarak giriş kaynaklarından çıkışa eş zamanlı bir şekilde güç aktarımına olanak sağlamaktadırlar. Ancak çift yönlü olmayan türleri de enerji depolama sistemleri ile kullanıma uygun değildir. Özellikle elektrikli taşıtlarda faydalı frenlemedeki enerjinin geri kazanımı için kullanılan dönüştürücünün çift yönlü olması gerekmektedir. Çok girişli ve çift yönlü dönüştürücü tiplerinde giriş kaynakları arasında da güç aktarımı yapabilenler özellikle hibrit elektrikli taşıtlar için daha uygun kabul edilmektedir (Solero vd., 2005; Di Napoli vd., 2002a; 2002b; Tao vd., 2005,2006). Bu gereksinimler elektrikli taşıtlarda çok girişli ve çift yönlü dönüştürücülerin tercih edilmelerini sağlamaktadır. Elektrikli taşıtların tüm ihtiyaçlarını karşılayabilecek potansiyele sahip bu dönüştürücüler izoleli (Tao vd., 2005,2006; Lui vd., 2006) ve izolesiz (Solero vd., 2005; Di Napoli vd., 2002a; 2002b) olarak iki farklı yapıda geliştirilmektedirler. Şekil 2.2’de görülen topoloji izolesiz tip çift yönlü, çok girişli bir dc-dc dönüştürücü örneğidir (Solero vd., 2005).



Şekil 2.2 İzolesiz çift yönlü, çok girişli bir dc-dc dönüştürücü yapısı

Şekil 2.2’de de görüldüğü gibi girişlerinde biri enerji depolama ünitesi olmak üzere toplam iki giriş kaynağı mevcut olup, üç adet güç anahtarı kullanılmıştır. Bu topolojinin sade yapısının getirdiği avantajın yanında izolesiz olması, güç anahtarlarının aşırı gerilim darbelerine maruz kalması ve kaçak akımlar nedeni ile gerilim dengesizliklerinin oluşması ise dezavantajlarıdır. Ayrıca dc bara gerilimini ayarlamak için hızlı ve iyi tasarlanmış bir kontrolör gerekmektedir.

İzoleli tip çift yönlü ve çok girişli dc-dc dönüştürücüler giriş yapılarına göre iki kısımda incelenmektedir. Şekil 2.3’te görülen çift girişli ve çift yönlü dc-dc dönüştürücüde giriş kaynakları paralel bağlanarak, yüksek frekans transformatörü üzerinden çıkışa güç aktarımı sağlanmaktadır (Tao vd., 2005).



Şekil 2.3 İzoleli, çok girişli ve çift yönlü bir dc-dc dönüştürücü yapısı

Şekil 2.3’ten de görüldüğü gibi dönüştürücü 3 adet yarı köprüden oluşmaktadır. HB3 yarı köprüsü, yük tarafındaki enerjinin (frenleme enerjisinin) girişe aktarılmasını sağlamaktadır. HB2 köprüsü ana kaynağın (BAT) enerjisini, gerilimi transformatörü üzerinden yükselterek

çıkışa aktarma işlevini görmektedir. HB1 köprüsü ise ikinci kaynak (UK) için enerji alışverişini sağlamaktadır. Ayrıca bu dönüştürücü, HB1 ve HB2'nin çift yönlü çalışabilmesi nedeni ile BAT/UK hibrit yapıları için daha uygundur. Burada batarya ile dc bara gerilimi arasındaki ve dc bara ile yük gerilimi arasındaki ilişki sırası ile;

$$V_{dc\text{-}bara} = 2 \cdot V_{BAT} \quad (2.1)$$

$$V_{dc\text{-}bara} = \frac{N_1 \cdot V_{yük}}{N_2} \quad (2.2)$$

eşitlikleri ile verilmektedir (Tao vd., 2005). Burada;

$V_{dc\text{-}bara}$: Transformator girişindeki dc bara gerilimi,

V_{BAT} : Batarya uç gerilimi,

$V_{yük}$: Yükün uçlarındaki gerilim,

N_1 : Transformator primer sarım sayısı,

N_2 : Transformator sekonder sarım sayısını göstermektedir.

Yüke aktarılan güç ise;

$$P = \frac{V_{dc\text{-}bara} \cdot V_{yük}}{n \cdot \omega \cdot L_S} \cdot \varphi \cdot \left(1 - \frac{|\varphi|}{\pi} \right) \quad (2.3)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir (Tao vd., 2005). Bu eşitlikte;

n: transformator dönüştürme oranı $\frac{N_1}{N_2}$,

φ : faz kaydırma açısı

L_S : Transformator primerine göre toplam kaçak endüktansı ifade etmektedir.

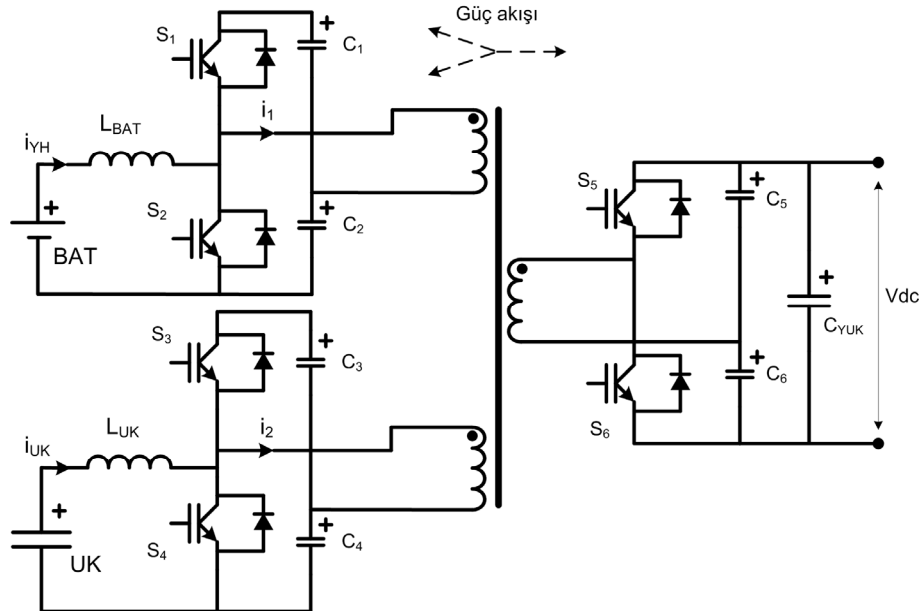
Eşitlik (2.3)'te de görüldüğü gibi çıkışa aktarılan güç, dc bara gerilimi sabit olduğu sürece faz kaydırma açısı (φ) ayarlanarak kontrol edilebilmektedir. Burada dc bara geriliminin sabit kalması ise UK ile sağlanmaktadır. UK, yükün talep ettiği güç ile bataryanın verebileceği güç arasındaki farkı karşılamaktadır. Bu durumda UK akımı ise;

$$I_{UK} = (P_{YH\text{-}ref} - P_{yük}) / V_{UK} \quad (2.4)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır (Tao vd., 2005).

Bu dönüştürücü türü orta güçteki uygulamalar için daha uygundur. Ayrıca bu topoloji doğal yumuşak anahtarlama özelliği ile ek bir bastırma (snubber) devresine ihtiyaç gerektirmez. Bu dönüştürücü türü; bahsedilen tüm ihtiyaçları karşılamakla beraber maliyet, hacim ve kontrol açısından da avantaj sağlamaktadır. Bahsi geçen dönüştürücünün sade bir yapıda olması, maliyetinin düşük ve hacminin de küçük olmasını sağlamaktadır. Ayrıca tek bir dönüştürücü olması nedeni ile de, kontrolü merkezi olarak yapılabilmektedir. Bu topolojideki tüm avantajlara karşın, HB1'deki güç anahtarları aşırı gerilimlere maruz kalabilmektedir. Ayrıca batarya ve UK birbirinden tamamen bağımsız olarak çıkışa güç aktarımı yapamamaktadır, bu da elektrikli taşıtlarda yük paylaşımı için yeterli olmamaktadır.

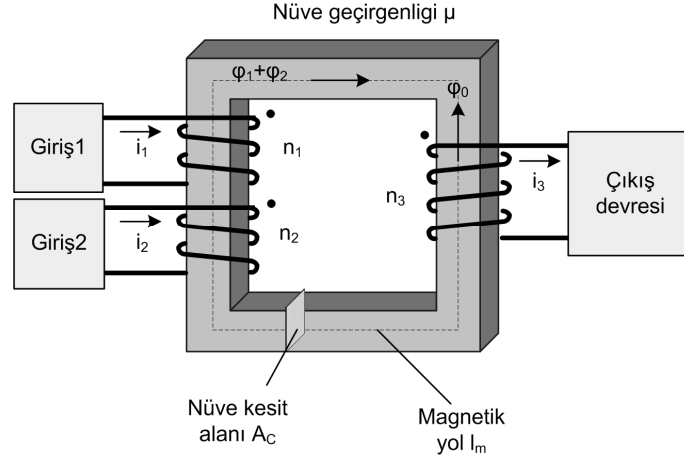
Elektrikli taşıtlarda yük paylaşımının en uygun bir biçimde yapılabilmesi ve faydalı frenleme enerjisini en iyi şekilde kazanılabilmesi için iyi bir kontrol sisteminin yanında bahsi geçen eksiklikleri de gideren bir dc-dc dönüştürücüye de ihtiyaç duyulmaktadır. Lui vd.'leri (Lui vd., 2006) geliştirdikleri dönüştürücünün bir elektrikli taşıtın tüm güç değişimlerine cevap verebileceğini belirtmektedirler. Bu dönüştürücüde diğer çok girişli ve çift yönlü türlerinden farklı olarak girişteki kaynaklar, elektriksel yerine magnetik olarak birleştirilmiştir. Çıkışa aktarılan toplam güç, akı toplamsallığı ile sağlanmaktadır. Bu sayede girişteki kaynaklar çıkışa hem eşzamanlı hem de birbirinden bağımsız olarak güç aktarabilmektedir. Böylece elektrikli taşıtlar için en uygun yük paylaşımına olanak sağlanmaktadır.



Şekil 2.4 Akı toplamsallığı temeline dayalı çok girişli, çift yönlü dc-dc dönüştürücü yapısı

Genel yapısı Şekil 2.4'te görülen dc-dc dönüştürücü daha önce de belirtildiği gibi

transformatörün primerindeki akı toplamlarına bağlı olarak sekondere güç aktarmaktadır. Şekil 2.5’de dönüştürücüye ait magnetik devrede akıların izlediği yol görülmektedir.



Şekil 2.5 Akı toplamsallığı prensibi ile çalışan dc-dc dönüştürücünün magnetik devresi

Akı toplamı prensibine dayalı olarak çalışan bu dönüştürücüde Şekil 2.5’de de görüldüğü gibi girişlerin akım kaynağı olması gerekmektedir. Ancak kullanılan YH, güneş paneli, UK, batarya vb. gibi kaynaklar birer gerilim kaynağı olarak çalışmaktadırlar. Bu nedenle girişteki kaynaklara seri şok-bobinleri (L_{BAT} , L_{UK}) bağlanarak gerilim kaynaklarının birer akım kaynağı gibi çalışmalarını sağlamıştır. Kullanılacak bobinler, akımın sürekli olmasını sağlayacak büyüklükte seçilmelidir. Girişteki akımların meydana getirdiği toplam akıya bağlı toplam magnetik motor kuvveti (MMF);

$$MMF = n_1 i_1 + n_2 i_2 = H_1 l_m + H_2 l_m \quad (2.5)$$

eşitliği ile gösterilmektedir. Eşitlik (2.5)’deki magnetik akı şiddeti (H) ise;

$$H = B / \mu \quad (2.6)$$

şeklindedir. Magnetik akı yoğunluğu (B);

$$B = \phi / A_c \quad (2.7)$$

olarak ifade edilmektedir. Bu durumda MMF;

$$MMF = \frac{(\phi_1 + \phi_2) l_m}{\mu \cdot A_c} \quad (2.8)$$

olmaktadır. Bu eşitliklerde;

n_1 : transformatörün primerindeki 1. sargının sarım sayısını,

n_2 : transformatörün primerindeki 2. sargının sarım sayısını,

i_1 : primerdeki 1. sargıdan geçen akımı,

i_2 : primerdeki 2. sargıdan geçen akımı,

H_1 : primerdeki 1. sargıda oluşan magnetik akı şiddetini,

H_2 : primerdeki 2. sargıda oluşan magnetik akı şiddetini,

l_m : transformatörün nüvesi üzerindeki magnetik akının izlediği yolu,

μ : nüvenin magnetik geçirgenliğini,

A_c : nüvenin kesit alanını,

Φ_1 : primerin 1. sargısındaki magnetik akıyı,

Φ_2 : primerin 2. sargısındaki magnetik akıyı göstermektedir.

Faz açısı (φ) ve sarım sayılarına (n) bağlı, giriş gerilimlerine ve çıkış akımına ait eşitlikler sırası ile;

$$V_1 = \frac{n_1}{n_3} \cdot \varphi_1 \cdot V_o \quad (2.9)$$

$$V_2 = \frac{n_2}{n_3} \cdot \varphi_2 \cdot V_o \quad (2.10)$$

$$I_o = \frac{n_1}{n_3} \cdot \varphi_1 \cdot I_1 + \frac{n_2}{n_3} \cdot \varphi_2 \cdot I_2 \quad (2.11)$$

olarak ifade edilmektedir (Liu vd., 2006). Burada;

V_1 : birinci kaynağın çıkış gerilimini,

V_2 : ikinci kaynağın çıkış gerilimini,

V_o : dönüştürücü çıkış gerilimini,

φ_1 : birinci giriş devresi için PWM faz açısını,

φ_2 : ikinci giriş devresi için PWM faz açısını,

I_1 : birinci kaynaktan çekilen akımı,

I_2 : ikinci kaynaktan çekilen akımı,

I_o : dönüştürücü çıkış akımını belirtmektedir.

Bahsi geçen dc-dc dönüştürücünün kontrolü faz kaydırmalı PWM yöntemi ile yapılmaktadır. (Eşitlik 2.9-2.11) eşitliklerinde görüldüğü gibi akım ve gerilimler, transformatör sarım sayıları

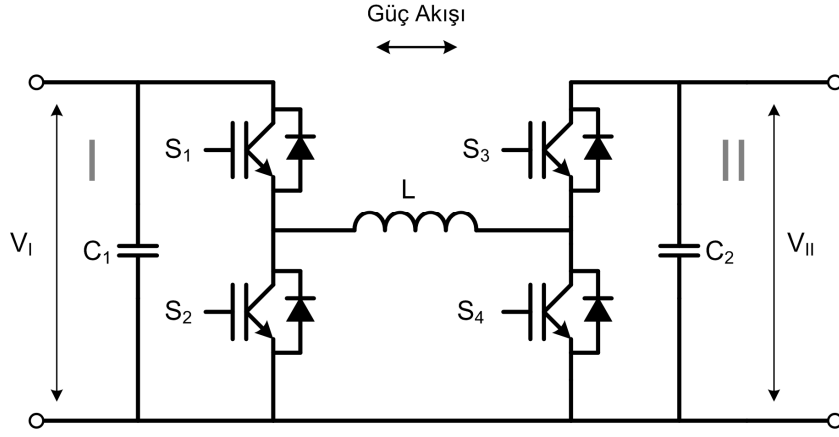
sabit olduğundan faz açılarına bağlı olarak değişmektedir. Bahsedilen dönüştürücüde çıkış gücü ise;

$$P_0 = P_1 + P_2 = V_1 I_1 + V_2 I_2 \quad (2.12)$$

şeklindedir. Bu durumda giriş kaynaklarından sadece biri için güç kontrolü yapıldığında, çıkışta talep edilen güç ile söz konusu kaynağın verdiği güç arasındaki farkı doğrudan diğer kaynak karşılayacaktır.

Yapısı ve çalışma prensibi yukarıda anlatılan çok girişli, çift yönlü dc-dc dönüştürücünün benzerlerine nazaran daha üstün özellikleri olduğu görülmüştür. Ancak bu topolojinin de faydalı frenleme enerjisini geri kazanmada yetersiz kaldığı durumlar bulunmaktadır. Bir elektrikli taşıtın frenleme anında hızı düştükçe, generatör olarak çalışan elektrik motorunun ürettiği gerilim değerinde de azalma olacaktır. Bu gerilim değeri enerji depolama ünitelerinin gerilim seviyesinin altına düştüğünde, güç dönüştürme sisteminin frenleme enerjisi kazanmaya devam edebilmesi için frenleme yönünde yükseltici olarak çalışması gerekmektedir. Yukarıda bahsi geçen çok girişli ve çift yönlü dc-dc dönüştürücü, yapısındaki trafonun dönüştürme oranına bağlı olarak frenleme enerjisini kazanmada sınırlı bir aralıkta çalışabilmektedir. Ayrıca bu topolojinin deneysel olarak gerçekleştirilmesi ve kontrolü de, tek girişli ve izolesiz olanlarına göre daha zordur.

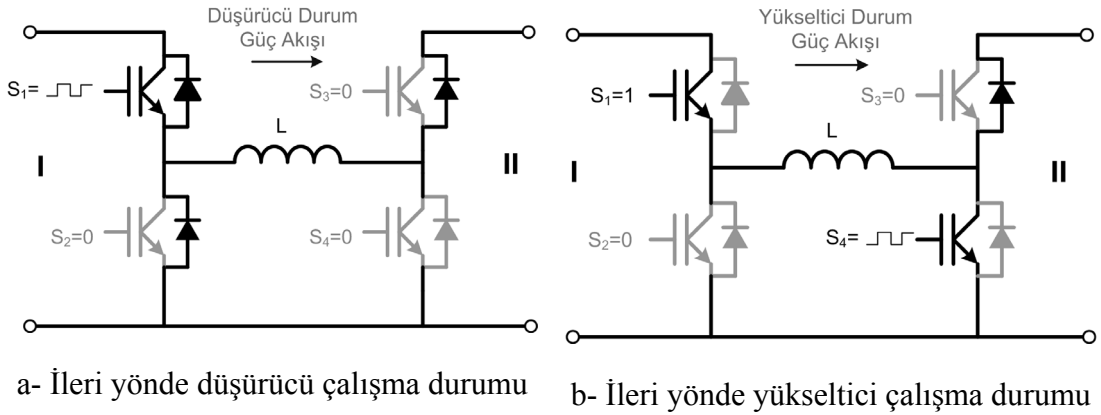
Elektrikli taşıtlarda yük paylaşımı ve enerji yönetimi kadar faydalı frenleme enerjisinin geri kazanımı da büyük oranda önemlidir. Bu amaçla yapılan araştırmalar neticesinde kaskad bağlı çift yönlü düşürücü-yükseltici tip dc-dc dönüştürücü (cascade bidirectional buck-boost converter) topolojisinin talepleri karşılamada daha iyi bir performans sergileyeceği öngörülmüştür (Waffler ve Kolar, 2009). Bu topoloji, Şekil 2.6'da görüldüğü gibi iki adet yarım köprü (half-bridge) yapının birleşimden oluşmaktadır ve hem düşürücü hem de yükseltici olarak çalışabilmektedir. Bu özelliği sayesinde taşıtın düşük hızlarında bile faydalı frenleme yapılabilmektedir (Vural vd., 2010).



Şekil 2.6 Kaskad bağlı çift yönlü yükseltici ve düşürücü tip dc-dc dönüştürücü yapısı

Ayrıca bu topolojinin kontrolü de oldukça kolaydır. Tetikleme sinyali gönderilen güç anahtarlarına ($S_{1,2,3,4}$) bağlı olarak dört farklı durumda (ileri yönde düşürücü veya yükseltici, geri yönde düşürücü veya yükseltici) çalışabilmektedir.

Kaskad topolojinin ileri yönde (II yönünde) çalışma durumları Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2.7 Kaskad topolojinin ileri yönde çalışma durumları

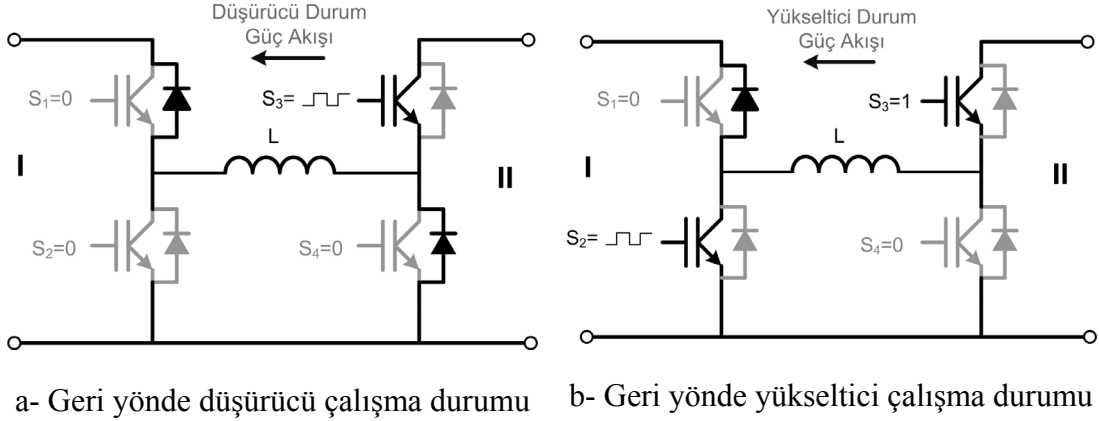
Şekil 2.7-a'da görüldüğü gibi ileri yönde düşürücü olarak çalışma durumunda sadece S_1 anahtarına tetikleme sinyali (PWM) gönderilmektedir. Burumda çıkış gerilimi ifadesi ($d = \% \text{ PWM}$ olmak üzere);

$$V_{II} = d \times V_I \quad (2.13)$$

olmaktadır. İleri yönde yükseltici olarak çalışma durumunda, Şekil 2.7-b'de görüldüğü gibi S_1 anahtarı sürekli iletimde kalmakta ve S_4 anahtarına PWM sinyali gönderilmektedir. Yükseltici çalışma durumunda çıkış gerilimi ifadesi;

$$V_{II} = \frac{V_I}{1-d} \quad (2.14)$$

şeklindedir. Kaskad bağlı topolojinin geri yönde (I yönünde) çalışması, ileri yöndeki çalışmaya benzer şekilde gerçekleşmektedir. Geri yöndeki çalışma durumları Şekil 2.8’de görülmektedir.

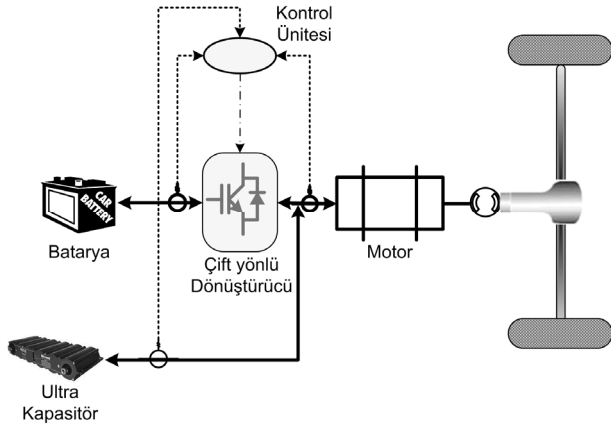


Şekil 2.8 Kaskad topolojinin geri yönde çalışma durumları

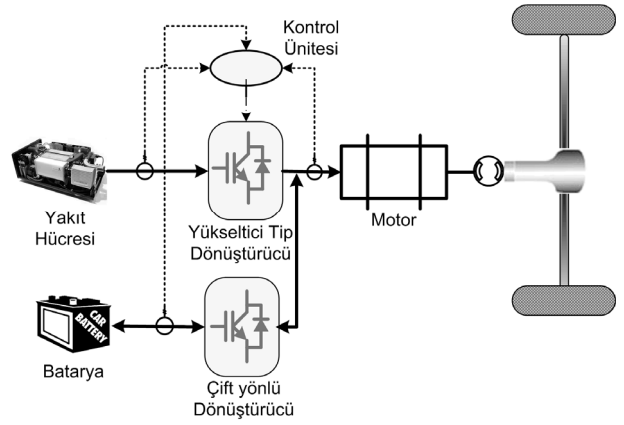
Sahip olduğu avantajları dikkate alındığında bahsi geçen kaskad dönüştürücü tipinin, bir elektrikli taşıtın güç talebindeki tüm değişimlere cevap verebilecek uygun bir seçim olacağı öngörülmektedir.

2.4 YH’li Elektrikli Taşıtlarda Hibritleştirme Topolojileri ve Kontrol Yöntemleri

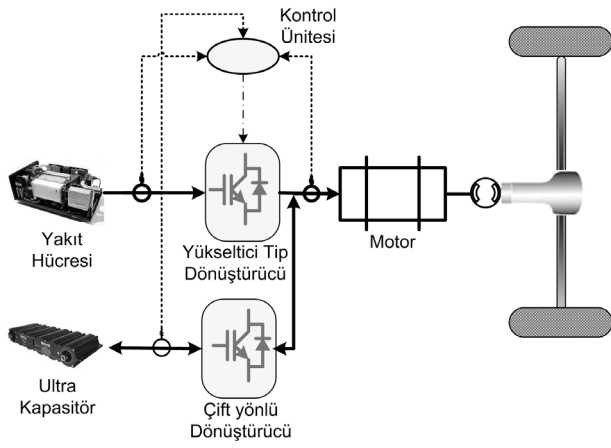
Hibrit elektrikli taşıt, birden fazla elektrikselsel güç kaynağının farklı hibrit yapılarında birlikte kullanılması ile oluşmaktadır. Güç kaynaklarının hibridizasyon şekilleri taşıtın performansını ve verimliliğini önemli ölçüde etkilemektedir (Uzunoglu ve Alam, 2008; Mierlo vd., 2006). Ayrıca taşıtın ana güç sağlayıcısının YH olması durumunda, güç kaynaklarının yapılandırma şekilleri YH ömrünü de etkilemektedir (Bauman vd., 2008; Erdinc vd., 2009a; 2009b). Bu nedenle literatürde elektrikli taşıtlar ile ilgili yapılmış olan çalışmaların bir kısmı, bir çok yönden daha iyi bir hibrit yapı elde etme üzerine yoğunlaşmıştır (Bauman vd., 2008; Erdinc vd., 2009a; 2009b; Vural vd., 2009a; 2009b). Şekil 2.9’da, tezin deneysel çalışmaları aşamasında testleri yapılan ve literatürde de yer alan farklı hibrit yapılar yer almaktadır.



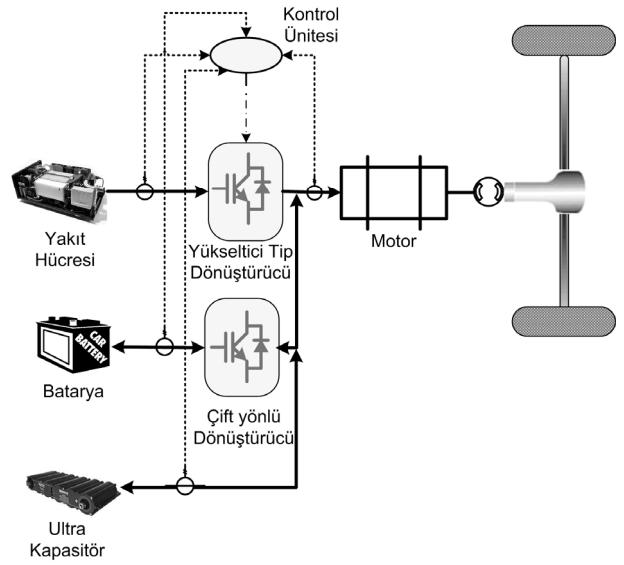
a- Elektrikli taşıtlar için BAT/UK hibrit yapısı



b- Elektrikli taşıtlar için YH/BAT hibrit yapısı



c- Elektrikli taşıtlar için YH/UK hibrit yapısı



d- Elektrikli taşıtlar için YH/BAT/UK hibrit yapısı

Şekil 2.9 Elektrikli taşıtlar hibrit bağlantı yapıları

Şekil 2.9'da görülen farklı hibrit yapıların performans ve verimlilik açısından avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Tez çalışmasında yukarıda verilen hibrit yapılar ile birlikte farklı yapılar da test edilerek performans ve verimlilik açısından bir karşılaştırma yapılmıştır.

Hibrit elektrikli taşıtın hibritleştirme yapılarına ek olarak kullanılan kontrol yöntemleri (enerji yönetimi ve yük paylaşımı) de taşıt performansını ve verimini önemli ölçüde etkilemektedir (Ates vd., 2010; Chau, 2002; Erdinc vd., 2009a; 2009b; Gao, 2008; Jeong, 2005; Vural vd., 2009b; Uzunoglu ve Alam, 2008). Yapılan çalışmalarda en çok kullanılan kontrol yöntemi, bulanık mantık (Erdinc vd., 2009a; 2009b; Gao vd., 2008; Jeong vd., 2005; Li vd., 2009; Vural vd., 2009b) ile yük paylaşımında tercih edilen dalagacık dönüşümünün (Ates vd., 2010;

Erdinc vd., 2009a;2009b; Uzunoglu ve Alam, 2008; Zhang vd., 2008) birlikte kullanıldığı enerji yönetimi ve yük paylaşımı algoritmalarıdır.

2.5 Tez Çalışmasının Katkıları

Tez çalışmasında hem benzetim hem de deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçların irdelenmesi ile elektrikli taşıtlar için en iyi güç biçimlendirme ünitesi, en iyi enerji yönetim stratejisi ve en iyi hibrit yapı elde edilmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte gerçekleştirilen tüm bu çalışmalarla, elektrikli taşıtlar ile ilgili bilimsel literatüre, ülke ekonomisine ve geleneksel taşıt sistemlerinin olumsuz çevresel etkilerini azaltmaya yönelik katkı sağlanması da hedeflenmiştir. Hedeflenen bu katkılar aşağıda detaylandırılmıştır.

2.5.1 Öngörülen ekonomik ve çevresel katkılar

Ernst&Young 'ın 2007 yılında yaptığı bir araştırmada 2011 yılında dünyadaki yıllık toplam otomotiv üretiminin 70 milyona ulaşacağı öngörülmektedir. Türkiye ise 634.883 adet otomobil üretimi ile Orta ve Doğu Avrupa ülkeleri arasında 4. sıradadır. Ayrıca 2007 yılında ülkemizde üretilen otomobillerin 504 bini ihraç edilmiştir. Otomotiv Sanayi Derneği verilerine göre 2009 yılında otomobil üretimi, krizin etkisiyle 511 bine düşmüştür (www.osd.org.tr). Ancak dünya çapında büyük otomotiv üreticilerinin de krizden çok ciddi anlamda etkilendiği dikkate alınırsa sonraki yıllarda otomobil üretiminde tekrar bir artışın olacağı öngörülebilir. Böylece Türkiye'deki ve tüm dünyadaki otomobil pazarı göz önünde bulundurulursa gelecekte elektrikli taşıtların yurt içinde ve dışında geniş bir pazara sahip olacağı tahmin edilmektedir. Bu araştırma sonuçları dikkate alınırsa, bu tez çalışması ile ülkemizdeki öncü sektörler arasında bulunan otomotiv sektörünün ve hibrit elektrikli taşıtların gelişmesine paralel olarak ülkemiz ekonomisine katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

Ülkemizdeki içten yanmalı motorlara sahip taşıt sayısındaki artışın da etkisi ile CO₂ emisyonunun artışı Avrupa ülkelerindeki artıştan daha fazladır. Bu yönüyle elektrikli taşıtların kullanımının artması, ülkemizdeki CO₂ emisyonunun azalmasına katkı sağlayacaktır. Bilindiği gibi içten yanmalı motora sahip taşıtlar için gereken fosil yakıtlar bakımından yeterli bir kaynağımız bulunmamaktadır ve kullanılan fosil yakıtların büyük bir kısmı yurtdışından ithal edilmektedir. Bunun yanında hidrojen depolamada etkili olarak kullanılacak bor madenlerinin dünya rezervinin yaklaşık %63'ü ise ülkemizde bulunmaktadır. Bu açıdan bakılınca tez çalışması, sahip olduğumuz kaynakların daha etkin kullanımına da katkı sağlama potansiyeline sahiptir.

2.5.2 Bilimsel katkılar

Elektrikli taşıtlar ile ilgili sürdürülen bilimsel çalışmalar çok yönlü olmakla birlikte, bu çalışmaların belirli bir kısmı, güç biçimlendirme üniteleri, enerji yönetim stratejileri ve hibritleştirme yapıları üzerinedir. Hibritleştirmedeki amaç, ana kaynağın yeterli olmadığı durumlarda ihtiyaç olan gücü diğer kaynak ve enerji depolama sistemlerinden (BAT ve/veya UK) karşılamak, ayrıca frenleme anında da faydalı frenleme enerjisini geri kazanılmasını sağlamaktır. Bu nedenle güç (yük) paylaşımını sağlayacak en uygun hibritleştirme yapılması ve yine güç taleplerinin en iyi şekilde paylaşılması için bir enerji yönetiminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bunların yapılabilmesi için de uygun güç biçimlendirme ünitesi veya ünitelerine ihtiyaç vardır.

Bu tez çalışmasında, elektrikli taşıtlara yönelik yukarıda belirtilen çalışma alanları ile ilgili hem benzetim hem de deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek, elektrikli taşıtların gelişimine katkı sağlanması hedeflenmiştir.

Bu yönüyle gerçekleştirilen çalışmalarda;

- UK'larda sıcaklık etkisi de dikkate alınarak ve deneysel doğrulaması yapılarak dinamik bir UK modeli ortaya konulmuştur.
- Faydalı frenleme enerjisini daha iyi kazanabilmeye yönelik ilk kez çift yönlü kaskad bir güç dönüştürücü topoloji kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışma ile, literatürde en fazla kullanılan topolojiye kıyasla daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.
- Elektrikli taşıtlar ile ilgili uygulamalarda enerji yönetiminin tek başına kullanılması yerine bir yük paylaşımı algoritması (wavelet) ile birlikte kullanılmasının daha başarılı olacağı, deneysel ve simülasyon çalışmaları ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.
- Elektrikli taşıtlarda ilk kez kullanılan çok girişli çift yönlü bir güç dönüştürücü topolojisi ile performans ve yakıt (hidrojen) tüketimi açısından çok daha başarılı sonuçlar alınmıştır.
- Ana kaynağın YH veya batarya olması durumunda kullanılacak UK'nın, çift yönlü düşürücü ve yükseltici olarak çalışabilen bir dönüştürücü ile sisteme bağlanmasının, performans ve verimlilik açısından daha etkili olduğu gösterilmiştir.

Ayrıca hedeflenen bu katkıları belirtmek üzere, benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların tamamına yakını ulusal/uluslararası konferanslarda sunulmuş ve uluslararası hakemli dergilerde yayımlanmıştır.

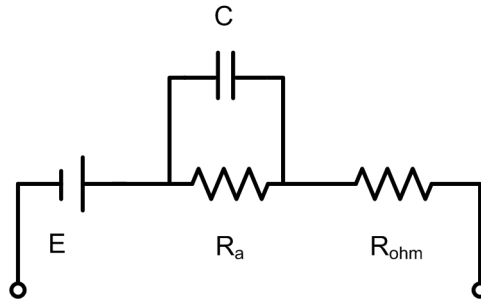
3. GÜÇ DÖNÜŞTÜRME ÜNİTESİ, ENERJİ YÖNETİMİ, HİBRİT BAĞLANTI TOPOLOJİLERİ İLE İLGİLİ MODELLEME VE BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, yapılmış olan benzetim çalışmaları, benzetim çalışmalarında kullanılan sistem bileşenlerinin dinamik modelleri, taşıt sürüş çevrimleri ve kontrol yöntemleri detaylıca açıklanmıştır.

3.1 Sistem Bileşenlerinin Modellenmesi

3.1.1 PEM YH dinamik modeli

PEM YH modelinin oluşturulmasında yararlanılan Şekil 3.1’de elektriksel eşdeğer devre, Pathapati vd.’lerin yapmış olduğu çalışmadan referans alınmıştır (Pathapati vd., 2005). PEM YH’nin dinamik benzetim modeli, YH geriliminde kayıpların etkisiyle oluşan değişimin basınç, sıcaklık ve akım gibi parametrelere bağlı olarak matematiksel ifadeler kullanılarak MATLAB&Simulink® ortamında oluşturulmuştur.



Şekil 3.1 PEM YH elektriksel eşdeğer devre

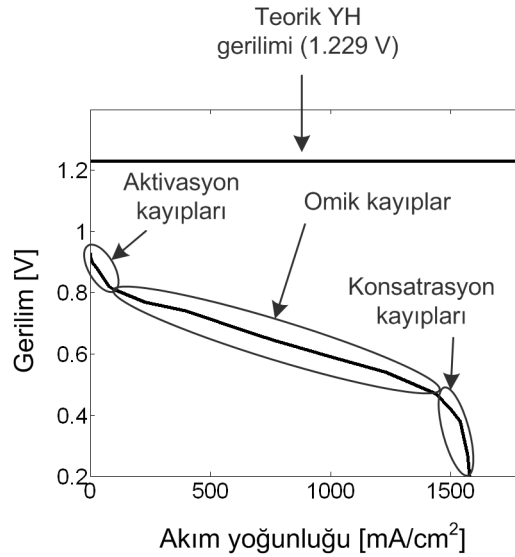
PEM YH modelinde kullanılan parametreler aşağıda Çizelge 3.1’de görülmektedir.

Çizelge 3.1 YH modeli parametreleri

A	Hücre başına aktivasyon alanı (cm^2)
B	PEM YH sistemindeki aktivasyon gerilim düşümü sabit (V)
C	YH çift katman eşdeğer kapasitesi (F)
C_{O_2}	Çözünmüş oksijenin sıvı/gaz ara yüzündeki konsantrasyonu
E_{Nernst}	Nernst anlık gerilimi (V)
F	Faraday sabiti (C/kmol)
I_{YH}	YH akımı (A)
J	Akım yoğunluğu (A/cm)
J_{max}	Azami akım yoğunluğu (A/cm)
N_s	YH yığınındaki seri hücre sayısı
N_p	YH yığınındaki paralel hücre sayısı
P_{H_2}	Hidrojen kısmi basıncı (atm)
P_{O_2}	Oksijen kısmi basıncı (atm)
q_{H_2}	Hidrojen akış miktarı (kmol/s)
r_m	Proton geçirgen zardaki Nafion'nun öz direnci ($\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{m}$)
R_a	Aktivasyon ve konsantrasyon dirençlerinin toplam eşdeğeri (Ω)
R_c	Zar ve elektrotlar arasındaki temas yüzeyinin direnci (Ω)
R_m	Zarın eşdeğer direnci (Ω)
R_{ohmic}	YH'nin omik iç direnci (Ω)
T	YH sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$)
$T_0, T_{rb}, T_{ic}, T_{it}$	YH sıcaklığı değişimi kullanılan ampirik parametreler
U	Düzeltilme katsayısı
V_{akt}	Aktivasyon gerilim düşümü (V)
V_d	R_a üzerindeki gerilim düşümü (V)
V_{kons}	Konsantrasyon gerilim düşümü (V)
V_{omic}	Omik gerilim düşümü (V)
V_{FC}	YH gerilimi (V)
$V_{yığın}$	YH yığın gerilimi (V)
λ	Zardaki su içeriği
$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$	Aktivasyon gerilim düşümü için kullanılan katsayılar

Doğrudan hidrojen ve oksijen gazları ile beslenen ve içerisindeki elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu çıkışında sadece su oluşan bir YH'nin normal hava koşullarında (25 °C ve 1 atm) ideal gerilimi 1,299 V'tur. Ancak kayıplar nedeni ile bu değer daha alt seviyelere düşmektedir. YH geriliminin düşmesine neden olan bu kayıplar; aktivasyon, omik ve konsantrasyon kayıpları olarak üç gruba ayrılmaktadır.

Aktivasyon kayıpları, düşük akım yoğunluklarında oksijenin indirgenmesine ait kimyasal reaksiyonda meydana gelen kayıplardır. Yüksek akım yoğunluğu ise konsantrasyon kaybına neden olmaktadır ve YH gerilim seviyesinin düşmesinde büyük bir rol oynamaktadır. Omik kayıplar ise, YH'den akan akıma bağlı olarak, YH iç direnci üzerinde oluşan kayıplardır. YH akım-gerilim değişimi, buna bağlı olarak çalışma bölgeleri ve YH'deki kayıplar Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2 YH akım-gerilim eğrisi ve çalışma bölgeleri

Şekil 3.2' de de görüldüğü gibi YH için en verimli çalışma bölgesi, gerilim değişiminin diğer bölgelere nispeten daha az bir eğime sahip olduğu, omik kayıpların olduğu bölgedir (Barbir, 2005).

Yukarıda belirtilen YH'deki kayıplar dikkate alındığında YH'nin çıkış gerilimi temel olarak (Andujar vd., 2008; Park ve Choe, 2008);

$$V_{YH} = E_{Nernst} - V_{akt} - V_{kons} - V_{omik} \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eşitlikteki Nernst anlık gerilimi (Mann vd, 2000, Xue vd., 2004);

$$E_{Nernst} = 1.229 - (8.5 \times 10^{-4})(T - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} \times T \times \ln(P_{H_2} + \frac{1}{2}P_{O_2}) \quad (3.2)$$

olarak gösterilmektedir. Eşitlik 3.2' deki oksijen ve hidrojen kısmi basınçları alt ve üst sınır değerleri arasında, akım ile ters orantılı olarak değişmektedir. Buradaki sıcaklık değişiminin ifadesi (Zhang vd., 2006);

$$T = 273 + T_0 + (T_0 - T_{rt} + T_{ic} \times I_{YH})(1 - \exp(-\frac{t \times I_{YH}}{T_{it}})) \quad (3.3)$$

şeklindedir.

YH gerilim ifadesindeki (Eşitlik 3.1) aktivasyon kayıpları ise (Pathapati vd., 2005; Adzakpa vd., 2008);

$$V_{akt} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln(I_{YH}) + \xi_4 \ln(C_{O_2}) \quad (3.4)$$

şeklindedir. Eşitlik 3.4'deki çözülmüş oksijenin sıvı/gaz ara yüzeyindeki konsantrasyonu (Khan ve Iqbal, 2005; Pathapati vd., 2005);

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^6 \exp(-498/T)} \quad (3.5)$$

olarak hesaplanabilmektedir.

YH gerim ifadesindeki (Eşitlik 3.1) omik kayıplar ise, YH'nin elektriksel iç direnci ile katı haldeki polimer elektrodun proton iletkenliğine bağlı olarak (Andujar vd., 2008),

$$V_{omik} = I_{YH} \times R_{omik} = I_{YH} \times (R_m + R_c) \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buradaki eşdeğer zar direnci,

$$R_m = \frac{r_m \times \ell}{A}, \quad (3.7)$$

şeklindedir.

YH' nin akım yoğunluğu,

$$J = \frac{I_{YH}}{A} \quad (3.8)$$

olarak ifade edilmekte olup, Eşitlik 3.7'deki Nafion zarın öz direnci ise (Mann vd., 2000;

Andujar vd., 200),

$$r_m = \frac{181.6[1 + 0.03 \times J + 0.062 \times (\frac{T}{303})^2 \times J^{2.5}]}{[\lambda - 0.634 - 3 \times J] \exp[4.18 \times (\frac{T - 303}{T})]} \quad (3.9)$$

şeklindedir.

YH gerilim ifadesindeki konsantrasyon kayıpları ise (Park ve Choe, 2008),

$$V_{kons} = B \times \ln(1 - \frac{J}{J_{maks}}) \quad (3.10)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

YH'nin elektriksel eşdeğer devresinde (Şekil 3.1) yer alan ve aktivasyon ile konsantrasyon kayıplarını simgeleyen R_a direncinin değişimi (Adzakpa vd., 2008),

$$R_a = \frac{V_{akt} + V_{kons}}{I_{YH}} \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada YH eşdeğer devresindeki çift katmanlı kapasitör de dikkate alındığında R_a direnci üzerindeki gerilim düşümü (Khan ve Iqbal, 2005; Pathapati vd., 2005),

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{I_{YH}}{C} - \frac{V_d}{R_a \times C} \quad (3.12)$$

olarak elde edilmektedir. Buna göre YH'nin çıkış geriliminin değişimi yeniden yazılırsa (Khan ve Iqbal, 2005; Adzakpa vd., 2008),

$$V_{YH} = E_{Nernst} - V_d - V_{omik} \quad (3.13)$$

şeklinde olacaktır. Böylece bir YH yığımındaki bir hücreye ait gerilim ifadesi elde edilmiştir. Ancak YH yığını seri olarak N_s sayıdaki YH'lerden meydana gelmiş ise YH yığının gerilimi,

$$V_{Yığım} = N_s \times V_{YH} \quad (3.14)$$

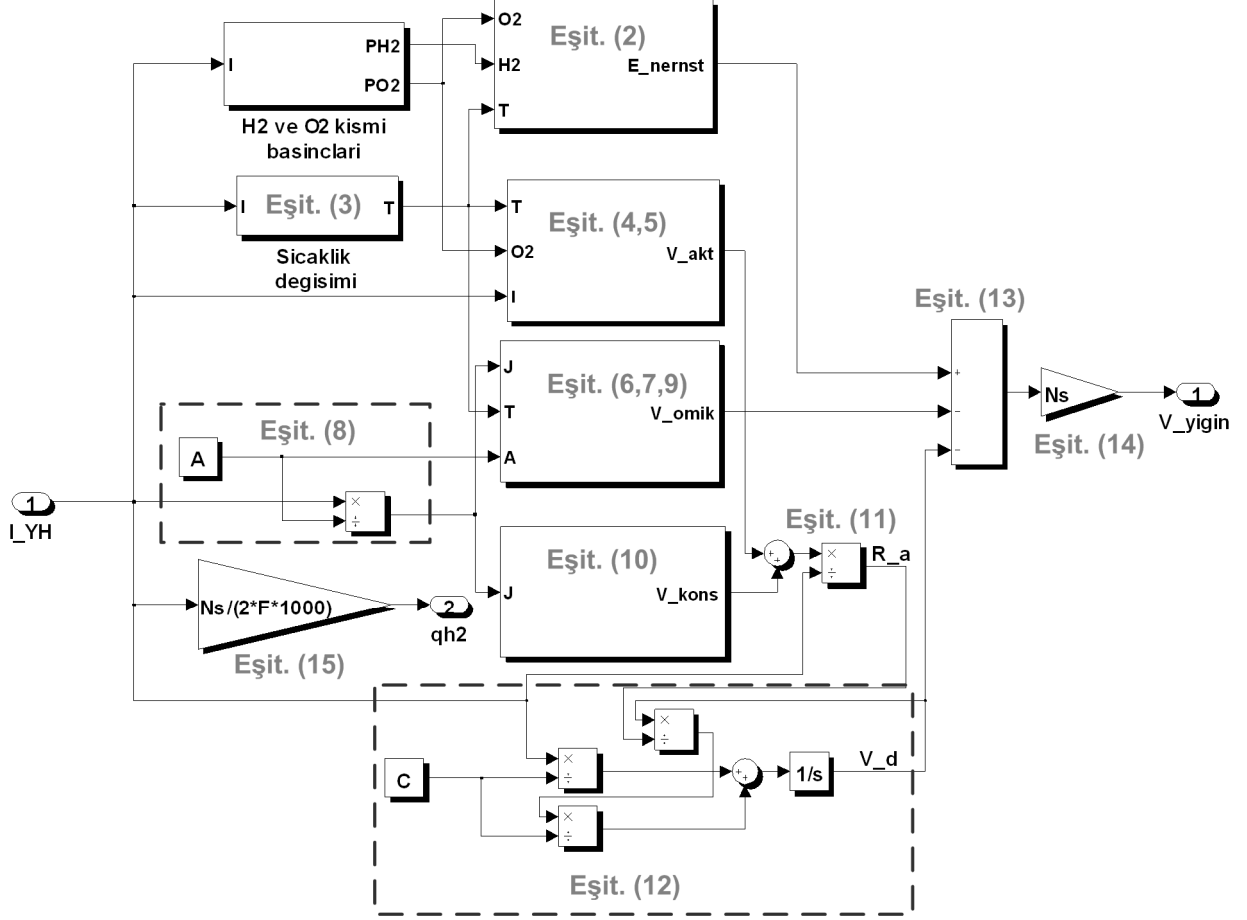
şeklinde hesaplanmaktadır.

Tüm eşitliklere ek olarak YH sisteminin hidrojen tüketimi ise (Xue vd., 2004);

$$q_{H_2} = \frac{I_{YH} \times N_s}{2F} \times 10^{-3}, \quad (3.15)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Sonuç olarak yukarıda verilen tüm bu eşitlikler kullanılarak elde edilen PEM YH dinamik modelinin MATLAB&Simulink ortamındaki görünümü ise Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3 YH (MATLAB&Smulink ortamındaki) dinamik modeli

3.1.2 Lityum-iyon batarya dinamik modeli

Benzetim çalışmalarında kullanılan lityum-iyon bataryanın dinamik modeli oluşturulurken Chen ve Mora'nın deneysel doğrulamasını yaptıkları çalışma referans alınmıştır (Chen ve Mora, 2006). Bu çalışmada sıcaklık ve zamana bağlı kapasite kaybının etkileri de eklenerek batarya modeli geliştirilmiştir (Erdinc, 2009c). MATLAB&Simulink ortamında oluşturulan modelde kullanılan parametreler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Batarya modeli parametreleri

V_{bat}	Batarya çıkış gerilimi(V)
V_{oc}	Batarya açık devre gerilimi (V)
Z_{eq}	Batarya eşdeğer iç empedansı (Ω)
i_{bat}	Batarya akımı (A)
$\Delta E(T)$	Gerilimde sıcaklık düzeltme katsayısı (V)
SOC_{init}	Başlangıç şarjlılık durumu
C_{usable}	Kullanılabilir batarya kapasitesi (Ah)
T	Sıcaklık ($^{\circ}C-^{\circ}K$)
t	Depolama süresi (ay olarak)
Q_n	Bataryanın negatif elektrodunda şarjlılık durumundaki değişim
N	Çevrim (şarj-deşarj) sayısı
k_1	Bataryanın negatif elektrodunda şarjlılık durumundaki değişim için katsayı (çevrim ⁻²)
k_2	Bataryanın negatif elektrodunda şarjlılık durumundaki değişim için katsayı (çevrim ⁻¹)
k_3	Çevrim direncindeki (R_{cycle}) değişim için katsayı ($\Omega/\text{çevrim}^{1/2}$)
CCF	Kapasite düzeltme katsayısı
C_{init}	Başlangıç batarya kapasitesi (Ah)

Bataryaya ait gerilim eşitliği, batarya açık devre gerilimine, eşdeğer iç empedansındaki gerilim düşümüne ve sıcaklığın etkisine bağlı olarak,

$$V_{bat} = V_{OC} - i_{bat} \times Z_{eq} + \Delta E(T) \quad (3.16)$$

şeklinde yazılmaktadır. Bataryanın açık devre gerilimi, yüksüz durumda iki ucu arasındaki potansiyele eşittir ve şarjlılık durumu ile doğrudan ilişkilidir. Batarya açık devre gerilim eşitliği,

$$V_{oc} = -1.031 \times \exp(-35 \times SOC) + 3.685 + 0.2156 \times SOC - 0.1178 \times SOC^2 + 0.321 \times SOC^3 \quad (3.17)$$

şeklindedir. Şarjlılık durumu ise,

$$SOC = SOC_{init} - \int (i_{bat} / C_{usable}) dt \quad (3.18)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada bataryanın kullanılabilir kapasitesi,

$$C_{usable} = C_{init} \times CCF \quad (3.19)$$

şeklindedir. Eşitlikteki CCF katsayısı ise,

$$CCF = 1 - \% \text{ depolama kaybı} \quad (3.20)$$

şeklindedir. Buradaki depolama kaybı, çevrim sayısına ve bataryanın üretiminden itibaren geçen süreye bağlıdır. Yüzde depolama kaybı,

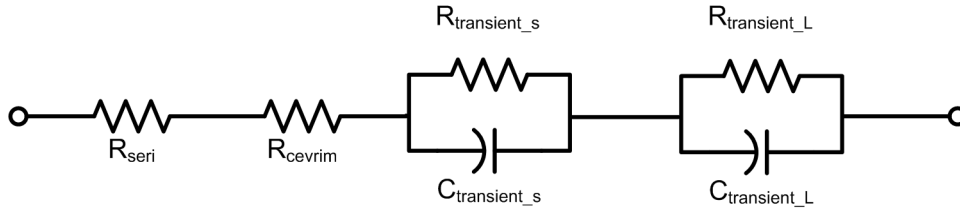
$$\% \text{ depolama kaybı} = 1.544 \times 10^7 \times \exp(40498 / (8.3143 \times T)) \times t \quad (3.21)$$

olarak ifade edilmektedir. Batarya negatif elektrodunun şarjlılık durumu, çevrim sayısına bağlıdır ve kapasite kaybında en etkili parametredir. Sıcaklığa ve çevrim sayısına bağlı olarak negatif elektrodun şarjlılık durumu değişimi,

$$(d\theta_n / dN) = k_1 N + k_2 \quad (3.22)$$

şeklindedir.

Batarya gerilim ifadesindeki diğer bir parametre, batarya eşdeğer iç empedansına bağlı gerilim düşümüdür. Batarya eşdeğer empedansına ait devre Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4 Batarya empedansı eşdeğer devresi

Batarya eşdeğer devresindeki $R_{cevrım}$ hariç diğer tüm elemanların değerleri batarya şarjlılık durumuna bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bu eşitlikler,

$$R_{seri} = 0.1562 \times \exp(-24.37 \times SOC) + 0.07446, \quad (3.23)$$

$$R_{transient\ s} = 0.3208 \times \exp(-29.14 \times SOC) + 0.04669, \quad (3.24)$$

$$C_{transient\ s} = 752.9 \times \exp(-13.51 \times SOC) + 703.6, \quad (3.25)$$

$$R_{transient\ L} = 6.603 \times \exp(-155.2 \times SOC) + 0.04984, \quad (3.26)$$

$$C_{transient\ L} = -6056 \times \exp(-27.12 \times SOC) + 4475 \quad (3.27)$$

şeklindedir. Eşdeğer devredeki $R_{cevrım}$ ifadesi ise,

$$R_{cevrım} = k_3 \times N^{1/2} \quad (3.28)$$

olarak hesaplanmaktadır.

Çizelge 3.2'de verilen ve Eşitlik (3.22) ve (3.27)'de kullanılan k_1 , k_2 ve k_3 katsayılarının

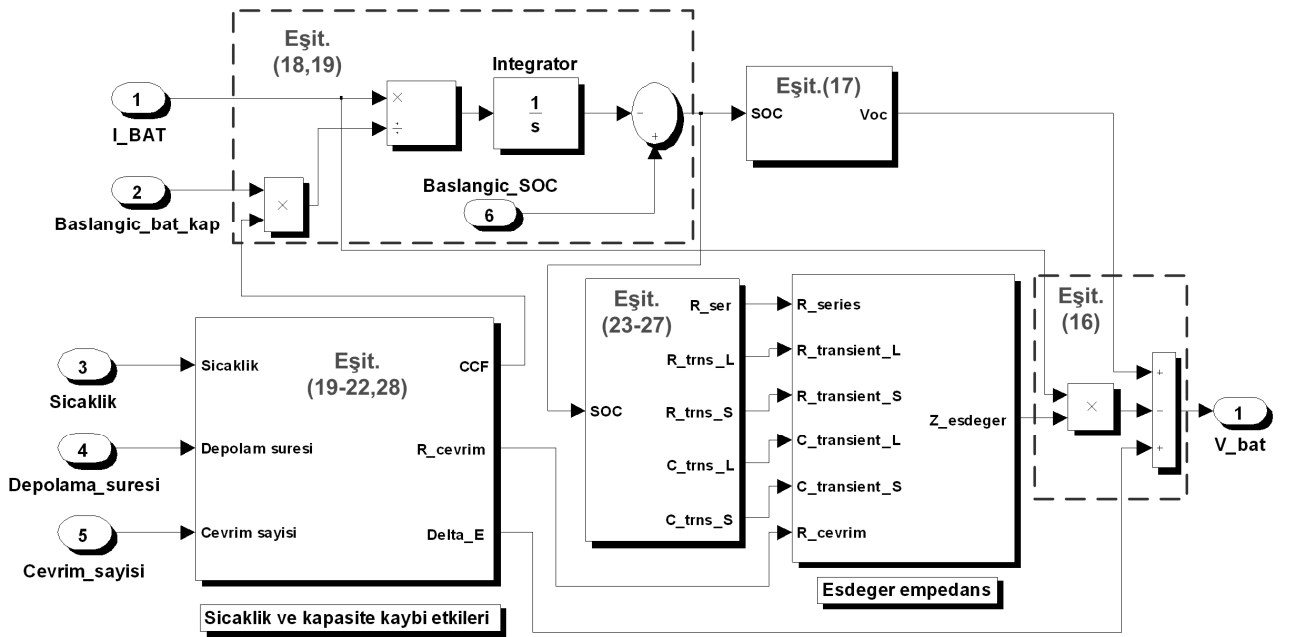
çevrim sıcaklığına bağlı olarak değişimleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 k_1 , k_2 ve k_3 katsayılarının çevrim sıcaklığına bağlı değerleri

Çevrim sıcaklığı (°C)	k_1 (çevrim ⁻²)	k_2 (çevrim ⁻¹)	k_3 (Ω /çevrim ^{1/2})
25	8.5×10^{-8}	2.5×10^{-4}	1.5×10^{-3}
50	1.6×10^{-6}	2.9×10^{-4}	1.7×10^{-3}

Batarya gerilimi eşitliğindeki (Eşitlik 3.16) bir diğer parametre olan sıcaklık düzeltme katsayısının (ΔE) değeri ile ilgili olarak, Gao vd.’lerinin yapmış olduğu çalışmadan yararlanılmıştır (Gao vd., 2002).

Batarya için yukarıda verilen eşitlikler kullanılarak MATLAB&Simulink ortamında oluşturulan model Şekil 3.5’de görülmektedir.



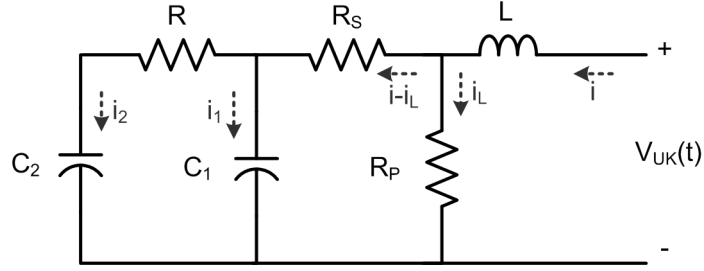
Şekil 3.5 Batarya dinamik modeli

3.1.3 Ultra-kapasitör dinamik modeli

Benzetim çalışmalarında kullanılan UK modelinde Vural vd.’lerinin yapmış olduğu çalışmadan faydalanılmıştır (Vural vd., 2009). Bu çalışmada da belirtildiği gibi, UK modeli ile ilgili literatürdeki diğer çalışmaların bir kısmında sıcaklık etkisi ihmal edilirken, çalışmaların çoğunda ise sadece belirli bir kapasite ve gerilim değerindeki UK’lar dikkate

alınmıştır. Bunun yanında bazı modeller çok karmaşık yapılarından dolayı, benzetim çalışmalarında sisteme entegre edildiklerinde çalışma süresinin uzamasına sebep olmaktadır. Bu çalışmada, sıcaklık etkisi dikkate alınarak birden çok UK tipi için deneysel doğrulama da yapılarak bir model geliştirilmiştir.

MATLAB&Simulink ortamında oluşturulan dinamik UK modeli için referans alınan eşdeğer elektriksel devre Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6 UK elektriksel eşdeğer devresi

Eşdeğer devredeki R ve C₂ elemanları yavaş kol elemanları olarak adlandırılmakta ve şarj-deşarj sonrasında UK'daki enerjinin dağılımını sağlamaktadırlar. R_s ve C₁ elemanları ise hızlı kol elemanları olarak adlandırılmaktadır. Bu elemanlar UK'nın (akım veya yükteki) hızlı değişimlere cevap verebilmesini sağlamaktadırlar. Ayrıca bu elemanlardan C₁, UK'nın kapasite değerinin asıl kısmını oluşturmaktadır. R_s ise UK'nın eşdeğer seri direncine karşılık gelmektedir. Devredeki R_p, UK'nın paralel eşdeğer direncidir ve UK boşta iken self-deşarja neden olan eleman olarak kabul edilmektedir. Son olarak L endüktansı ise çok küçük değere sahip olmakla birlikte, anlık akım değişimlerine karşılık UK'nın göstermiş olduğu endüktif etkiyi belirtmektedir. Eşdeğer devrede belirtilemeyen ve UK modelinde kullanılacak parametreler ise Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 UK dinamik modelindeki parametreler

$R_S(T)$	UK eşdeğer seri direnci (Ω)
C_1	UK ana kapasitörü (F)
R	Yavaş kol direnci (Ω)
C_2	Yavaş kol kapasitörü (V)
R_P	UK paralel eşdeğer direnci (Ω)
L	UK eşdeğer seri endüktansı (H)
V_{UC}	UK çıkış gerilimi (V)
ΔV_{UC}	UK çıkış gerilimindeki değişim (V)
V_{C1}	C_1 uç gerilimi(V)
V_{C2}	C_2 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_L	L üzerindeki akım(A)
i_1	C_1 şarj/deşarj akımı (A)
i_2	C_2 şarj/deşarj akımı (A)
TCF	R_S elemanın değeri için sıcaklık düzeltme katsayısı
ESR	UK kataloğunda belirtilen eşdeğer seri direnç (Ω)
C_0	C_1 kapasitesinin sabit bileşeni (F)
C_V	C_1 (A) kapasitesinin gerilim ile değişen bileşeni
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
Q	UK şarj/deşarj yükü (C)
Δt	Zaman değişimi (s)
I_C	UK kaçak akımı

UK eşdeğer devresinden yararlanarak UK'nın uç gerilimi,

$$V_{UK} = V_{C_1} - V_{R_S} - V_L \quad (3.29)$$

şeklinde yazılmaktadır. Buradaki R_S ve L elamanlarının gerilimleri sırası ile,

$$V_{R_S} = R_S \cdot (i - i_L) \quad (3.30)$$

$$V_L = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (3.31)$$

şeklindedir.

C_1 ve C_2 elemanlarının uç gerilimleri ise sırası ile,

$$V_{C_1} = V_C^0 - \frac{1}{C_1} \cdot \int i_1 dt \quad (3.32)$$

$$V_{C_2} = V_C^0 - \frac{1}{C_2} \cdot \int i_2 dt \quad (3.33)$$

olarak ifade edilmektedir. Yukarıdaki eşitliklerde geçen akım ifadeleri de,

$$i_L = \frac{V_{R_p}}{R_p}, \quad (3.34)$$

$$i_1 = i - i_L - i_2, \quad (3.35)$$

$$i_2 = \frac{V_{C_1} - V_{C_2}}{R} \quad (3.36)$$

şeklindedir.

R_s 'nin değeri,

$$R_s(T) = TCF \times ESR, \quad (3.37)$$

ESR ve TCF'ye bağlı olarak değişmektedir. Burada ESR, modelde referans alınacak UK'nın tipine göre üretici tarafından belirtilen eşdeğer seri direncidir. TCF için Vural vd.'lerinin yaptığı çalışmada da belirtilen, Maxwell® firmasının yapmış olduğu ve yayınladığı bir çalışmadan yararlanılmıştır (Vural vd., 2009). TCF değeri,

$$TCF = -3.5 \times 10^{-7} T^3 + 7.7 \times 10^{-5} T^2 - 0,0054T + 1.1 \quad (3.38)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

UK'nın eşdeğer devresindeki C_1 ve C_2 elemanlarının ve alt bileşenlerinin değerleri ise,

$$C_1 = C_0 + C_V \cdot V_{C_1} \quad (3.39)$$

$$C_2 = \frac{Q}{V_{UK}} - \left(C_0 - \frac{1}{2} \cdot C_V \cdot V_{UK} \right) ,, \quad (3.40)$$

$$C_0 = \frac{1}{dV_{UC}/dt(0)} , \quad (3.41)$$

$$Q = \int i dt , \quad (3.42)$$

$$C_V = \frac{2}{V_{UC}^2} \times (Q - C_0 \cdot V_{UC}) \quad (3.43)$$

olarak hesaplanmaktadır. Yavaş koldaki R direncinin hesabı ise,

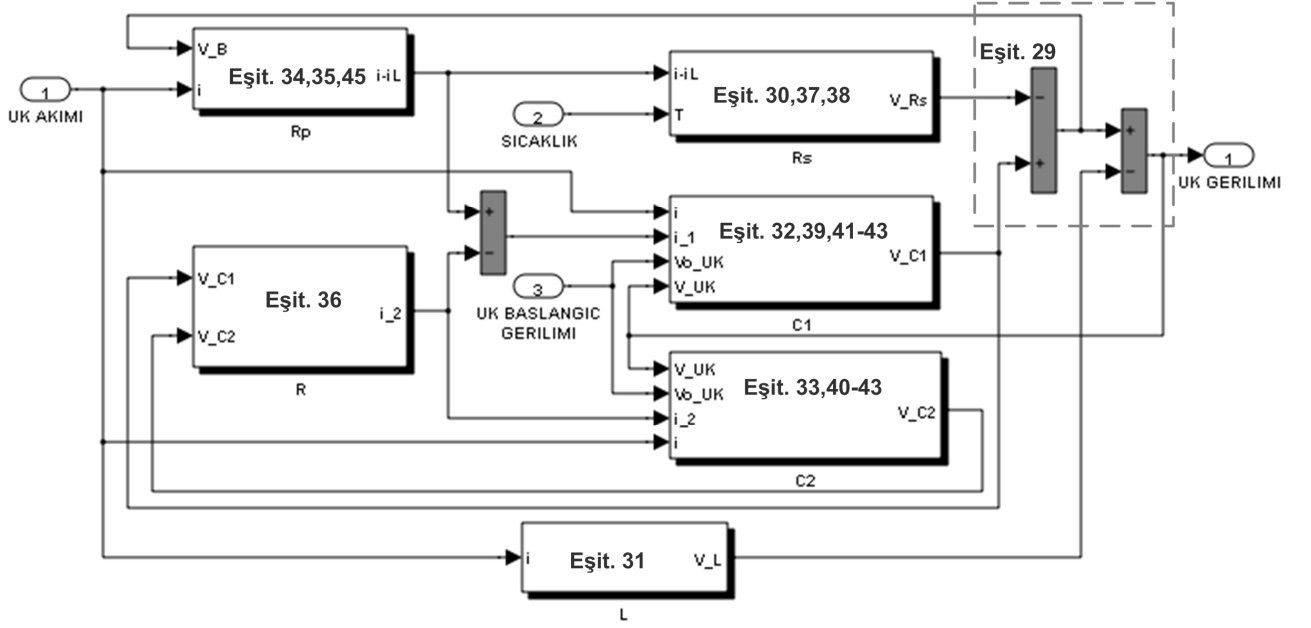
$$R = \frac{V_{C_1} \cdot \Delta t}{C_1 \cdot \Delta V_{UC}} \quad (3.44)$$

şeklindedir. Paralel eşdeğer direncin (R_p) hesaplanmasında, modelde referans alanıcağ UK tipi için üretici tarafından belirtilen kaçak akım (I_C) değerinden faydalanılmaktadır. Bu durumda R_p ,

$$R_p = \frac{V_{UK_{MAX}}}{I_C} \quad (3.45)$$

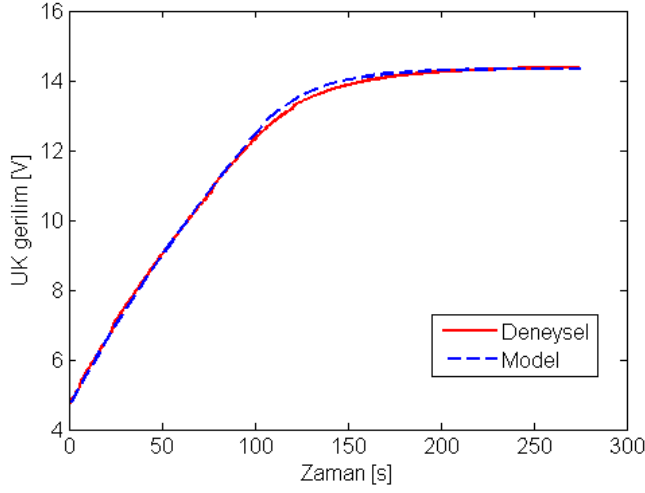
şeklinde hesaplanmaktadır. Eşdeğer devredeki son eleman L ise, UK'nın çok hızlı akım değişimlerine gösterdiği tepkiyi simgelemektedir. UK kHz seviyesindeki akım değişimlerine maruz kalmadığı kararlı durumlarda L'nin etkisi pek görülmemektedir. L'nin değeri nH'ler seviyesindedir ve UK tipine göre farklılık gösterebilir. Ancak bu değer aynı üreticinin farklı modelleri için yaklaşık olarak eşit kabul edilebilir.

UK ile ilgili yukarıda verilen eşitlikler kullanılarak elde edilen dinamik model Şekil 3.7'de görülmektedir.

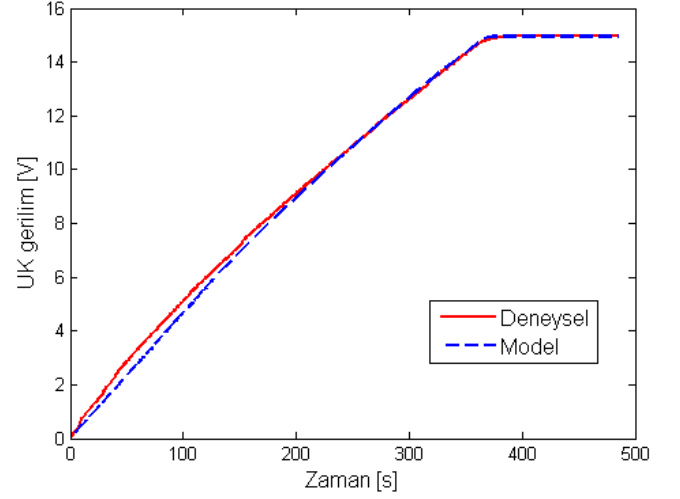


Şekil 3.7 MATLAB&Simulink ortamında oluşturulan UK dinamik modeli

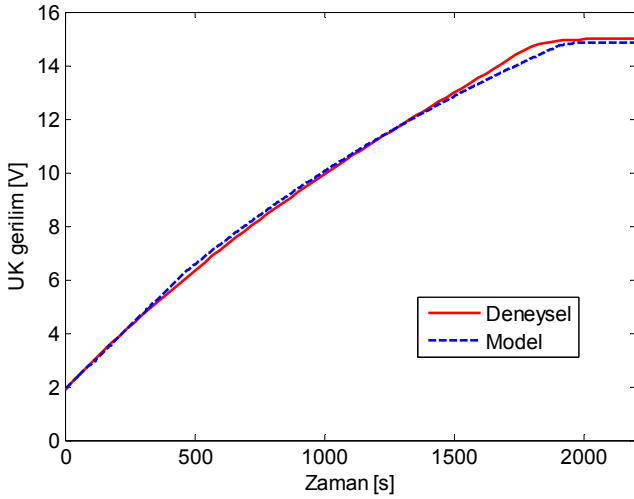
Elde edilen UK dinamik modeli için Maxwell'in ürettiği farklı UK tipleri ile deneysel şarj testleri yapılarak, modelin doğruluğu gözlemlenmiştir. Deneysel doğrulamalarda üç farklı model için 1,5 A sabit akım ile dört farklı şarj testi gerçekleştirilmiştir. Bu testlerden üçü oda sıcaklığında ($\sim 23^\circ\text{C}$), diğer test ise düşük sıcaklığın eşdeğer seri direnç üzerindeki etkisini daha iyi görebilmek için soğutucu içerisinde $\sim 8^\circ\text{C}$ 'de yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel testlere ait sonuçlar benzetim çalışmaları ile karşılaştırılmalı olarak Şekil 3.8 'de verilmiştir.



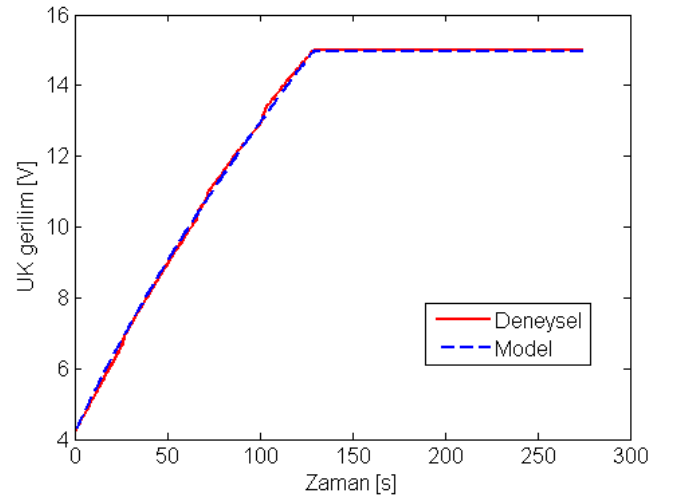
i - BPAK0020E20 (20F, 15V) modeli



ii - BMOD0350 (58F, 15V) modeli



iv - BMOD0430 (430F, 16,2V) modeli



v - BPAK0020E20 (20F, 15V) modeli, 8°C'de

Şekil 3.8 UK benzetim modeli için karşılaştırılmalı sonuçlar.

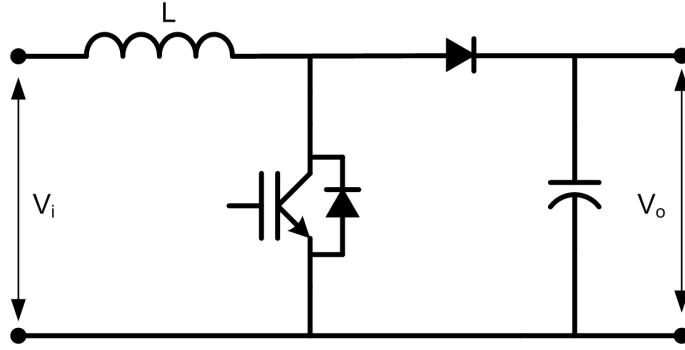
Şekil 3.8'de de görüldüğü üzere UK dinamik modeli, farklı UK tipleri ve sıcaklık değerleri için oldukça başarılı olmuştur.

3.1.4 Güç biçimlendirme ünitelerinin modelleri

Tez sürecinde gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında, her bir hibrit yapı için farklı yapıda dc-dc dönüştürücü modellerine gereksinim duyulmuştur. Gerekli her bir dc-dc dönüştürücü modeli ayrı olarak oluşturulmuştur.

3.1.4.1 Yükseltici tip dc-dc dönüştürücü

Yükseltici tip dc-dc dönüştürücü modeli, ana kaynağın (YH) güç kontrolünü sağlamak amacı ile oluşturulmuştur. Model için referans alınan dc-dc dönüştürücü topolojisi Şekil 3.9’da görülmektedir.

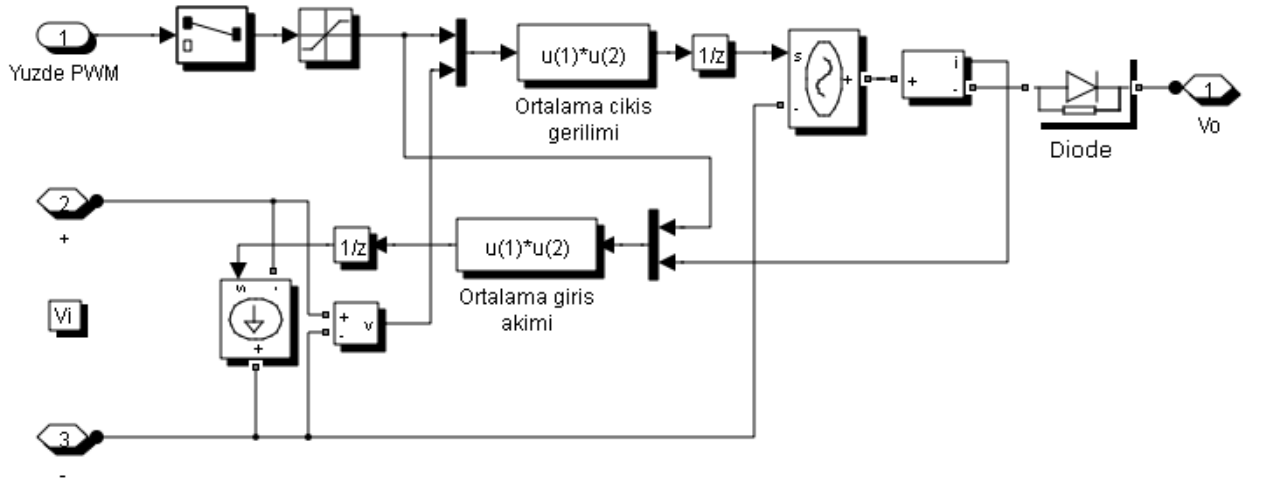


Şekil 3.9 Yükseltici tip dc-dc dönüştürücü topolojisi

Dönüştürücünün çıkış gerilimi “ d ” yüzde PWM olmak üzere,

$$V_o = \frac{V_i}{1-d} \quad (3.46)$$

şeklinde. Şekil 3.9’da verilen yükseltici tip dc-dc dönüştürücü için benzetim modeli Şekil 3.10’da görülmektedir.

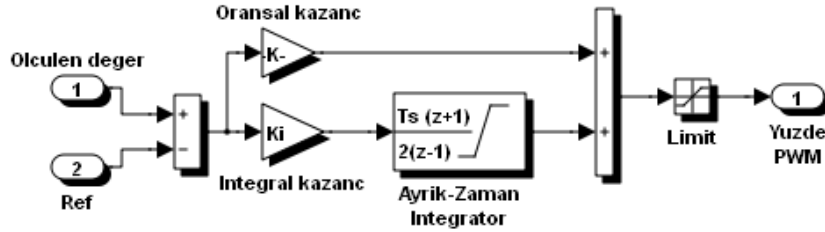


Şekil 3.10 Yükseltici tip dc-dc benzetim modeli

Dönüştürücü modeli, Şekil 3.10’da görüldüğü gibi bağımlı kaynaklar kullanılarak oluşturulmuştur. Böylece sistem entegrasyonundaki karmaşıklık azaltılarak, sistemin döngü

hatalarına girmeden daha hızlı çalışması sağlanmıştır.

Dönüştürücü iç kontrolünün (akım ve gerilim regülasyonun) sağlanabilmesi için modele PI tabanlı bir kontrolör eklenmiştir. Şekil 3.11’de modele eklenen PI kontrolör görülmektedir.

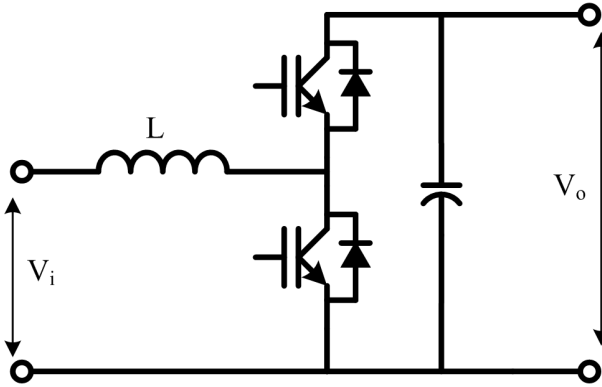


Şekil 3.11 Yükseltici tip dc-dc dönüştürücü için PI kontrolörü

PI kontrolörde kullanılan K_p ve K_i katsayıları sırası ile 0,005 ve 0,1’dir

3.1.4.2 Yarım köprü çift yönlü dc-dc dönüştürücü

Yarım köprü dc-dc dönüştürücü modeli, faydalı frenleme enerjisini de geri kazanabilecek şekilde enerji depolama üniteleri (UK ve batarya) ile birlikte kullanmak amacı ile oluşturulmuştur. Model için referans alınan topoloji Şekil 3.12’de görülmektedir.



Şekil 3.12 Yarım köprü çift yönlü dc-dc dönüştürücü topolojisi

Dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimleri arasındaki ilişki, “ d ” yüzde PWM olmak üzere ileri yönde,

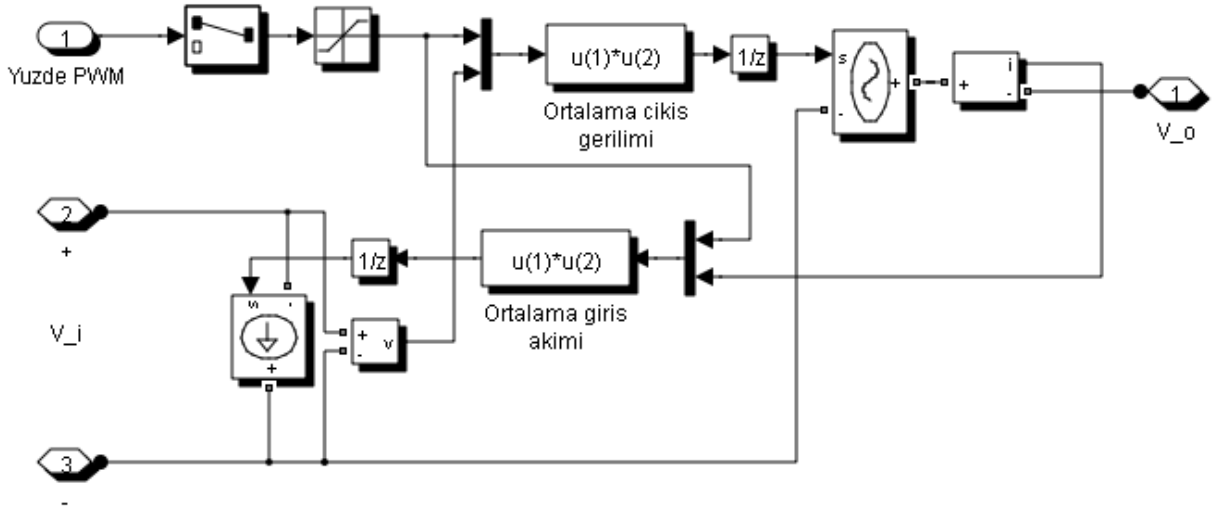
$$V_o = \frac{V_i}{1-d} \quad (3.47)$$

şeklindedir. Geri yönde ise,

$$V_i = V_o \times d \quad (3.48)$$

şeklindedir.

Yarım köprü çift yönlü dönüştürücü için oluşturulan benzetim modeli Şekil 3.13'de verilmiştir.

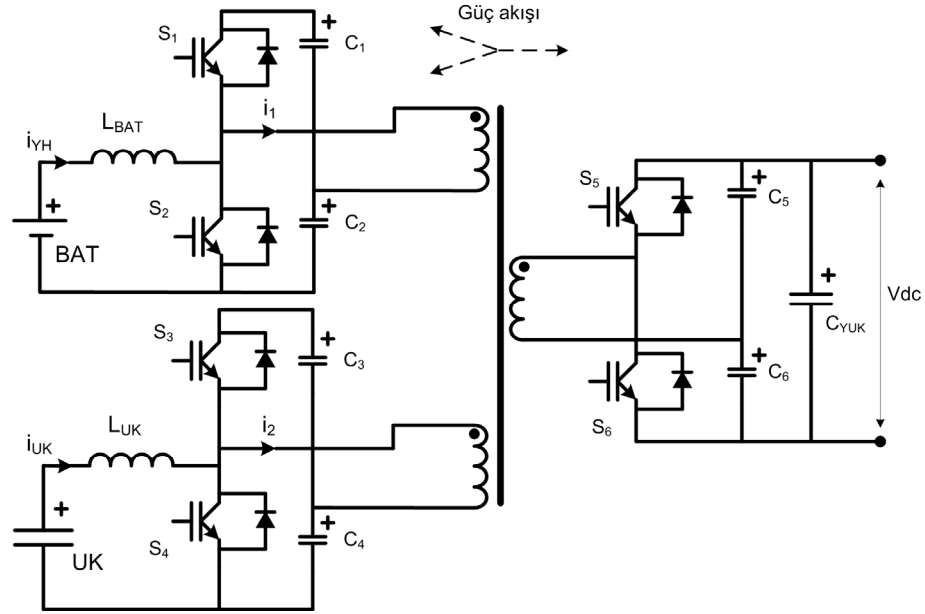


Şekil 3.13 Yarım köprü çift yönlü dc-dc dönüştürücü benzetim modeli

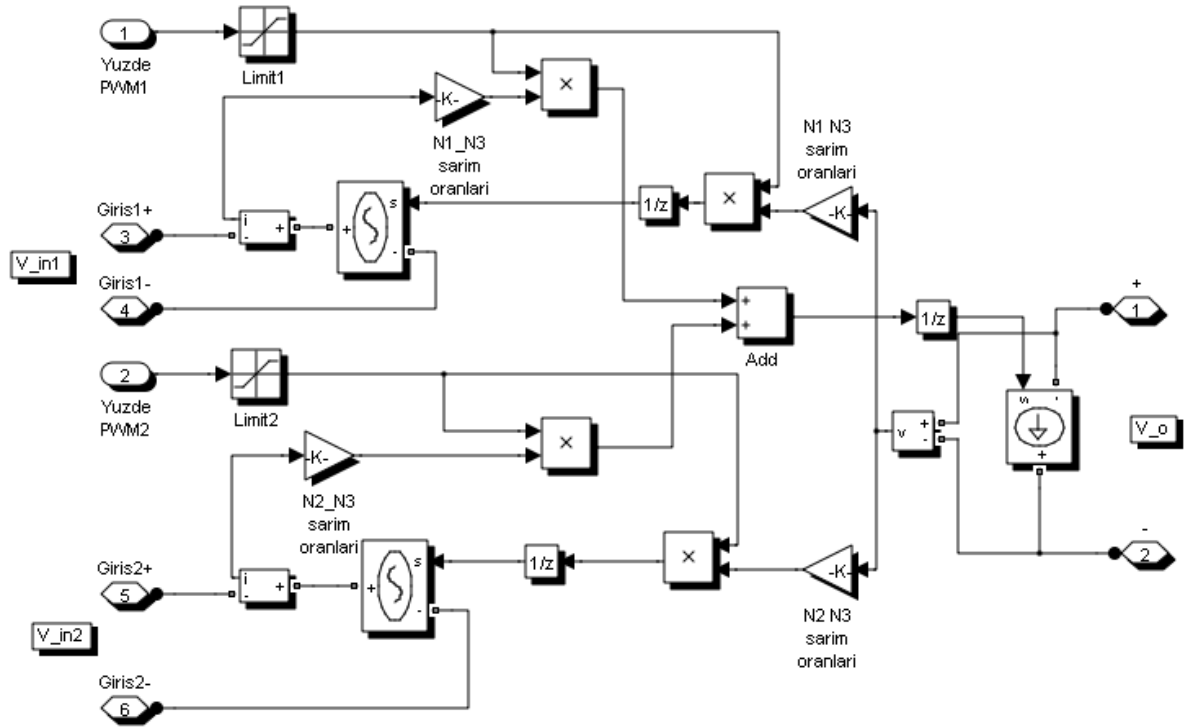
Yarım köprü çift yönlü dönüştürücü ile yükseltici tip dönüştürücü modelleri arasındaki fark, Şekil 3.10 ve 3.13'de de görüldüğü gibi çıkış diyodudur. Yükseltici tip dönüştürücü modeli oluşturulurken çift yönlü dönüştürücü modelinin çıkışına eklenen diyot ile modelin tek yönlü (ileri yönde) yükseltici olarak çalışması sağlanmıştır. Çift yönlü dönüştürücü modelinin kontrolü için ise Şekil 3.11'da görülen PI kontrolör modeli kullanılmıştır. K_p ve K_i katsayıları sırası ile 0,005 ve 0,1 olarak belirlenmiştir.

3.1.4.3 Çok girişli çift yönlü dc-dc dönüştürücü

Çok girişli çift yönlü dc-dc dönüştürücü modeli, ikili hibrit yapılar (YH/UK, YH/BAT veya BAT/UK) faydalı frenleme enerjisini de geri kazanabilecek şekilde kullanmak amacı ile oluşturulmuştur. Benzetim modeli için, detayları tezin 2.3 başlıklı kısmında anlatılan ve Şekil 3.14-a'da verilen topoloji referans alınmıştır. Bu topoloji için oluşturulan benzetim modeli Şekil 3.14-b'de görülmektedir.



a - Çok girişli çift yönlü dc-dc dönüştürücü topolojisi



b - Çok girişli çift yönlü dc-dc dönüştürücü MATLAB&Simulink ve SimPowerSystems modeli

Şekil 3.14 Çok girişli çift yönlü dc-dc dönüştürücü topolojisi ve benzetim modeli

Bu topolojinin her bir girişi birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmesi gerektiğinden, her bir giriş için Şekil 3.11'deki PI kontrolör modelinden birer adet kullanılmıştır. PI kontrolördeki K_p ve K_i katsayıları için önceki dönüştürücü modellerindeki aynı değerler

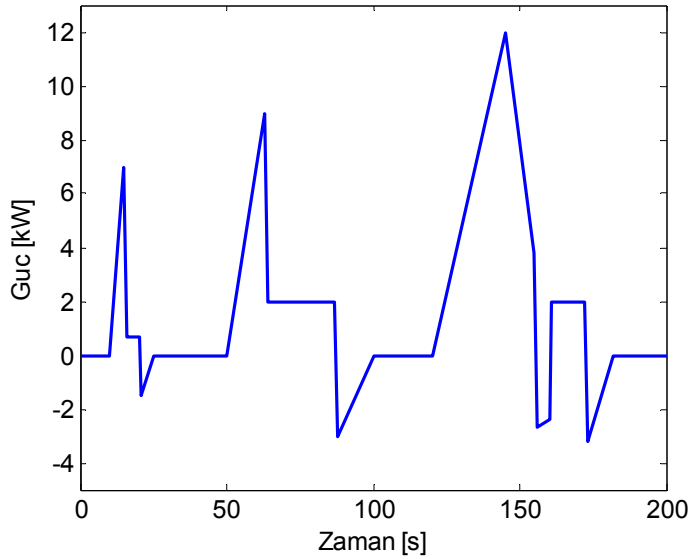
($K_p=0,005$ ve $K_i=0,1$) kullanılmıştır.

3.2 Farklı Bağlantı Topolojileri ve Kontrol Yöntemleri için Benzetim Çalışmalarının Yapılması

Tez süresince gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında üç farklı hibrit topoloji ve iki farklı kontrol yöntemi kullanılmıştır. Yapılan bu benzetim çalışmalarında hem şehir içi hem de şehirlerarası yol şartlarında yüklenme yapabilmek için iki farklı sürüş çevrimi (ECE-15 ve UDDS) modeli referans alınmıştır. Sürüş çevrimi temel olarak, tasarlanan bir sistemin test ortamında dinamik cevabını değerlendirmek ve genel yapısında iyileştirmeler yapabilmek amacıyla ile sistemi yüklemek için kullanılmaktadır.

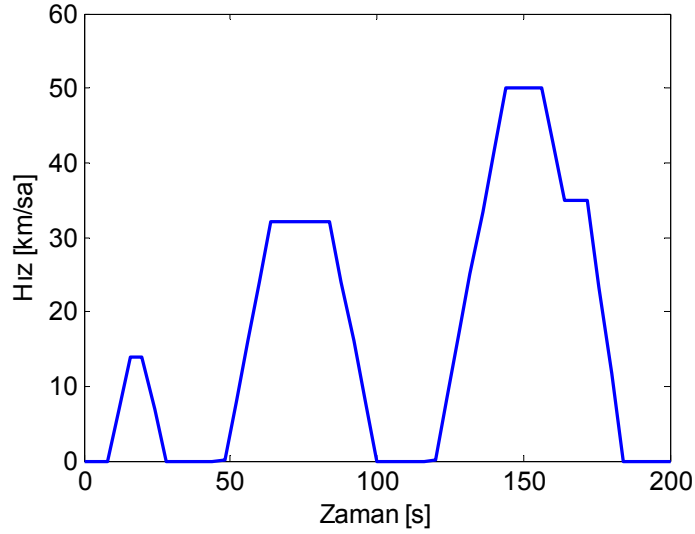
3.2.1 Sürüş çevrimleri

Benzetim çalışmalarında kullanılan sürüş çevrimlerinden ilki, Avrupa standart sürüş çevrimlerinden biri olan “The Urban Driving Cycle - ECE-15” ’e ait güç-zaman eğrisi Şekil 3.15’de verilmiştir.



Şekil 3.15 ECE-15 sürüş çevrimine göre güç talebi.

Anlık farklı yüklenmeleri içeren bu yük profili hibrit bir sistemin performansını değerlendirmek açısından oldukça uygun kabul edilmektedir. ECE-15’in zamana bağlı olarak hızlanma eğrisi ise Şekil 3.16’da verilmiştir.



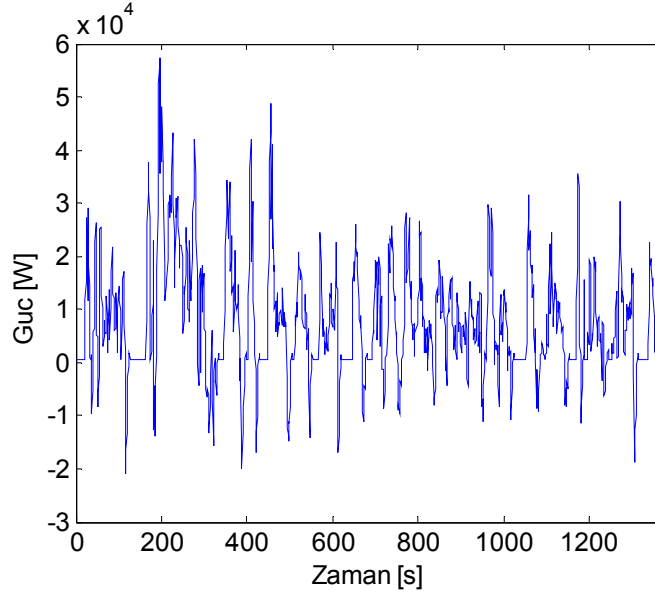
Şekil 3.16 ECE-15 sürüş çevrimine göre taşıt hızının zamana bağlı olarak değişimi.

Şekilde de görüldüğü üzere sürüş çevrimi içerisindeki maksimum hız 50 km/sa'tir. Ayrıca ECE-15 sürüş çevrimi 200 saniye boyunca çeşitli ivmelenmeler ve yavaşlamaları da içermektedir. Bu sürüş çevrimine ait özellikler Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5 ECE-15 sürüş çevriminin özellikleri

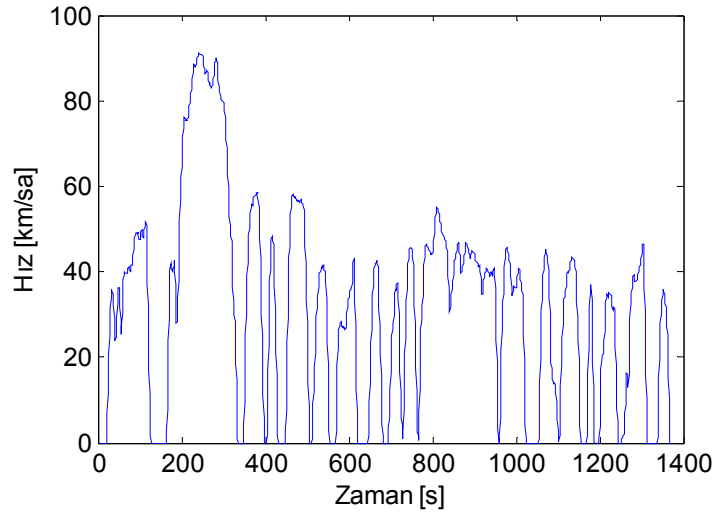
Zaman	200 (s)
Menzil	1,05 (km)
Azami hız	50 (km/sa)
Ortalama hız	18,9 (km/sa)
Azami ivmelenme	1,39 (m/s ²)
Boşta çalışma zamanı	58,4 (s)

Benzetim çalışmalarında kullanılan bir diğer sürüş çevrimi ise, güç-zaman eğrisi Şekil 3.17'de görülen "Urban Dynamometer Drive Cycle (UDDS)" standart sürüş çevrimidir.



Şekil 3.17 UDDS sürüş çevrimine göre taşıtın güç talebi.

Birçok anlık ve hızlı yüklenmeleri içeren bu yük profili, hibrit bir taşıt sistemi için geliştirilen bir enerji yönetim stratejisinin performansını değerlendirmek açısından oldukça uygun kabul edilmektedir. UDDS sürüş çevrimine göre taşıtın hız değişimi, zamanın bir fonksiyonu olarak Şekil 3.18’de gösterilmektedir.



Şekil 3.18 UDDS sürüş çevrimine göre taşıt hızının zamana bağlı olarak değişimi.

UDDS sürüş çevriminin özellikleri ise Çizelge 3.6’da verilmektedir.

Çizelge 3.6 UDDS sürüş çevriminin özellikleri

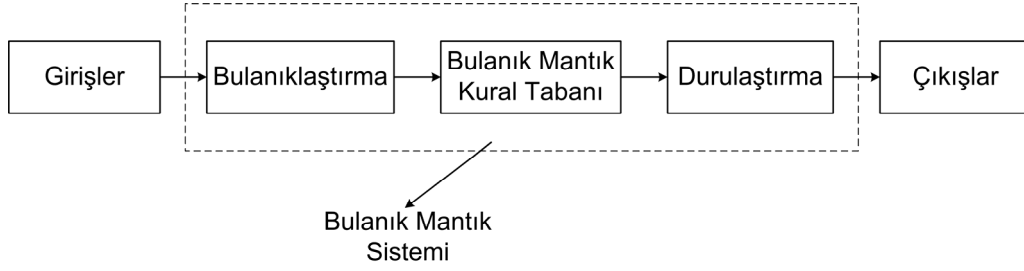
Zaman	1369 (s)
Menzil	11,98 (km)
Azami hız	91,23 (km/sa)
Ortalama hız	31,54 (km/sa)
Azami ivmelenme	1,48 (m/s ²)
Azami yavaşlama	-1,48 (m/s ²)
Ortalama ivmelenme	0,51 (m/s ²)
Ortalama yavaşlama	0,58 (m/s ²)
Boşta çalışma zamanı	259 (s)

3.2.2 Kontrol yöntemleri

3.2.2.1 Bulanık mantık (fuzzy-logic)

İlk defa Zadeh tarafından ortaya konulan ve günümüzde endüstriyel uygulamalarda oldukça geniş bir kullanım alanı bulan bulanık mantık sistemleri, klasik kontrol yöntemlerine kıyasla birçok avantaja sahiptir. Bu kontrol yönteminin sağladığı en büyük fayda insana özgü tecrübe ile öğrenme olayının kolayca modellenebilmesi ve belirsiz kavramların bile matematiksel olarak ifade edilebilmesine imkân sağlamasıdır. Bu nedenle bulanık mantık sistemleri, günlük hayatta sıkça karşılaşılan belirsizlik durumlarında kullanılmaya oldukça uygun bir yapıdadır. Bu avantajları sayesinde birçok farklı alanda kullanım açısından oldukça ilgi çekici bir konuma gelmiştir (Chen ve Huang, 2008). Ancak bulanık mantık ile ilgili en önemli uygulamalar kontrol alanında yoğunlaşmaktadır (Wang, 1997; Leondes 1998). Bulanık mantık kontrolör, özellikle karmaşık ve doğrusal olmayan modellerdeki süreçleri değerlendirmek için oldukça uygundur. Uygulanacağı sisteme ait komple bir matematiksel modelin geliştirilmesini gerektirmeyen bulanık mantık kontrolörler, “EĞER-O ZAMAN” ifadelerini içeren bir kurallar bütününden oluşmaktadır. Kuralların ‘EĞER’ kısımları girişlerin bölgelerini nitelemektedir. Kuralların ‘O ZAMAN’ kısımları ise çıkış değişkeninin değerini belirlemektedir. Kontrolörün çıkışını elde etmek için bütün kuralların ‘EĞER’ kısımlarına ait üyelik fonksiyonlarının derecelerinin ortalaması alınır ve üyelik dereceleri ile ağırlıklandırılır. Oluşturulan kurallar, çıkışlar ve girişler arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi modellemekte ve kontrol işlemi, kuralların içeriğine göre bulanıklaştırma ve durulaştırma operatörleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bulanık mantık kontrolörün işleyiş sürecine ait şematik

gösterim Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.19 Bulanık mantık kontrolörün işleyiş sürecine ait şematik gösterim.

Bulanık mantık kontrolörün işleyiş sürecinde karar verme işlemi kural tabanında gerçekleşmektedir. Kural tabanı ise, tasarımcının tecrübe ve sezgilerini kontrol sistemine uygulamasına olanak sağlamaktadır. Oluşturulan kurallar, kontrolör girişlerine bağlı olarak bir çıkış üretmektedir.

3.2.2.2 Dalgacık (wavelet) dönüşümü

Günümüzdeki kullanımı ile “dalgacık” tanımı ilk kez Alfred Haar’ın 1909’da yaptığı doktora tezinde kullanılmıştır. Dalgacık dönüşümü veri analizinde çokça kullanılan fourier dönüşümünden farklı olarak, bir zaman dizisindeki periyodik olmayan değişimlerin ne zaman başladığını ve bittiğini tespit etmeye olanak sağlamaktadır. Böylece dalgacık dönüşümü ile bir veri kümesini alçak ve yüksek frekanslı bileşenlerine ayrıştırılabilir. Bu ayrıştırma bir şekil parametresi (Haar) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Böylece, Şekil 3.20’de de görüldüğü gibi bir filtreleme uygulamasıyla istenen frekanslarda alt bileşenler elde edilebilir.



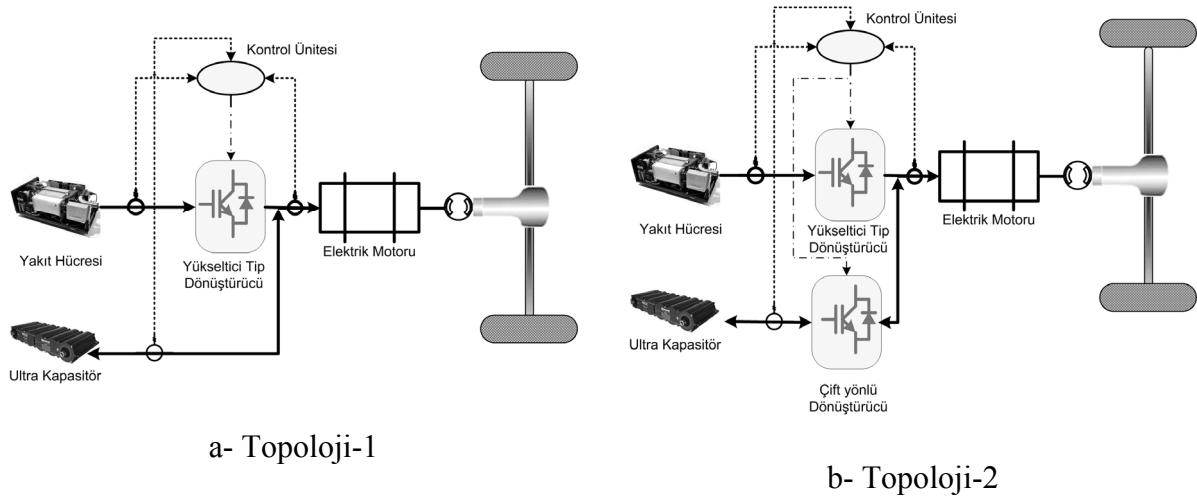
Şekil 3.20 Dalgacık dönüşümünün tek seviyeli filtreleme uygulaması.

Daha önceden de bahsedildiği üzere, bir taşıt sisteminin güç talebi birçok ani yük değişiminden oluşmaktadır. Hibrit güç sistemlerinde kullanılacak bir yük paylaşım algoritması, temel yük talebini anlık değişimlerden izole edebilmelidir. Önerilen hibrit sistemde dalgacık dönüşümünün, bir güç sisteminin anlık değişimlerini analiz edebilme yeteneği nedeniyle yük paylaşım algoritması olarak oldukça başarılı bir performans

göstermesi beklenmektedir (Ates vd., 2010; Erdinc vd., 2009a; 2009b; Uzunoglu ve Alam, 2008; Zhang vd., 2008). Anlık değişimleri temel yük talebinden ayırabilecek yeteneğe sahip böyle bir yük paylaşım algoritmasının sisteme eklenmesi ile birlikte YH ve batarya sistemlerinin anlık yük değişimlerine maruz kalmaması sağlanabilecektir. Bu sayede hem YH ve batarya verimliliğinde, hem de işletim ömründe artış elde edilmesi öngörülmektedir.

3.2.3 YH/UK topolojilerinin benzetim çalışmaları

UK'nın enerji depolama sistemi olarak elektrikli taşıtlarda YH ile birlikte verimli bir şekilde kullanılabilmesi için dikkat edilmesi gereken önemli ayrıntılar bulunmaktadır. Özellikle taşıt sisteminde birden fazla enerji kaynağı olması durumunda bu kaynakların bağlantı biçimi ve aralarında uygun yük paylaşımının sağlanabilmesi büyük önem arz etmektedir. İlk olarak Şekil 3.21'de görülen (Topoloji-1: YH'nin bir dc-dc dönüştürücü ile ve UK'nın doğrudan bağlı; Topoloji-2: YH ve UK'nın iki ayrı dc-dc dönüştürücü üzerinden bağlı olduğu) iki farklı topolojinin benzetim çalışmaları yapılmıştır. Burada her iki benzetim çalışmasında da bara gerilimini belirlenen bir aralıkta sabit tutabilmek amacı ile dönüştürücüler gerilim kontrollü olarak çalıştırılmışlardır.



Şekil 3.21 YH/UK bağlantı topolojileri

Benzetim çalışmaları YH modeli boyutlandırılması için kullanılan parametre değerleri Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7 YH modeli parametre değerleri

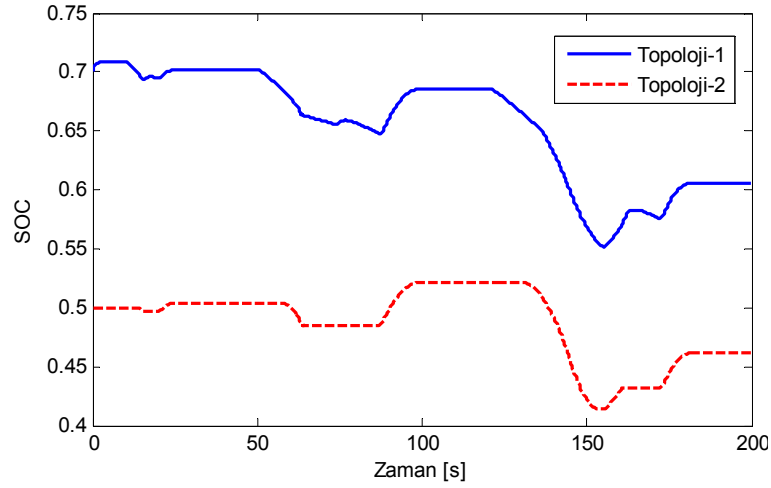
A	150 cm ² /cell
B	0,016 V
C	2,5 F
F	96486,7 C (kmol) ⁻¹
J _{max}	1,5 A/cm ²
N _s	88
N _p	1
R _c	2 x 10 ⁻⁴ Ω
T ₀ ; T _{rt} ; T _{ic} ; T _{it}	28; 20; 0,7; 4000
U	0,8
ζ ₁ ; ζ ₂ ; ζ ₃ ; ζ ₄	-0,9514; 0,00312; 7,4 x 10 ⁻⁵ ; -1,87 x 10 ⁻⁴

UK modelinin boyutlandırılması için ise Çizelge 3.8’de verilen değerler kullanılmıştır.

Çizelge 3.8 UK modeli parametre değerleri

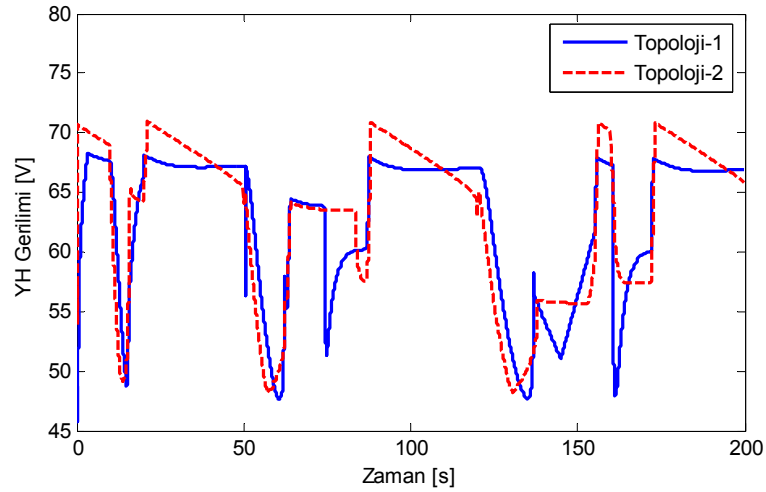
UK modeli	Maxwell Boostcap BMOD0430 P016
Kapasite	430 F
Gerilim	16,2 V
Eşdeğer seri iç direnç	2,5 mΩ
AC direnç (@ 1kHz)	2,0 mΩ

Bu iki topoloji için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak aşağıda verilmiştir. Şekil 3.22’de her bir topoloji için UK şarjlılık durumlarının (SOC) değişimleri görülmektedir.



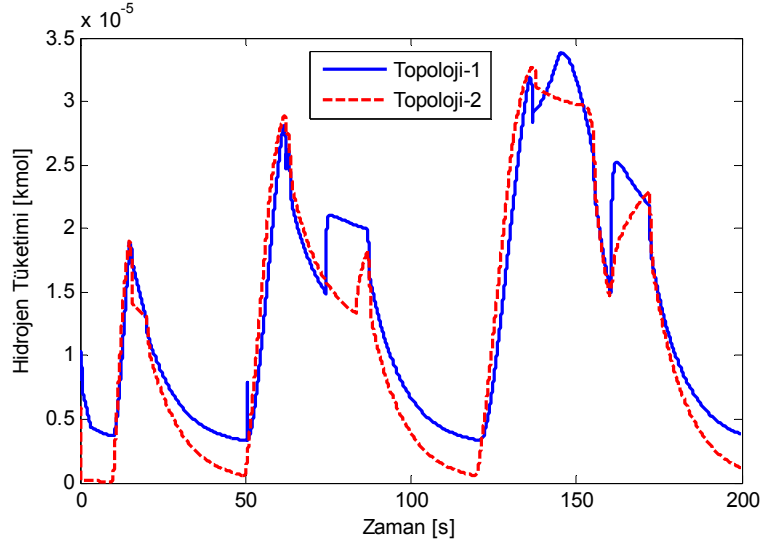
Şekil 3.22 UK şarjlılık durumlarının (SOC) değişimi

Topoloji-1'de UK dc baraya doğrudan bağlı olduğundan, başlangıçtaki şarjlılık (SOC) seviyesi yüksek seçilmiştir. Şekil 3.23'de ise her bir topoloji için YH çıkış gerilimlerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 3.23 YH gerilim değişimleri

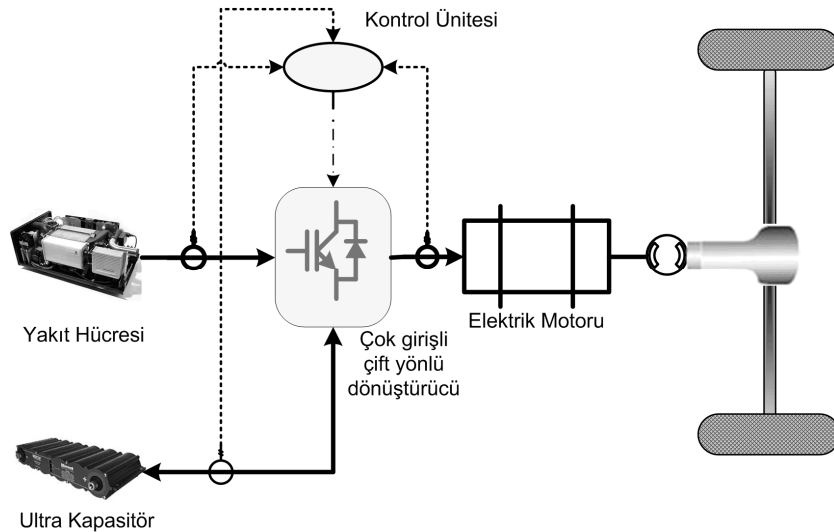
Şekilde de görüldüğü gibi ikinci topolojide YH gerilim değişimi Topoloji-1'dekine kıyasla daha kararlı ve ani değişimler daha azdır. Bu iki topolojinin hidrojen tüketimine göre karşılaştırılması Şekil 3.24'de görülmektedir.



Şekil 3.24 Hidrojen tüketimleri

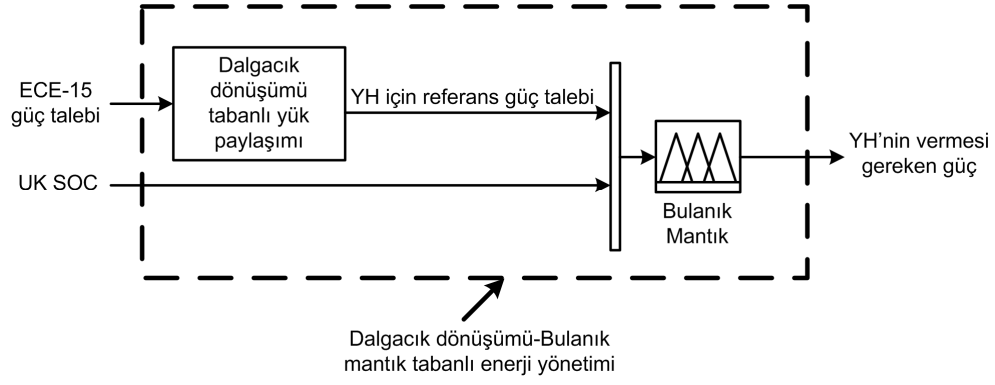
Şekil 3.24’de açıkça görüldüğü gibi Topoloji-1’de hidrojen tüketimi daha fazla olmaktadır. Bunun nedeni ise UK gerilim seviyesi belirlenen bara gerilimi altına düştüğünde kontrolsüz olarak YH’den akım çekerek şarj olmasıdır. Bu çalışmada Topoloji-2 ile hidrojen tüketiminde ~%8 tasarruf sağlanmıştır.

YH/UK topolojileri ile ilgili diğer bir benzetim çalışması ise, Şekil 3.25’de görüldüğü gibi çok girişli çift yönlü bir dc-dc dönüştürücü kullanılarak oluşturulan topoloji (Topoloji-3) için yapılmıştır.



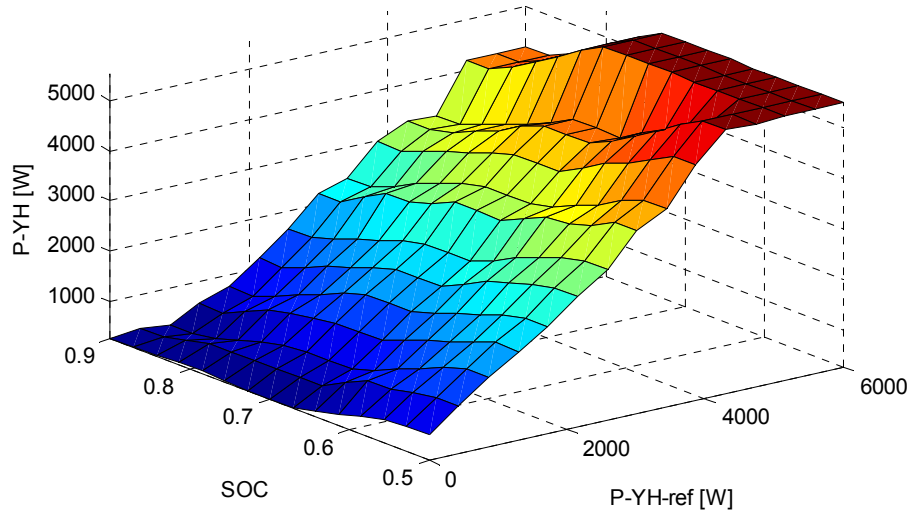
Şekil 3.25 Çok girişli dönüştürücüye sahip YH/UK hibrit topolojisi.

Bu topoloji için gerçekleştirilen benzetim çalışmasında yük paylaşımı ve enerji yönetimi için, dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık tabanlı kontrol sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.26).



Şekil 3.26 Dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık tabanlı kontrol sistemi.

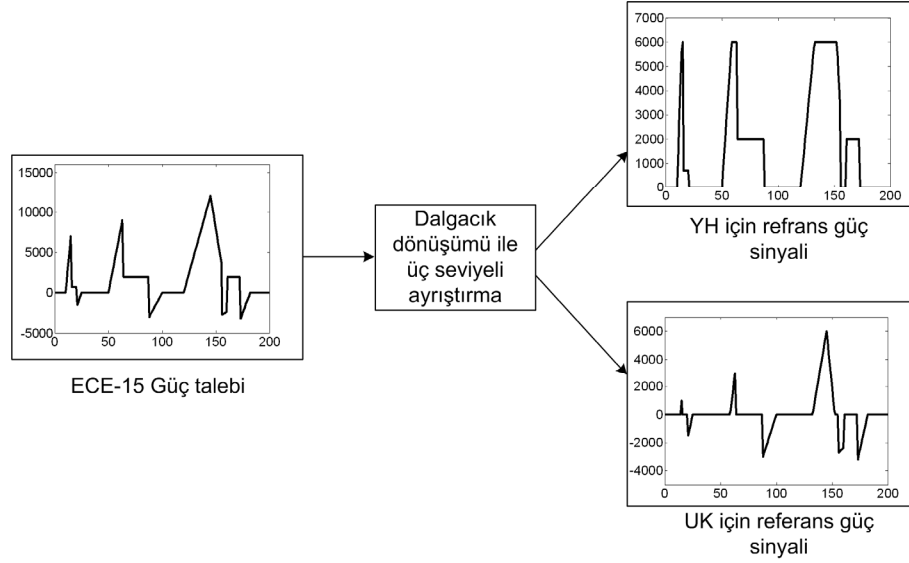
Bu benzetim çalışmasında da kurallara bağlı olarak kontrolör girişlerine karşılık gelen kontrolör çıkışının değişimi Şekil 3.27'deki kural yüzeyi ile gösterilmiştir.



Şekil 3.27 Bulanık mantık kural yüzeyi

Şekil 3.27'deki üç boyutlu kural yüzeyi grafiğinde, SOC ve P-YH eksenleri kontrolör girişlerinin değer aralıklarını ve P-YH-ref eksenini ise çıkışının değer aralığını belirtmektedir. Burada kural yüzeyi üzerinde girişlerin değişimine karşılık gelen çıkışın değişimi kolaylıkla takip edilebilmektedir.

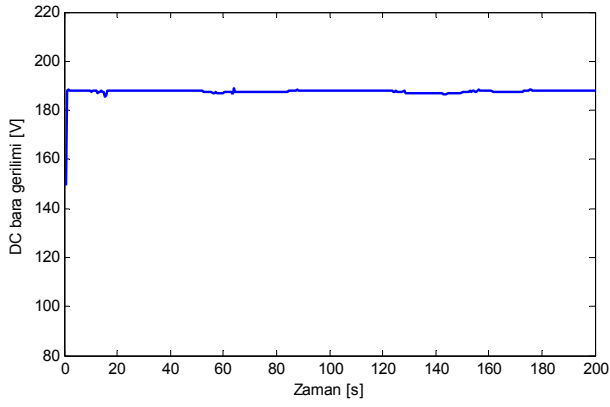
Dalgacık dönüşümü bir yük profilindeki anlık ve keskin değişimleri ayrıştırabilecek yeteneğe sahiptir. Böylece yük profilini yüksek ve düşük frekanslı bileşenlere ayrıştırarak, Şekil 3.28'de görüldüğü gibi YH ve UK'nın doğal yapılarına uygun referans güç sinyalleri elde edilebilmektedir.



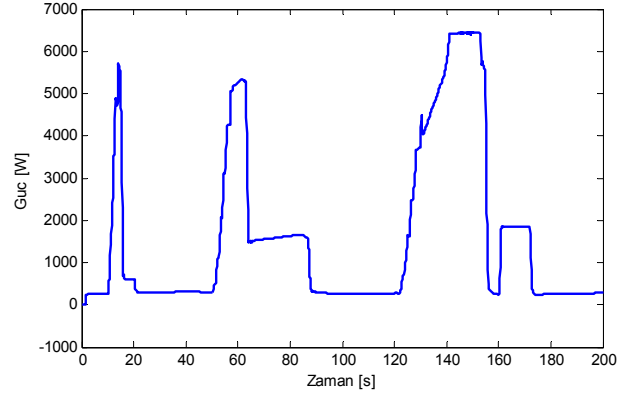
Şekil 3.28 Dalgacık dönüşümü ile YH ve UK referans güç sinyallerinin elde edilmesi

Bu topolojinin benzetim çalışmasında yük olarak kullanılan değerler ECE-15 sürüş çevriminden alınmıştır. Bir önceki YH/UK hibrit benzetim çalışmaları ile aynı sürüş çevrimi kullanıldığından, YH ve UK boyutlandırması da aynı kalmıştır ve Çizelge 3.7-8'deki değerler kullanılmıştır.

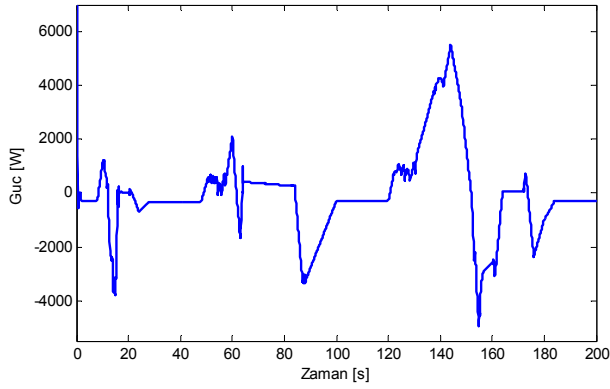
YH/UK hibrit yapısında çok girişli çift yönlü dönüştürücü modeli kullanılarak gerçekleştirilen benzetim çalışmasından elde edilen sonuçlar, Şekil 3.29'da görülmektedir. Elde edilen benzetim sonuçları incelendiğinde, bara geriliminde dalgalanmaların oluşmadığı ve YH'den alınan güç değerlerinde anlık ve çok hızlı değişimlerin meydana gelmediği görülmektedir. Ayrıca, UK'nın ani yüklenmeleri karşıladığı ve frenleme enerjisini de depoladığı gözlenmektedir. Bütün bunlara ilaveten UK'nın şarjlılık durumu belirli bir değerde ($\sim 0,75$) tutulmuştur.



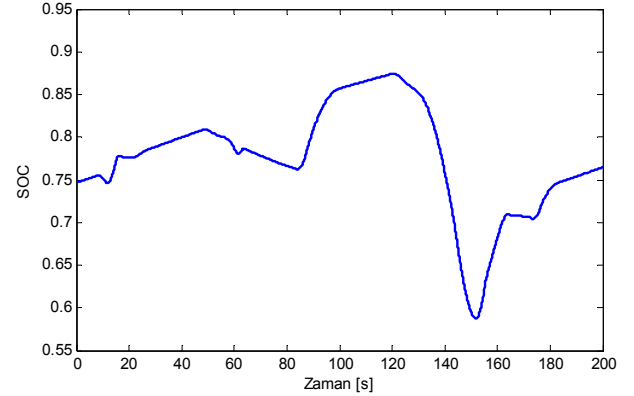
i – dc bara gerilimi değişimi



ii – YH g¼c değişimi



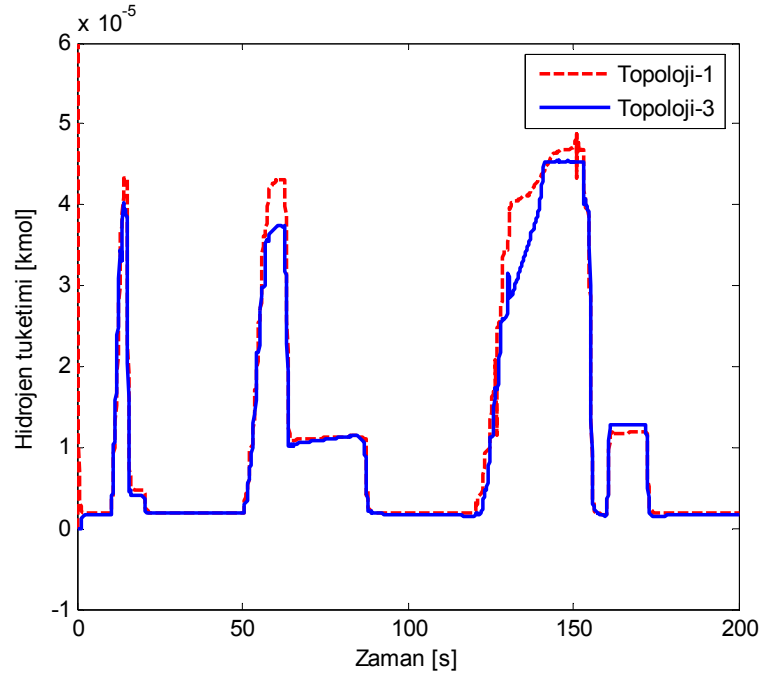
iii – UK g¼c değişimi



iv – UK řarjl¼k durumu değişimi

şekil 3.29 çok girişli çift y¼nl¼ d¼n¼řt¼r¼c¼l¼ YH/UK hibrit topolojisi için benzetim sonuçları

Topoloji-3 ile elde edilen başarılı sonuçlar neticesinde, Topoloji-1 (şekil 3.19.i) ile yakıt (hidrojen) t¼knetimi açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Kontrol algoritması, YH ve UK boyutları aynı alınarak, ECE-15 s¼r¼ř çevrimi için yapılan benzetim çalışmalarında elde edilen yakıt t¼knetiminin değişimi şekil 3.30'da g¼r¼lmektedir.



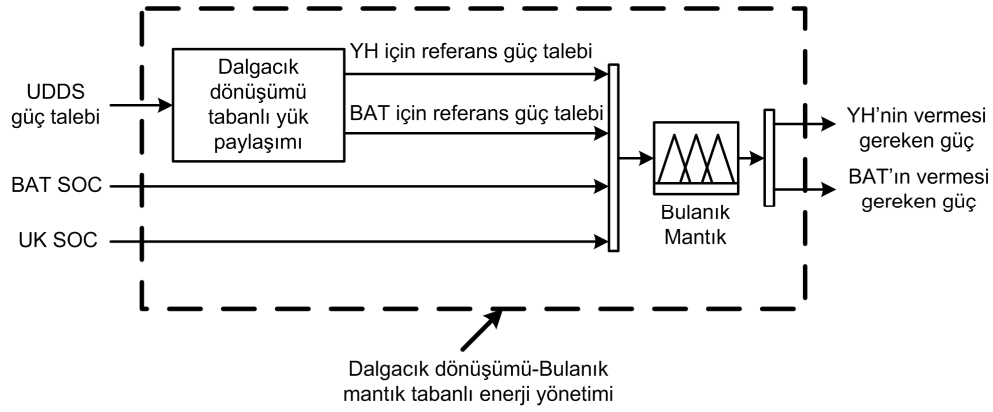
Şekil 3.30 Topoloji-1 ve 3 için hidrojen tüketimi değişimleri

Şekil 3.30'da da görüldüğü gibi aynı kontrol yöntemi ve aynı şartlar için Topoloji-3'ün yakıt tüketimi daha azdır. Bu çalışmada Topoloji-3, toplam yakıt tüketimi açısından ~8,9 % tasarruf sağlamıştır.

3.2.4 YH/BAT/UK topolojisinin benzetim çalışmaları

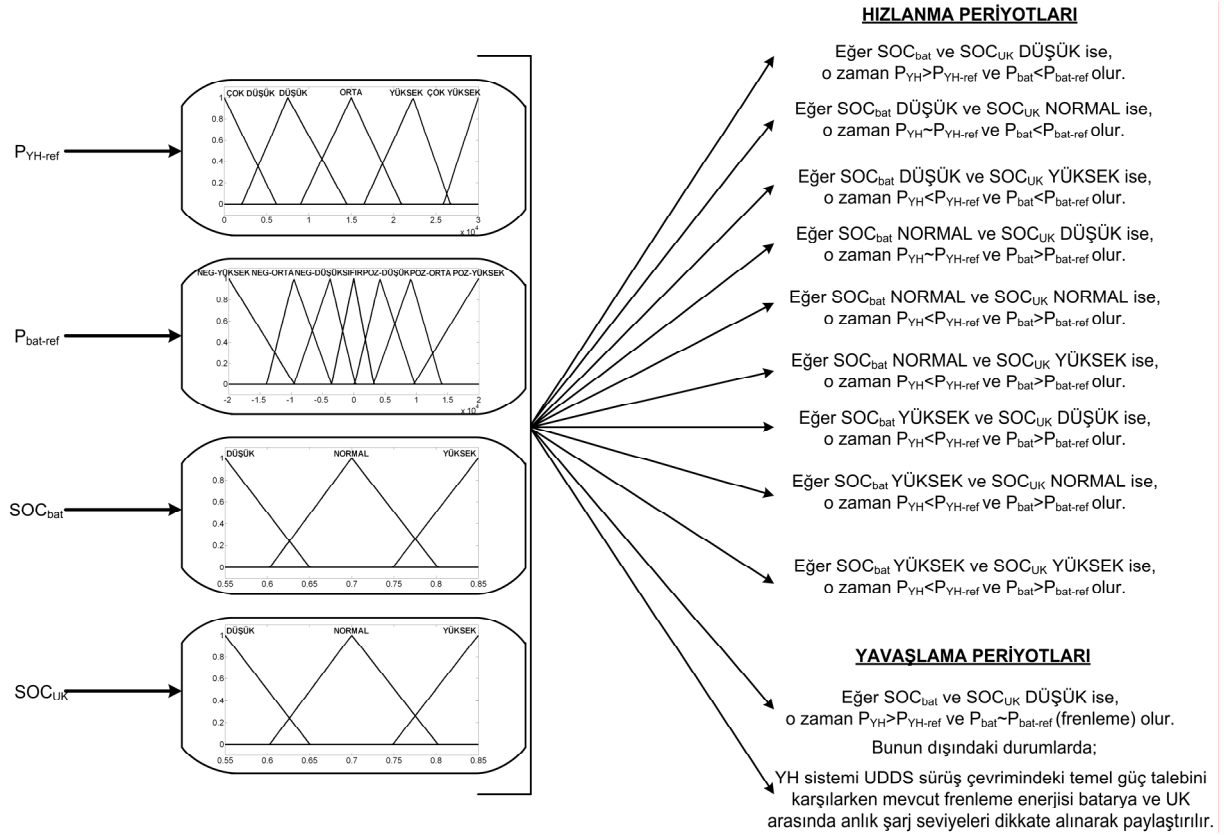
YH/BAT/UK topolojisinin benzetim çalışması, elektrikli taşıtlarda ana kaynağa (YH) ilaveten birden fazla enerji depolama ünitesinin (batarya ve UK'nın birlikte) kullanılması durumunda performans ve verimde nasıl bir değişimin olduğunu irdelemek amacı ile gerçekleştirilmiştir. Bu benzetim çalışmasında her bir kaynak bir dönüştürücü üzerinden sisteme bağlanmıştır. Bu üçlü hibrit yapı daha yüksek güç ve enerji talebini karşılayabilme potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, sistemin yüklenmesi için ECE-15 sürüş çevriminden farklı olarak, UDDS sürüş çevrimi tercih edilmiştir. Yük paylaşımı ve enerji yönetimi için ise yine dalgacık dönüşüm-bulanık mantık tabanlı bir kontrol algoritması kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan bulanık mantık kontrolör, Şekil 3.31'de de görüldüğü üzere 4 giriş ve 2 çıkışa sahiptir.



Şekil 3.31 Dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık tabanlı enerji yönetimi

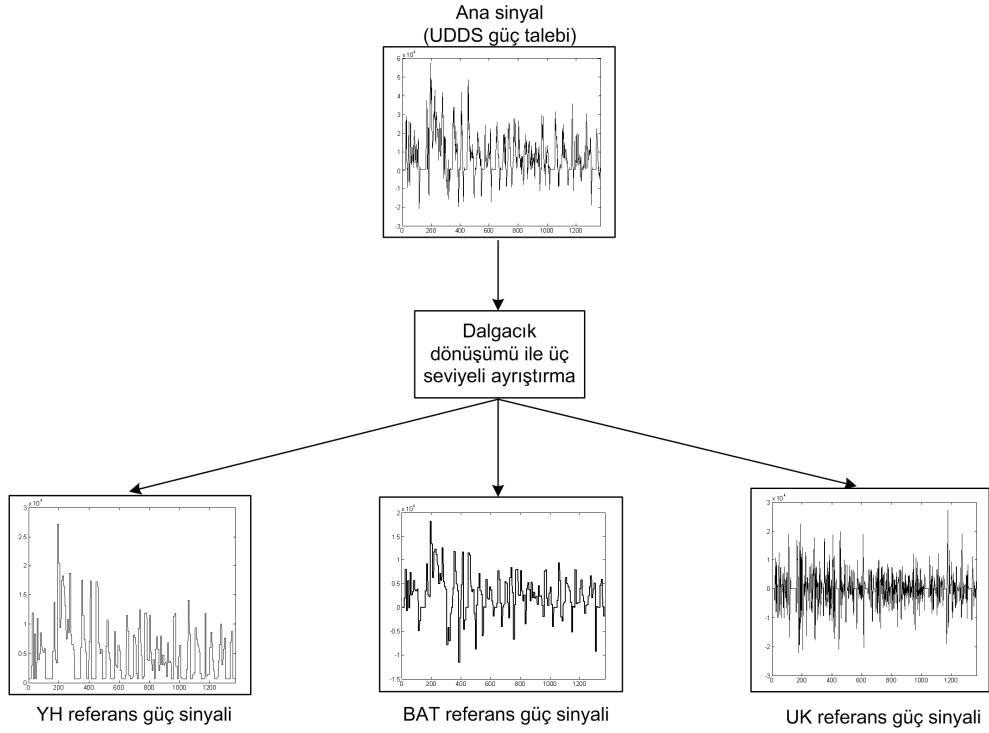
Bulanık mantık kontrolörün girişleri, dalgacık dönüşümü tabanlı yük paylaşım algoritması tarafından üretilen YH ve batarya referans güç sinyalleri ve batarya ile UK sistemlerinin şarj seviyeleridir. Bulanık mantık kontrolör, bu 4 girişten elde edilen bilgiyi kullanarak YH ve batarya sistemlerinden talep edilecek güç değerlerini belirlemektedir. YH ve batarya sistemleri de, bulanık mantık kontrolörün belirlediği güç değerini dönüştürücüler yardımı ile yüke aktarmaktadır. Bulanık mantık kontrolöre ait kural tabanı Şekil 3.32'de açıklanmaktadır.



Şekil 3.32 Bulanık mantık kontrolör kural tabanı.

Oluşturulan kural tabanı taşıtın hızlanması ve yavaşlaması esnasındaki güç paylaşımları olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Uygulanan kontrol algoritmasının temel amacı, yeterli şarj seviyeleri bulunması durumunda mümkün olduğunca UK ve batarya sistemlerini YH sistemi yerine devreye almak ve bu sayede hidrojen tüketimini en az hale getirmektir. Hızlanma periyotlarındaki kontrol mantığı Şekil 3.32’de açıkça belirtildiği şekilde gerçekleştirilmektedir. Bunun yanı sıra faydalı frenleme esnasında ortaya çıkan enerjinin batarya ve UK arasında paylaşılması ise bulanık mantık kontrolörün kural mantığının ikinci bölümünü oluşturmaktadır. Bulanık mantık kontrolör her iki enerji depolama ünitesinin şarj seviyelerini takip etmekte ve buna göre mevcut frenleme enerjisini bu iki kaynak arasında paylaşmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmada batarya ve UK’nın şarj seviyelerinin 0,7 civarlarında tutulması hedeflenmektedir. Bu seviye, batarya ve UK sistemlerinin talep edilen gücü sağlayabilmesi ve mevcut olan frenleme enerjisini verimli bir biçimde geri kazanabilmesi açısından oldukça uygundur (Erdinc vd., 2009a). Eğer her iki kaynağın şarj seviyeleri de hedeflenen değerde ise, batarya sistemi referans güç sinyalindeki frenleme enerjisini geri kazanmaktadır. Eğer UK sisteminin şarj seviyesi hedeflenen değer altında ise, batarya sistemi referans frenleme enerjisinin daha az bir kısmını geri kazanmakta ve geri kalan frenleme enerjisi, UK sistemine aktarılmaktadır. Benzer şekilde, eğer UK sisteminin şarj seviyesi, hedeflenen seviyenin üzerinde ve batarya sisteminin şarj seviyesi hedeflenen değer altında ise, batarya sistemine aktarılacak güç referans değerinden daha büyük olacaktır. Batarya sisteminin şarjı için gerekli olan bu fazla güç ise UK sisteminden karşılanarak UK sistemi deşarj edilecektir. Son olarak eğer her iki kaynağın da şarj seviyesi hedeflenen seviyenin altında ise YH sistemi enerji depolama ünitelerinin şarj seviyelerini korumak amacıyla referans değerinden daha büyük bir gücü sisteme verecek ve her iki üniteyi de şarj edecektir. Böylece batarya ve UK sistemlerinin şarj seviyesi istenen aralıkta kontrol edilirken, YH ve batarya sistemleri dalgacık dönüşümü tarafından belirlenen uygun bir transfer hızında sisteme güç aktaracaktır. Bu sayede YH ve batarya sistemlerinin ömürlerinin arttırılacağı ve yakıt tüketiminin azaltılacağı öngörülmektedir. Kısacası oluşturulan kontrol stratejisi sayesinde sistemin verimliliği ve performansının önemli oranda arttırılması beklenmektedir.

Gerçekleştirilen çalışmada, yük paylaşım algoritması olarak üç seviyeli bir Haar ayrık dalgacık dönüşümünden yararlanılmaktadır. Ana sinyal olan UDDS güç talebi, üç seviyede yüksek ve düşük frekanslı bileşenlerine ayrılmakta ve hibrit sistem bileşenleri için Şekil 3.33’de görülen referans güç sinyalleri elde edilmektedir.



Şekil 3.33 Dalgacık dönüşümü kullanılarak elde edilen UDDS güç profili ayrışımı

Görüldüğü üzere UK sistemi yüksek güç yoğunluğundan ötürü yük talebinin yüksek frekanslı bileşenlerini karşılamak üzere kullanılmaktadır. Yük talebinin düşük frekanslı bileşenleri ise YH ile batarya arasında Şekil 3.33’de gösterildiği şekilde paylaştırılmaktadır. Düşük frekanslı bileşenlerin 700 W’a (UDDS sürüş çevriminin temel yük talebi) kadar olan kısmı batarya tarafından karşılanmaktadır. Yük talebinin düşük frekanslı bileşenininin 700 W’ın üzerindeki kısımları, %60’ını YH, geri kalan %40’ını batarya karşılayacak şekilde paylaştırılmaktadır.

Oluşturulan hibrit sistem benzetim modelindeki YH, batarya ve UK boyutlandırması için kullanılan değerler sırası ile Çizelge 3.9, 3.10 ve 3.11’de görülmektedir.

Çizelge 3.9 PEM YH parametreleri ve değerleri

B	0,016 (V)
C	2,5 (F)
F	96486,7 (C/kmol)
J_{maks}	1,5 (A/cm ²)
N_s	176
N_p	3
R_c	$4,8 \times 10^{-4}$ (Ω)
T_{ic}	0,7
T_{it}	4000
T_0	28 ($^{\circ}$ C)
T_{rt}	20
U	0,8
λ	12
ζ_1	-0,9514
ζ_2	0,00312
ζ_3	$7,4 \times 10^{-5}$
ζ_4	$-1,87 \times 10^{-4}$

Çizelge 3.10 Batarya ünitesi değerleri

Batarya modeli	Panasonic CGR18650E Li-iyon
Kapasite	2900 mAh
Gerilim	3,6 V

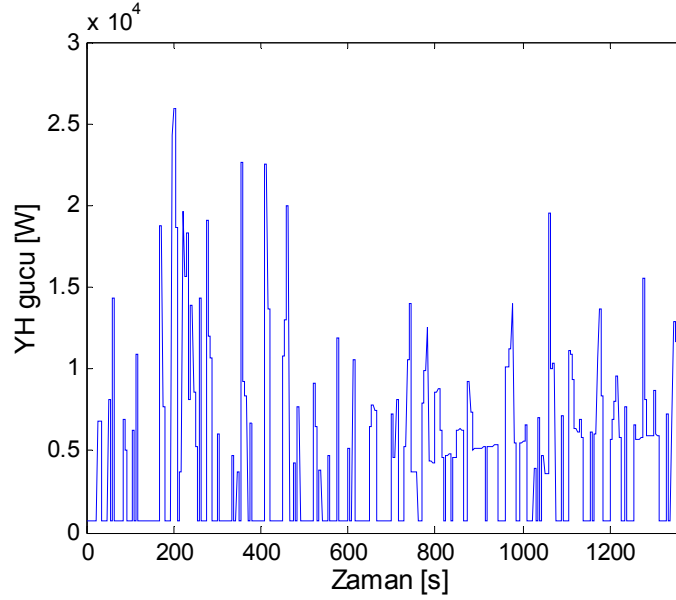
Çizelge 3.11 UK ünitesi değerleri

UK modeli	Maxwell Boostcap BMOD0430 P016
Kapasite	430 F
Gerilim	16,2 V
Eşdeğer seri iç direnç	2,5 m Ω
AC direnç (@ 1kHz)	2 m Ω

Hibrit sistemde kullanılan batarya modülü 40 paralel koldan ve her bir kolda her biri 3,6 V'luk nominal gerilime sahip seri bağlı 45 adet batarya hücresinden oluşmaktadır. UK modülü için ise 5 seri 2 paralel UK ünitesinden meydana gelen UK modülü kullanılmaktadır. Her UK ünitesi 16 V gerilime ve 430 F kapasiteye sahiptir.

Oluşturulan hibrit YH/BAT/UK taşıt sisteminde, UDDS sürüş çevrimi için elde edilen ve Şekil 3.34-3.42'de verilen benzetim sonuçları zamana bağlı olarak sırasıyla; YH sistemi çıkış

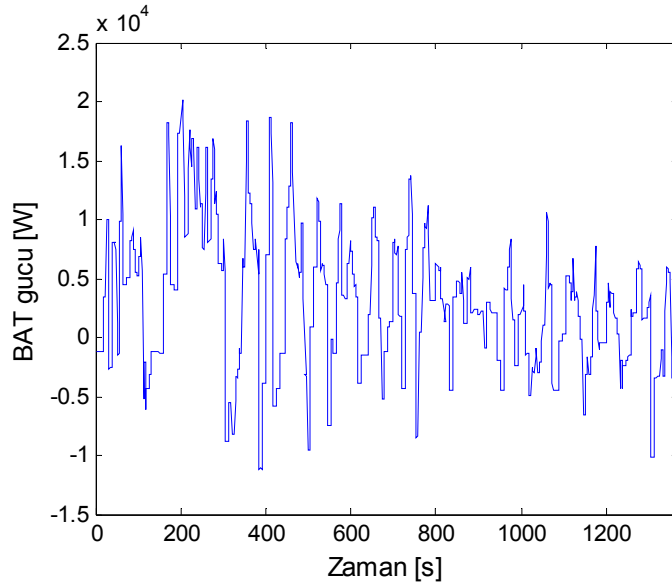
gücü, batarya sistemi çıkış gücü, UK sistemi çıkış gücü, hibrit sistem toplam çıkış gücü, YH yığını gerilimi, batarya sisteminin şarj seviyesi, UK sisteminin şarj seviyesi, dc bara gerilimini ve hidrojen akış miktarını göstermektedir.



Şekil 3.34 YH sistemi çıkış gücünün değişimi.

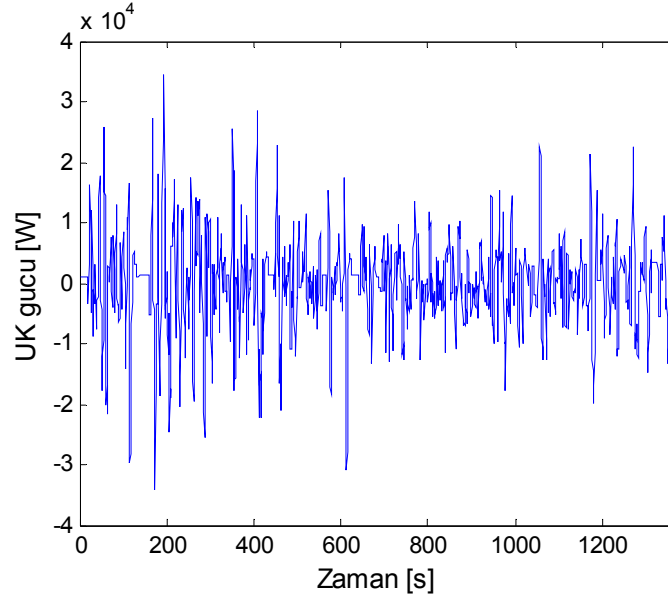
Şekil 3.34’de sürüş çevrimlerindeki toplam güç taleplerinin anlık değişimlerden arındırılmış halinin YH sistemi tarafından karşılandığı görülmektedir. YH sisteminden transfer edilen güç değeri ve bu gücün değişim hızı YH sisteminin yapısı için oldukça uygundur. YH sisteminden yüke aktarılan azami güç değeri, yük talebinin en fazla olduğu durumda UDDS çevrimi sırasında 26,005 kW’tır. Sistemin tahrik edilmesinde tek başına bir YH sistemi kullanılması durumunda YH sistemi daha yüksek güç değerlerini karşılamak zorunda kalacaktır. Dolayısıyla da bu durum sistemdeki hidrojen tüketiminde ve YH sistemi boyutlarında önemli bir artışa neden olacaktır. Ayrıca YH sistemi daha hızlı güç değişimlerine maruz kalacak ve bu durum YH ömrü üzerinde oldukça önemli olumsuz etkileri de beraberinde getirecektir. Bunların yanı sıra belki de en önemli durumlardan biri de mevcut YH sistemleri şarj edilebilir olmadığından frenleme enerjisini geri kazanmak mümkün olmayacak, dolayısıyla da sistem verimli çalışma durumundan tamamen uzaklaşacaktır. Oluşturulan hibrit yapının ve önerilen enerji yönetim stratejisinin kullanılması ile birlikte YH’nın çıkış gücünün değişim hızı sınırlandırılmakta ve YH sisteminin boyutları azaltılabilmektedir. Ayrıca, faydalı frenleme durumlarında ortaya çıkan enerjinin geri kazanılabilmesi ile birlikte enerji tasarrufu da sağlanabilmektedir. Tüm bunlara ilave olarak, YH membranında, anlık yüklenmelerden ötürü meydana gelebilecek yeterince nemlenememe veya aşırı nemlenme ve gaz açlığı (starvation)

gibi problemler önlenmiş olacaktır. Bu sayede YH sisteminin ömründe önemli oranda bir artış sağlanması beklenmektedir.



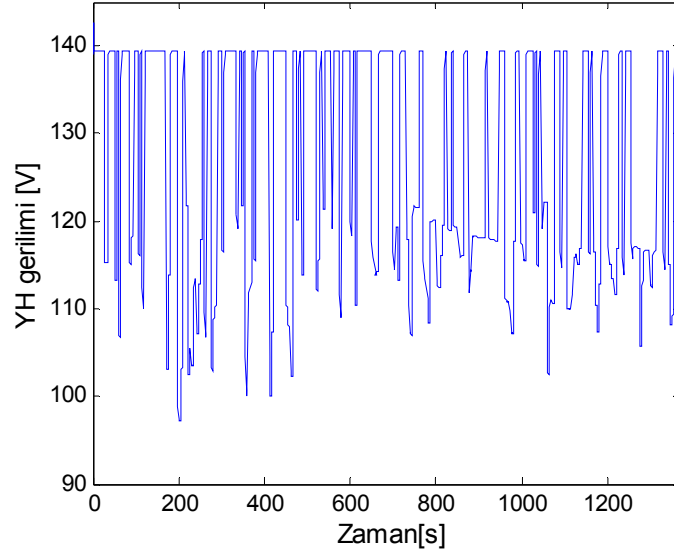
Şekil 3.35 Batarya sistemi çıkış gücünün değişimi.

Yük değişimlerine bağlı olarak batarya sistemine ait çift yönlü dönüştürücünün çıkışındaki gücün değişimi Şekil 3.35’de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi batarya sistemi, dalgacık dönüşümü tabanlı yük paylaşımı algoritmasının sisteme adapte edilmesi sayesinde anlık yük değişimlerine maruz kalmaktan korunmuştur. Bu sayede batarya kimyasal yapısının yük değişimlerinden asgari şekilde etkilenmesi sağlanmış ve ömrünün uzatılması hedeflenmiştir. UK’nın sisteme aktardığı gücün değişimi ise Şekil 3.36’da görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere UK sistemi yük talebindeki ani değişimleri başarıyla karşılayabilmektedir. Hibrit sistemde enerji depolama ünitesi olarak tek başına batarya kullanılması durumunda bu anlık yüklenmeler bataryanın kimyasal yapısına zarar verecek ve buna bağlı olarak da ömrünü büyük oranda azaltacaktır. UK’nın sistem dinamiklerine hızlı cevap verebilme yeteneği, sistemin toplam güç yoğunluğunu arttırmakta, dolayısıyla da hibrit sistemin performansını iyileştirmektedir. Bu durum hibrit YH taşıt uygulamalarında enerji depolama sistemi olarak batarya ve UK ünitelerinin birlikte kullanılmasının beraberinde getirdiği avantajı açıkça ortaya koymaktadır.



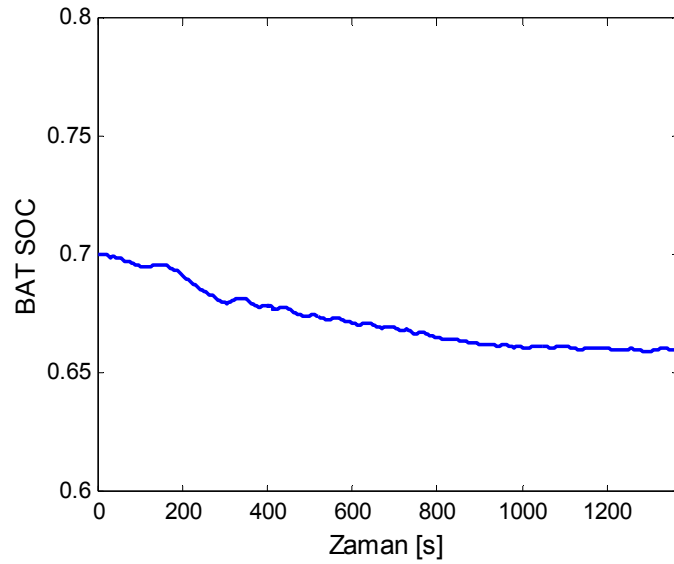
Şekil 3.36 UK sistemi çıkış gücünün değişimi.

Şekil 3.37’de, UDSS sürüş çevriminin uygulandığı hibrit bir taşıt sisteminde YH yığını geriliminin değişimi görülmektedir. UDSS sürüş çevrimi sırasında YH gerilimi 97,1 V’tan 139,4 V’a kadar olan bir aralıkta değişmektedir. Bu gerilim değişim aralıkları, YH yığını için hücre başına yaklaşık 0,56-0,79 V’luk bir aralığa karşılık gelmektedir. Görüldüğü üzere YH yığınının en verimli olduğu lineer çalışma bölgesinde işletilmesi sağlanmıştır. Bu da YH sisteminin veriminin artmasına, dolayısı ile de hibrit sistemin daha verimli işletilebilmesine olanak sağlamaktadır. Eğer taşıtın tahrik edilmesinde tek başına bir YH sistemi kullanılırsa bu gerilim değişimi çok daha büyük bir aralıkta gerçekleşecektir. Bu durum, YH sisteminin verimliliğinin önemli ölçüde azalmasına yol açabilecektir. Ayrıca tek başına YH sisteminin kullanıldığı bir durumda YH gerilimindeki değişimler daha anlık bir şekilde gerçekleşecek ve bu da YH sisteminin ömrü açısından olumsuz sonuçları da beraberinde getirecektir. Buradan da görülebileceği gibi YH, bataryaya ve UK’nın hibrit bir şekilde kullanılması ve uygun bir yük paylaşımı algoritmasının sisteme adapte edilmesi ile birlikte YH verimliliğinde, dolayısı ile de genel sistem verimliliğinde artış elde edilebileceği öngörülmektedir.



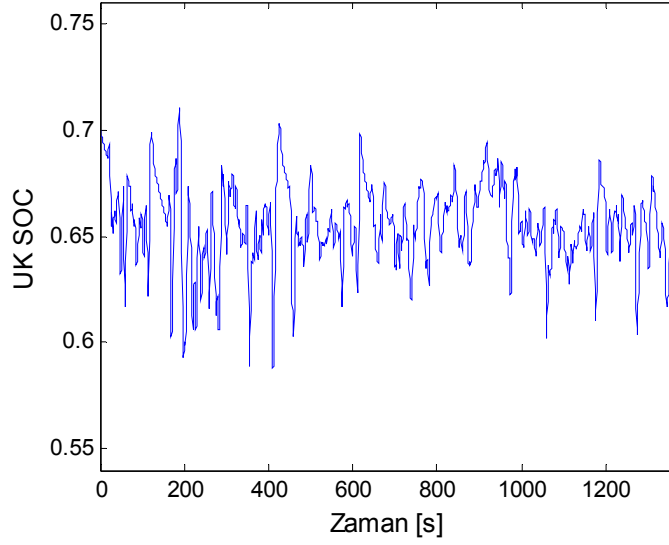
Şekil 3.37 YH yığıcı geriliminin değişimi.

Şekil 3.38 ve 3.39’da sırasıyla batarya ve UK şarj seviyelerinin değişimi görülebilmektedir.



Şekil 3.38 Batarya sistemi şarj seviyesinin değişimi.

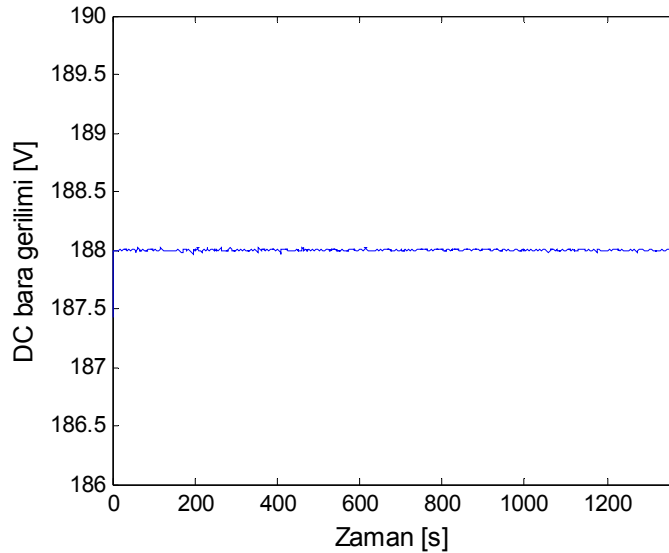
Batarya sisteminin şarj seviyesinin UDDS çevrimi boyunca sahip olduğu en düşük ve en yüksek değerler Şekil 3.38’de görüldüğü üzere sırasıyla 0,659 ve 0,7’dir. UK sisteminin şarj seviyesinin değişimi ise Şekil 3.39’da gösterildiği gibi 0,588 ve 0,711 değerleri arasında gerçekleşmektedir.



Şekil 3.39 UK sistemi şarj seviyesinin değişimi

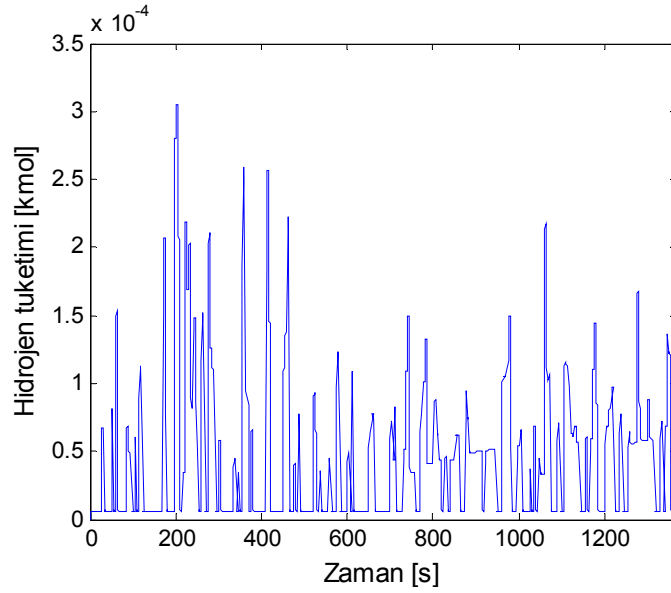
Şekil 3.38 ve 3.39’da görüldüğü üzere batarya ve UK sistemlerinin şarj seviyeleri bütün sürüş çevrimi boyunca uygun bir aralıkta tutulabilmiştir. Bu sayede, batarya ve UK sistemleri mevcut frenleme anlarında ortaya çıkan enerjiyi verimli bir şekilde kazanabilmekte ve ihtiyaç duyulan yük talebini de karşılayabilmektedir.

Tüm sisteme ait dc yük barası gerilimindeki değişim Şekil 3.40’da gösterilmektedir. Bara geriliminin, UK çıkışındaki çift yönlü dc-dc dönüştürücü için uygun kontrol sinyallerinin üretilmesi ile birlikte uygun bir aralıkta tutulabildiği görülmektedir.



Şekil 3.40 DC yük barası geriliminin değişimi.

YH için ihtiyaç duyulan hidrojen akışı miktarı ise Şekil 3.41’de görüldüğü gibi değişmektedir.



Şekil 3.41 İhtiyaç duyulan hidrojen akışı miktarının değişimi.

YH/BAT/UK hibrit sistemi, tek başına YH sisteminin kullanıldığı ya da YH/BAT ve YH/UK hibrit sistemlerinin uygulandığı hibrit yapılara kıyasla YH sisteminin boyutunun azaltılmasına ve hidrojen tasarrufunun artırılmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca bulanık mantık tabanlı kontrol algoritmasının önemini ortaya koymak için önerilen dalgacık dönüşümü-bulanık mantık tabanlı enerji yönetim stratejisiyle tek başına dalgacık dönüşümü tabanlı kontrolsüz bir enerji yönetim stratejisi arasında hidrojen tüketimi kıyaslaması gerçekleştirilmiştir. Önerilen enerji yönetim stratejisinin kullanılması ile birlikte UDDS sürüş çevrimi süresince toplam hidrojen tüketimi **0,06421 kmol** olmaktadır. Sadece dalgacık dönüşümünün kullanıldığı kontrolsüz enerji yönetim stratejisi kullanıldığında ise hidrojen tüketimi **0,06962 kmol** olarak hesaplanmaktadır. Görüldüğü üzere hibrit sistemdeki güç akışının temel düzenleyicisi olan bulanık mantık kontrolör, öngörüldüğü gibi yakıt tasarrufunu (~%8) arttırmaktadır.

3.3 Sonuç

Gerçekleştirilen benzetim çalışmaları neticesinde, YH'li elektrikli taşıtlarda faydalı frenleme enerjisinin geri kazanılması için bir enerji depolama ünitesinin gerekliliği ortaya konmuştur. Kullanılacak bu enerji depolama ünitesini sisteme doğrudan bağlamak yerine, çift yönlü bir güç dönüştürücü üzerinden bağlamak, performans ve verimlilik açısından önemli bir katkı sağlayacaktır. Ayrıca yapılan benzetim çalışmaları ile tercih edilecek çift yönlü güç dönüştürücü topolojisinin, sistemin performans ve verimliliğini önemli bir biçimde etkilediği görülmüştür.

Elektrikli taşıtlar için yük paylaşımli bir enerji yönetim stratejisinin, güç kaynaklarının (YH v.b.) daha etkili ve güvenli çalışmasını sağlamakla birlikte, enerji tasarrufuna yönelik avantajlar sunduğu yapılan benzetim çalışmaları ile vurgulanmıştır. Elde edilen benzetim sonuçları değerlendirildiğinde, yük paylaşımı ve kontrol için tercih edilen dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık yöntemlerinin oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Bunlara ek olarak, YH'li elektrikli taşıtlarda UK ile birlikte bataryanın kullanılması, sistem performansını, maliyetini ve yakıt (hidrojen) tüketimini olumlu yönde önemli oranda etkilemektedir.

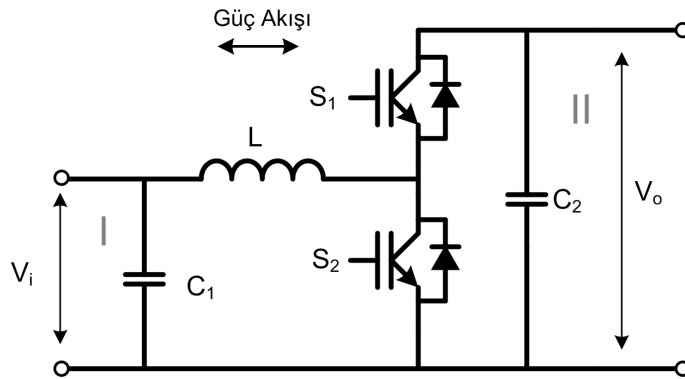
4. GERÇEKLEŞTİRİLEN DENEYSSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar üç kısma ayrılmaktadır. İlk olarak elektrikli taşıtlarda frenleme enerjisini daha iyi kazanabilmek amacı ile bir güç dönüştürücü tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elektrikli taşıtlarda yük paylaşımı ve enerji yönetiminin katkısını görebilmek için, benzetim çalışması ile karşılaştırmalı olarak bir test platformu üzerinde çalışma yapılmıştır. Son olarak ikinci bir test platformu üzerinde, elektrikli taşıtlarda ana kaynak ve/veya enerji depolama ünitelerinin farklı bağlantı topolojilerinin deneysel olarak karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.

4.1 Elektrikli Taşıtlarda Faydalı Frenleme Enerjisinin Daha İyi Kazanımı İçin Bir Dönüştürücünün Tasarımı ve Uygulaması

Daha önce de bahsedildiği üzere, frenleme enerjisinin en iyi şekilde geri kazanılmasında enerji depolama ünitesi ile birlikte kullanılan güç biçimlendirme ünitesinin önemli bir işlevi vardır. Kullanılan güç biçimlendirme ünitesi uygun bir topolojiye sahip değilse yük paylaşım algoritması çok iyi olsa bile beklenen başarı elde edilemeyebilir. Bu bölümde frenleme enerjisinin en iyi biçimde geri kazanılması amacıyla tasarlanan çift yönlü bir güç dönüştürücü ile ilgili ayrıntılı irdelemeler ve önerilen topolojinin literatürde sıkça kullanılan bir topoloji ile performans açısından kıyaslaması yer almaktadır.

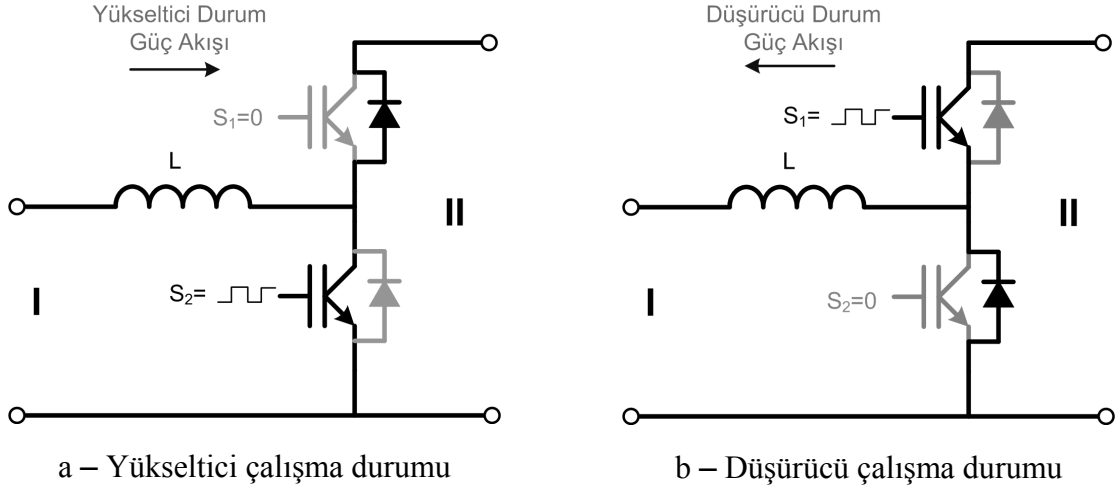
Şekil 4.1’de görülen yarım köprü çift yönlü dönüştürücü topolojisi, basit yapısı ve düşük maliyeti sayesinde literatürde sıkça kullanılmaktadır.



Şekil 4.1 Yarım köprü çift yönlü dönüştürücü topolojisi

Bu dönüştürücü topolojisinde, yükseltici ve düşürücü olmak üzere iki çalışma durumu vardır. İleri (motor) yönde yükseltici, geri (fren) yönde düşürücü olarak çalışmaktadır. S_1 ve S_2

anahtarları Şekil 4.2’de görüldüğü üzere her iki çalışma modunda da hiç bir zaman aynı anda iletimde kalmamaktadır.

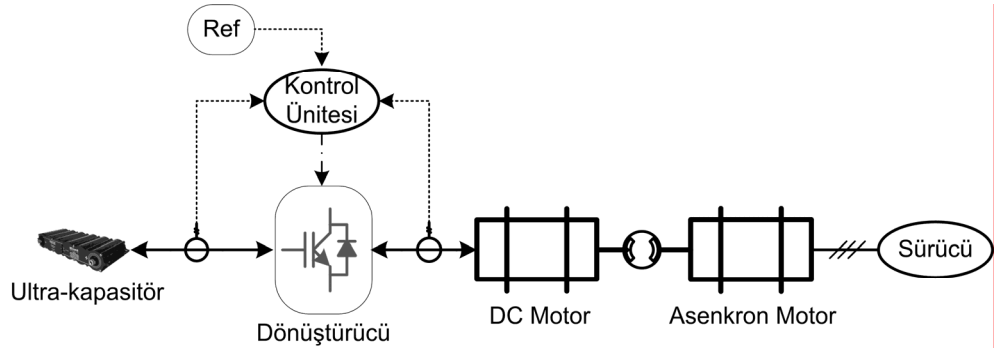


Şekil 4.2 Yarım köprü çift yönlü dönüştürücünün çalışma durumları

Yükseltici çalışma durumunda, S_1 anahtarı her zaman kesimdedir ve yüke aktarılan enerji S_2 'nin anahtarlanması ile kontrol edilmektedir. Bu sayede gerilimin yükseltilmesi ile birlikte enerji I yönünden II yönüne doğru aktarılmaktadır (Şekil 4.2.a). Düşürücü çalışma durumunda ise, S_2 anahtarı her zaman kesimde iken S_1 'in anahtarlanması ile birlikte gerilim düşürülerek enerji II yönünden I yönüne doğru aktarılmaktadır (Şekil 4.2.b).

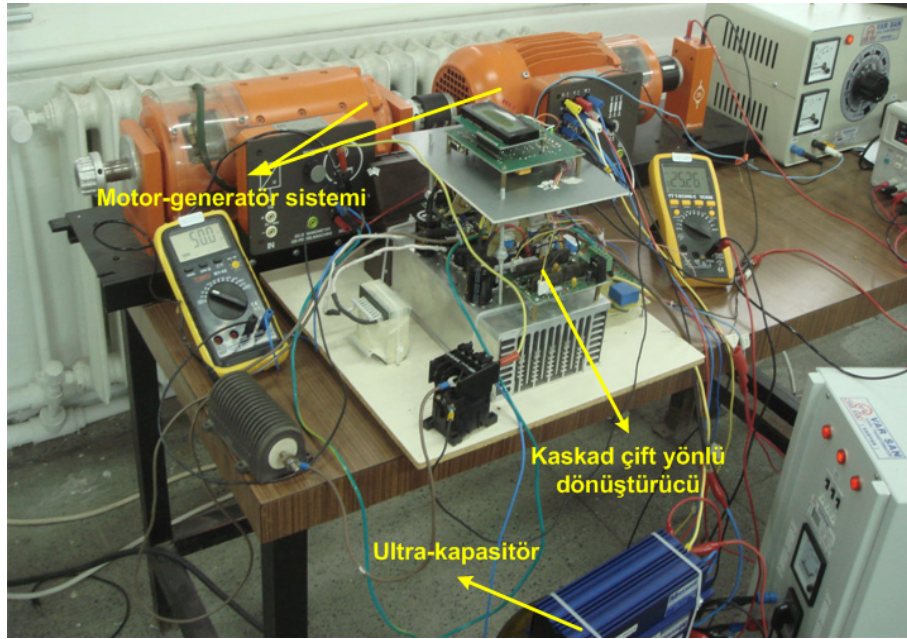
Yarım köprü dönüştürücü topolojisi yukarıda belirtildiği gibi geri (faydalı fren durumunda) yönde sadece düşürücü olarak çalışmaktadır. Bu nedenle elektrikli taşıtın düşük hızlarına bağlı olarak bara geriliminin enerji depolama ünitesinin gerilim seviyesinin altına inmesi durumunda, faydalı frenleme enerjisinin kazanılması mümkün olmayacaktır. Bu sorunu gidermek amacı ile yapılan analizler ve literatür araştırmaları neticesinde, detayları tezin 2.3 başlıklı kısmında verilen Şekil 2.6'daki kaskad bağlı çift yönlü dönüştürücü topolojisinin kullanımının uygun olduğu görülmüştür. Bu topoloji her iki yönde hem yükseltici hem de düşürücü olarak çalışabilmektedir. Böylece bu topoloji ile elektrikli taşıtın düşük hızlarında da faydalı frenleme enerjisinin geri kazanılması mümkün olacaktır.

Her iki topolojinin arasındaki farkın daha iyi irdelenebilmesi ve önerilen kaskad topolojinin avantajını görebilmek amacı ile geliştirilen prototipler bir test platformu üzerinde deneysel olarak karşılaştırılmıştır.



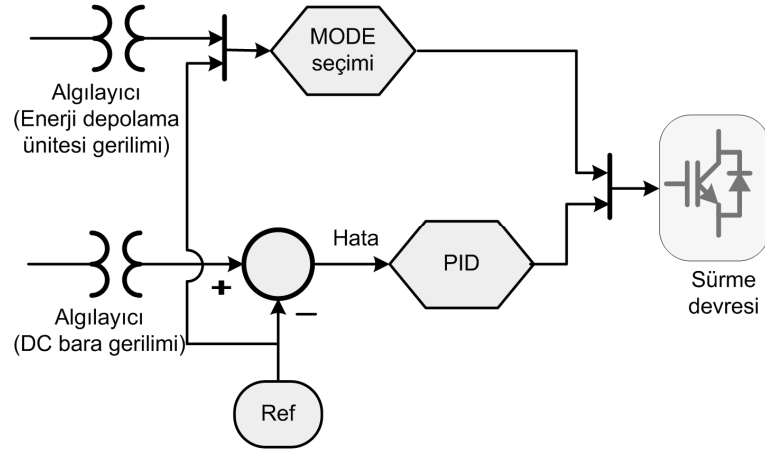
Şekil 4.3 Çift yönlü dönüştürücü prototipleri için hazırlanan test platformu blok şeması.

Şekil 4.3'te genel blok şeması verilen test platformunun gerçek görüntüsü Şekil 4.4'te detaylıca verilmiştir.



Şekil 4.4 Çift yönlü dönüştürücü prototipleri için hazırlanan test platformu.

Yapılan deneysel çalışmalarda her iki topoloji için de benzer kontrol algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmalara ait genel blok şema Şekil 4.5'te görülmektedir.



Şekil 4.5 Çift yönlü dönüştürücüler için oluşturulan kontrol algoritması

Şekilde de görüldüğü gibi sistemdeki gerilim bilgileri kontrol ünitesine gerilim algılayıcılar aracılığı ile aktarılmaktadır. Hata değeri, dc bara gerilimi için belirlenen referans değeri ile ölçülen bara gerilimi arasındaki fark olarak belirlenmekte ve PID kontrolöre giriş olarak uygulanmaktadır. PID kontrolörün çıkışındaki kontrol sinyallerinin sürme devresine iletilmesiyle güç anahtarları tetiklenmektedir.

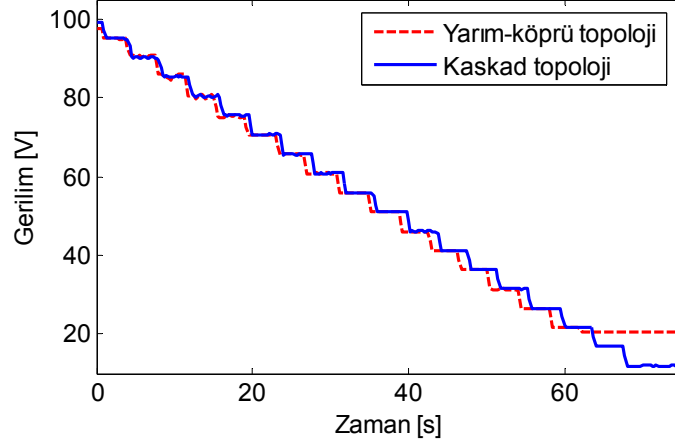
Bunun yanı sıra, her bir çalışma aşamasında enerji depolama ünitesinin gerilimi ve referans gerilim değerleri değerlendirilmekte ve buna bağlı olarak Çizelge 4.1’de görüldüğü üzere dönüştürücülerin çalışma durumları belirlenmektedir.

Çizelge 4.1 Test edilen çift yönlü dönüştürücülerin enerji depolama ünitesi ve referans gerilim değerlerine bağlı olarak çalışma durumları

Topolojiler	Çalışma yönü	Eğer $V_{Ref} > V_{EDS}$ ise	Eğer $V_{Ref} < V_{EDS}$ ise
Yarım Köprü Topoloji	İleri (motor) yönde çalışma	Yükseltici çalışma durumu	-
	Geri (faydalı frenleme) yönde çalışma	Düşürücü çalışma durumu	-
Önerilen Kaskad Topoloji	İleri (motor) yönde çalışma	Yükseltici çalışma durumu	Düşürücü çalışma durumu
	Geri (faydalı frenleme) yönde çalışma	Düşürücü çalışma durumu	Yükseltici çalışma durumu

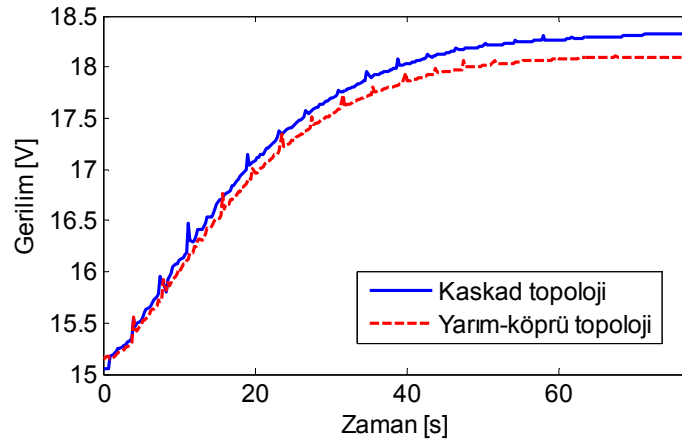
Tüm bu algoritmalar daha sonra, C tabanlı yazılan kodlara çevrilerek dsPIC mikro denetleyicili kontrol devrelerine yüklenmiştir.

Test platformu üzerinde, kademeli ve hızlı frenleme olmak üzere iki farklı durum için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kademeli frenlemede, belirli bir devirde motor hızı faydalı frenleme ile kademeli olarak düşürülmüştür. Her iki topoloji için ayrı olarak gerçekleştirilen bu teste ait sonuçlar Şekil 4.6’da karşılaştırmalı olarak görülmektedir.



Şekil 4.6 Kaskad ve yarım köprü dönüştürücülerde bara gerilimi değişimi

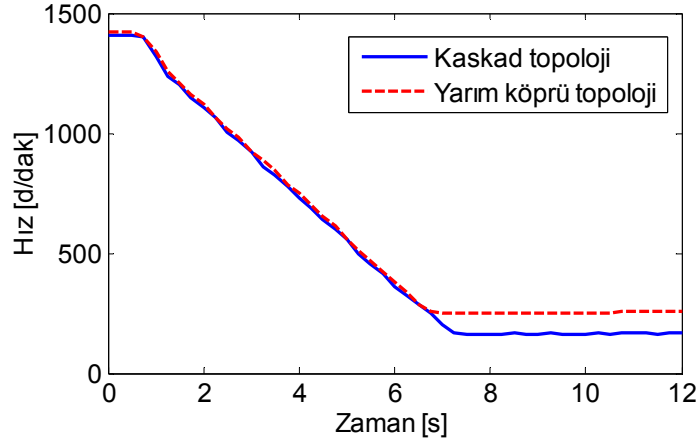
Şekil 4.6’da görüldüğü gibi düşük hızlarda bile kaskad topoloji faydalı frenleme yaparak frenleme enerjisini geri kazanabilmektedir. Her iki topoloji için kazanılan ve depolanan frenleme enerjisine bağlı olarak UK gerilimindeki değişim ise Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7 Kaskad ve çift yönlü dönüştürücülerde UK gerilimi değişimi

Şekil 4.7’den açıkça görülebildiği gibi, test işleminin sonunda UK geriliminin son değeri kaskad topolojinin kullanılması durumunda daha yüksektir. Bu durum, kaskad topolojinin kullanılması ile birlikte daha fazla oranda frenleme enerjisinin geri kazanıldığını ve UK’da depolandığını ortaya koymaktadır. Böylece kaskad topolojinin, frenleme enerjisinin kazanımında yarım köprü dönüştürücüye kıyasla daha iyi olduğu görülmektedir.

Her iki topolojinin karşılaştırılması için gerçekleştirilen ikinci testte ise; belirli değerdeki motor hızı, hızlı bir şekilde faydalı frenleme ile düşürülmüştür. Her iki topoloji için de gerçekleştirilen bu teste ait karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 4.8’de görülmektedir.

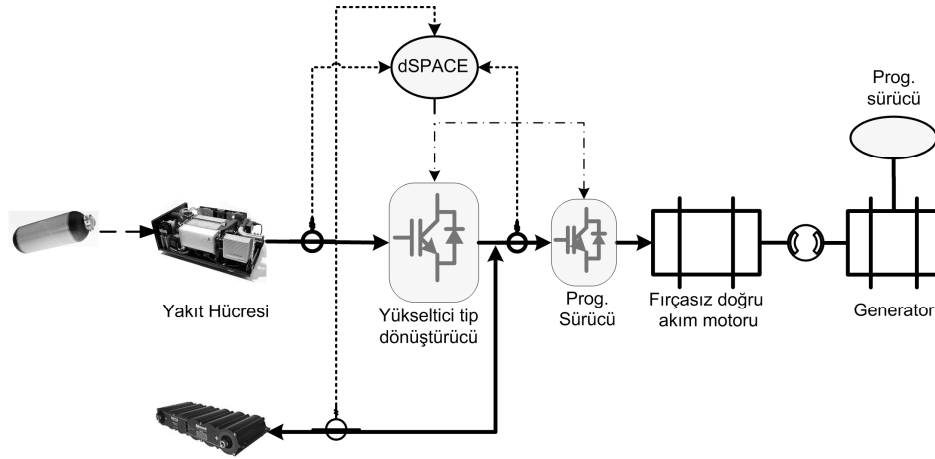


Şekil 4.8 Kaskad ve çift yönlü dönüştürücülerde dc motor hızının değişimi

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi önerilen kaskad topolojinin kullanılması ile düşük hızlarda bile faydalı frenleme gerçekleştirilebilmektedir. Kaskad topolojinin avantajını daha iyi ortaya koymak açısından, ECE-15 sürüş çevrimi referans alınarak gerçekleştirilen testte kaskad topoloji ile ~%23’lük daha faydalı frenleme enerjisinin geri kazanılmıştır.

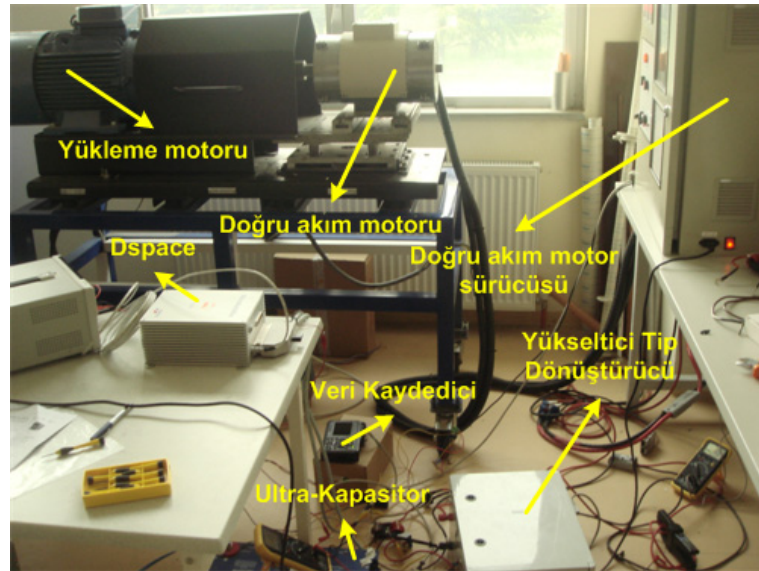
4.2 Elektrikli Taşıtlarda Yük Paylaşımı ve Enerji Yönetimi Uygulaması

Tez sürecinde gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında da görüldüğü üzere, elektrikli taşıtlarda yük paylaşımı ve enerji yönetimi stratejisi büyük bir öneme sahiptir. Bu nedenle oluşturulan bir test platformu üzerinde, iki farklı enerji yönetim stratejisi için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan test platformuna ait bağlantı topolojisi Şekil 4.9’da görülmektedir.



Şekil 4.9 Test platformu bağlantı topolojisi

Bu test platformuna ait detaylı görünüm ise Şekil 4.10'da yer almaktadır.



Şekil 4.10 Test platformu

Oluşturulan test platformunda ana kaynak olarak, teknik özellikleri Çizelge 4.2'de verilen PlugPower® GenCore PEMYH kullanılmıştır.

Çizelge 4.2 PlugPower® GenCore PEMYH teknik özellikleri

Maksimum çıkış gücü	5 kW
Maksimum çıkış akımı	115 A dc
Yakıt girişi	%99,95 saflıkta hidrojen gazı
Maksimum yığın sıcaklığı	70 °C
Ağırlık	276 kg

Test platformunda enerji depolama sistemi olarak bir adet Maxwell® Boostcap BMOD0165

P048 ve üç adet BMOD0430 P016 UK üniteleri kullanılmıştır. Bu ünitelere ait teknik özellikler sırası ile Çizelge 4.3 ve 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 Maxwell® Boostcap BMOD0165 P048 teknik özellikleri

Kapasite	165 F
Gerilim	48,6V
DC direnç	6,3 mΩ
AC direnç (@ 1kHz)	5,2 mΩ
Ağırlık	13,5 kg
Hacim	14 L

Çizelge 4.4 Maxwell® Boostcap BMOD0430 P016 UC teknik özellikleri

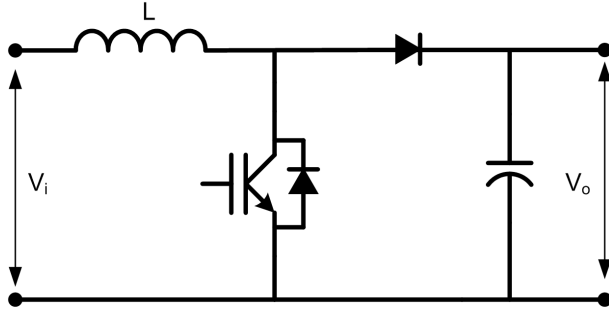
Kapasite	430 F
Gerilim	16,2 V
DC direnç	2,5 mΩ
AC direnç (@ 1kHz)	2,0 mΩ
Ağırlık	5,5 kg
Hacim	4.7 L

Platformda elektrikli taşıtın motoru olarak kabul edilen fırçasız doğru akım motorun teknik özellikleri de Çizelge 4.5'de görüldüğü gibidir.

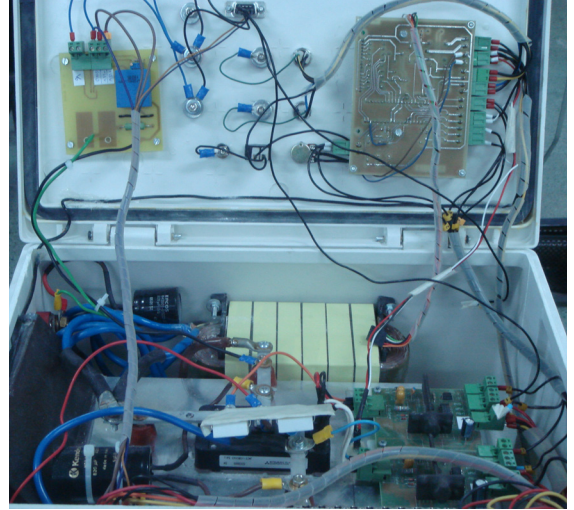
Çizelge 4.5 Fırçasız doğru akım motorunun teknik özellikleri

Nominal devir (rpm)	Nominal tork (Nm)	Maksimum tork (Nm)	Maksimum akım (A)	Weight
2500	69 Nm	125 Nm	400 peak 282 rms	49 kg

Test platformunda YH çıkışına bağlanan akım kontrollü dönüştürücü ise, Şekil 4.11'de görülen 7 kW'lık bir yükseltici tip dönüştürücüdür.



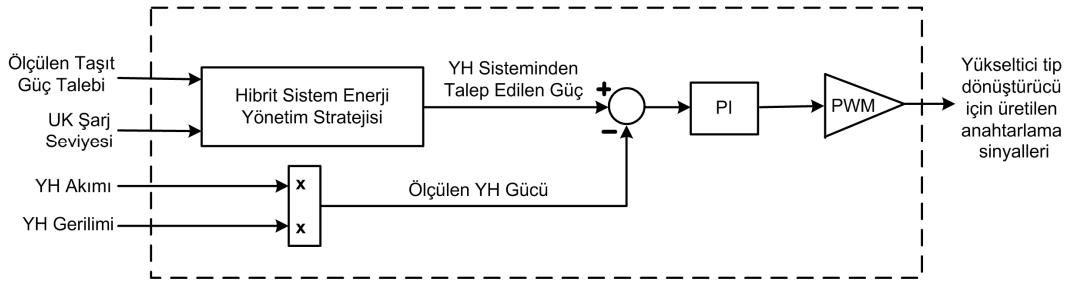
a – Yükseltici tip dönüştürücü topolojisi



b – Yükseltici tip dönüştürücü prototipi

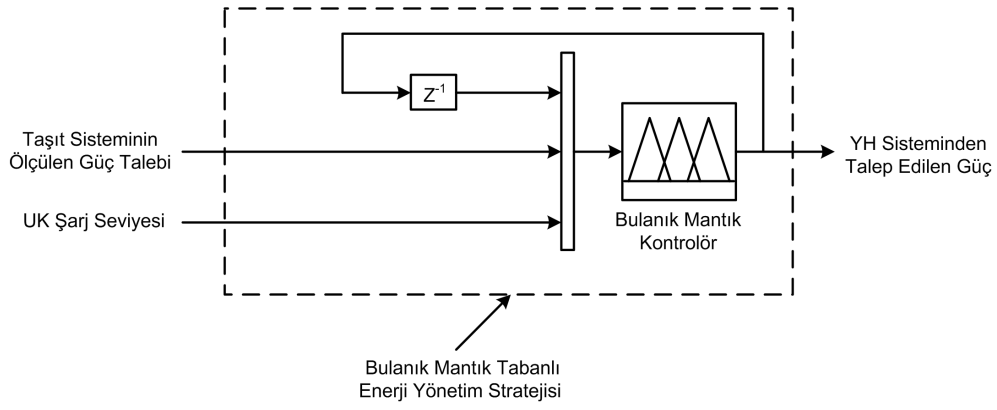
Şekil 4.11 Yükseltici tip dönüştürücü

Yükseltici tip dönüştürücü kontrolünün de yer aldığı tüm sisteme ait kontrol şeması Şekil 4.12’de görülmektedir.

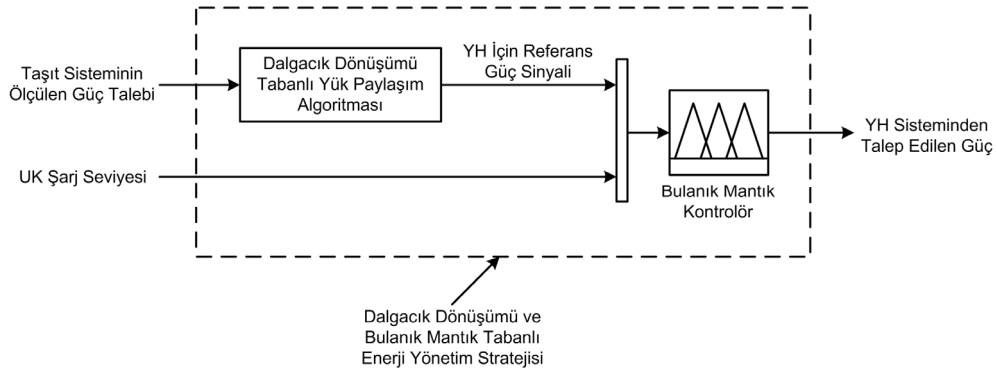


Şekil 4.12 Tüm sistemin kontrol algoritması

Test platformu üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda Şekil 4.13’de görüldüğü üzere, bulanık mantık (Şekil 4.13.a) ve dalgacık dönüşümü-bulanık mantık (Şekil 4.13.b) tabanlı iki farklı enerji yönetim stratejisi kullanılmıştır.



a - Bulanık mantık tabanlı enerji yönetim stratejisi



b - Dalgacık dönüşümü-bulanık mantık tabanlı enerji yönetim stratejisi

Şekil 4.13 Enerji yönetim stratejileri

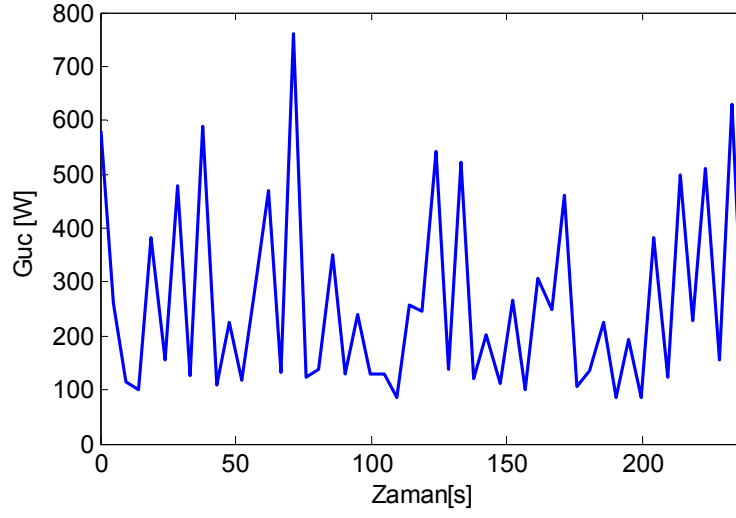
Bu enerji yönetim stratejilerinin test platformunda uygulanması ile elde edilen deneysel çalışmalara ait sonuçlar aşağıda iki ayrı başlık altında verilmiştir.

4.2.1 Enerji yönetiminde tek başına bulanık mantık kontrolör kullanılması durumu

Bu bölümde enerji yönetiminde tek başına bulanık mantık kontrolör kullanılması durumunda hibrit sistemin performansı değerlendirilmiştir. Bahsi geçen durumda elde edilen ve Şekil 4.14 – 4.18’de verilen deneysel sonuçlar zamana bağlı olarak sırasıyla; YH sistemi çıkış gücü ve gerilimini, YH sisteminde hücre başına ortalama gerilimi, UK sistemi gücü ve gerilimini göstermektedir.

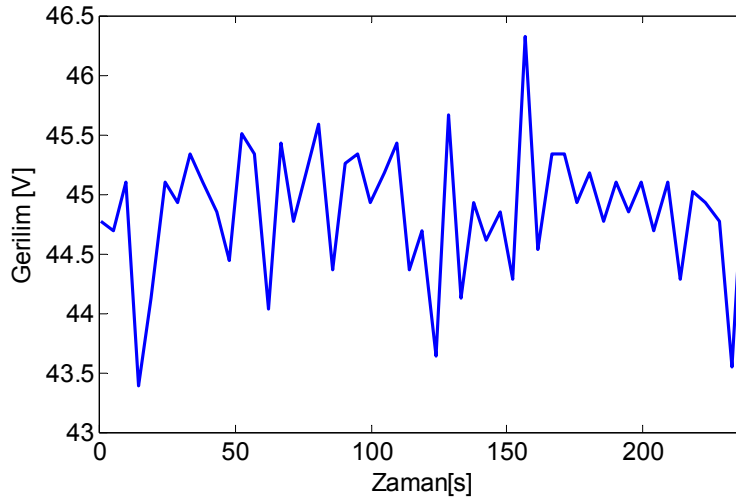
Motorun farklı yüklenme durumlarına bağlı olarak bulanık mantık tabanlı enerji yönetim stratejisinin uygulanması ile YH sisteminin verdiği güç değişimi Şekil 4.14’de gösterilmektedir. Görüldüğü üzere YH sistemi yük talebinin bir kısmını karşılamakta, ancak anlık değişimlere maruz kalmaktadır. Bu durum, sistem yapısında sadece bir kontrolör bulunmasından ve yük paylaşımı algoritmasının sistem yapısına eklenmemiş olmasından

kaynaklanmaktadır. Sistem yapısında bir yük paylaşımı algoritmasının bulunması durumunda elde edilecek performans değişimleri bir sonraki kısımda incelenecektir.



Şekil 4.14 YH sistemi çıkış gücü

Şekil 4.14'de gösterilen YH gücüne bağlı olarak YH çıkış geriliminin değişimi Şekil 4.15'de görüldüğü gibidir.

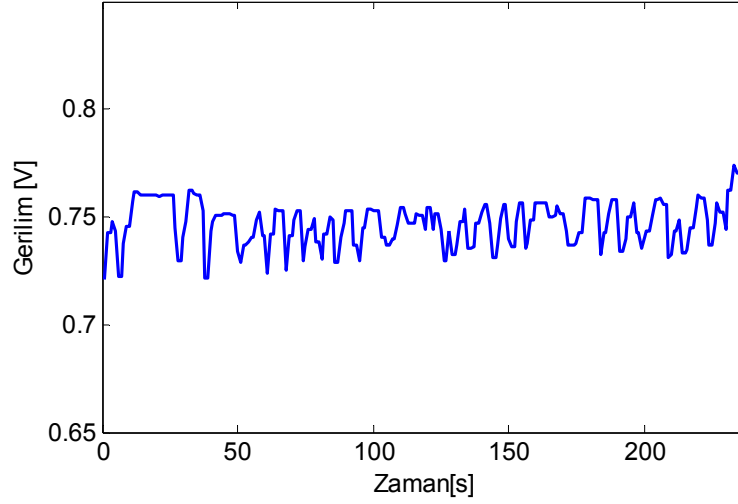


Şekil 4.15 YH sistemi çıkış gerilimi

YH talep gücündeki artış YH yığın geriliminin azalmasına neden olmaktadır. Bu çalışma koşulunda YH yığın geriliminin değişimi 43,4 V ile 46,3 V arasında meydana gelmiştir. Ayrıca deneysel çalışma sonucunda toplam hidrojen tüketimi 1,144 kmol olarak ölçülmüştür.

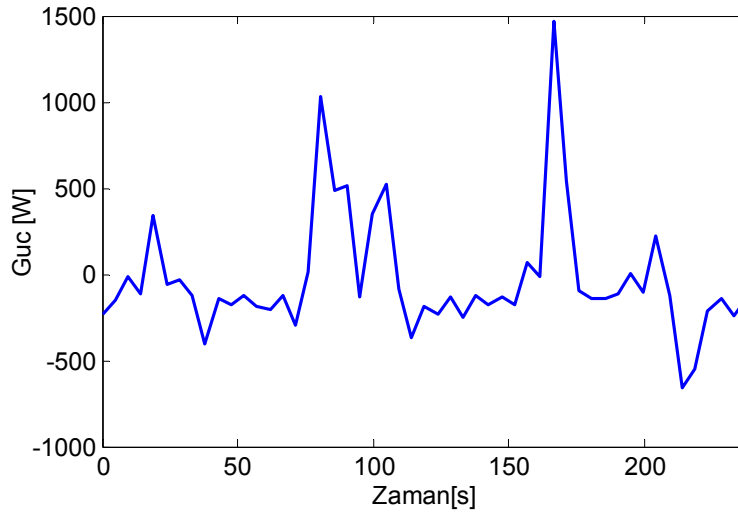
Şekil 4.16'da ise YH yığınınındaki ortalama hücre geriliminin değişimi gösterilmektedir. Bu

gerilim değişimi, YH yığını için hücre başına yaklaşık 0,72-0,76 V'luk bir gerilim aralığına karşılık gelmektedir. Görüldüğü gibi YH yığınının en verimli olduğu ve hücre başına yaklaşık 0,55-0,85 V aralığına denk gelen lineer çalışma bölgesinde işletilmesi sağlanmıştır.



Şekil 4.16 YH sistemi ortalama hücre gerilimi

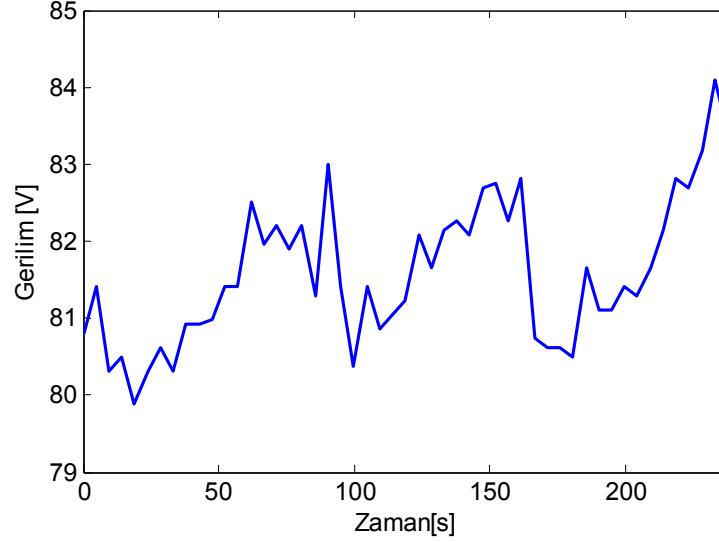
Şekil 4.17'de hibrit sistem çalışması sonucunda UK sisteminin karşıladığı gücün değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.17 UK sistemi çıkış gücü

Görüldüğü gibi UK sistemi doğal yapısına uygun olarak hibrit sistem güc talebindeki hızlı değişimlerin büyük bir kısmını üzerine almakta, frenleme enerjisini geri kazanmakta ve gerektiği yerlerde ise YH sistemi tarafından şarj edilmektedir. UK sistemi geriliminin

değişimi Şekil 4.18’de verilmiştir. Görüldüğü üzere sistemin farklı yüklenme durumlarında UK gerilimi ve doğru orantılı olarak UK sisteminin şarj durumu, bulanık mantık kontrolör sayesinde uygun bir aralıkta tutulabilmektedir.

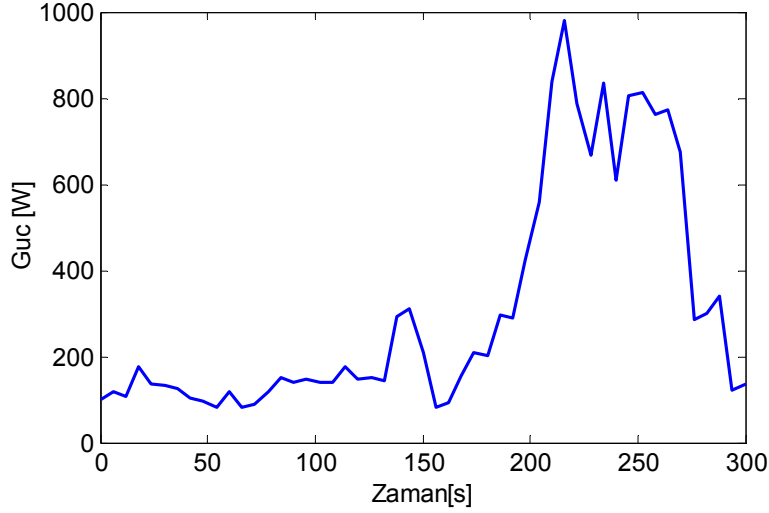


Şekil 4.18 UK sistemi çıkış gerilimi

4.2.2 Enerji yönetiminde dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık tabanlı bir enerji yönetim stratejisinin kullanılması durumu

Bu bölümde enerji yönetiminde dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık tabanlı bir enerji yönetim stratejisinin kullanılması durumunda hibrit sistemin performansı değerlendirilmiştir. Yapılan çok sayıda denemeler neticesinde elde edilen en iyi sonuçlar, Şekil 4.19-4.23’de zamana bağlı olarak sırasıyla; YH sistemi çıkış gücü, YH yığımı akım ve gerilimi, YH sisteminde hücre başına ortalama gerilim, UK sistemi gücü ve UK sistemi akım ve gerilimi olarak verilmiştir.

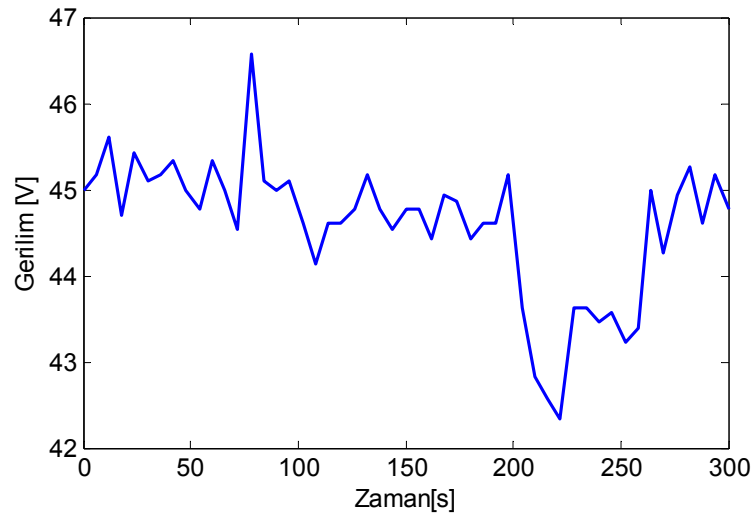
Motorun farklı yüklenme durumlarına bağlı olarak dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık tabanlı enerji yönetim stratejisinin uygulanması ile YH sisteminin verdiği güç değişimi, Şekil 4.19’da gösterilmektedir.



Şekil 4.19 YH sistemi çıkış gücü

Şekil 4.19'da görüldüğü üzere güç taleplerinin YH sistemi tarafından karşılanan kısmı anlık değişimlerden arındırılmış durumdadır. Buradan da anlaşılacağı gibi YH ve UK'nın hibrit bir şekilde kullanılması ve uygun bir yük paylaşımı algoritmasının sisteme adapte edilmesi ile birlikte YH sisteminin anlık güç değişimlerine maruz kalması önlenmektedir. Bu durumun YH sistemi verimliliğinde, dolayısı ile de genel sistem verimliliğinde artış sağlayacaktır. Böylelikle YH sisteminin ömrüne de ciddi bir katkı yapacağı öngörülmektedir.

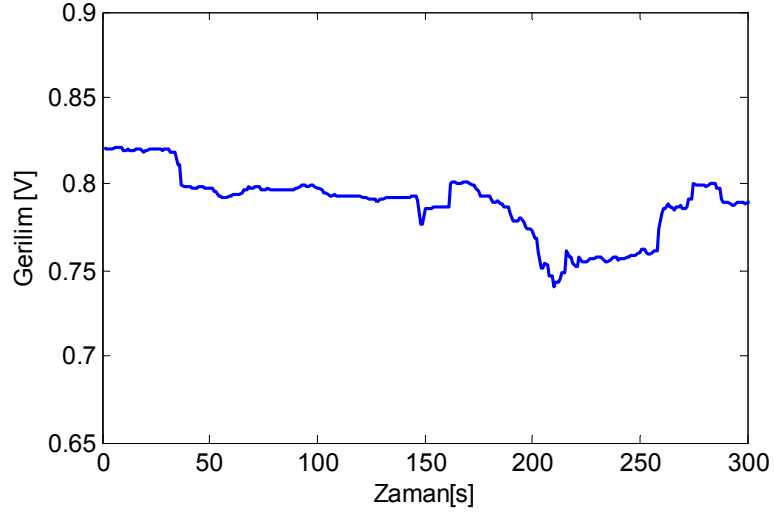
YH yığın geriliminin değişimi ise Şekil 4.20'de gösterilmektedir. YH çıkış gücünde ve dolayısıyla da YH akımındaki artış YH yığın geriliminin azalmasına neden olmaktadır. Bu test süresince YH yığın gerilimi 42,4 V ile 46,6 V arasında değişmektedir.



Şekil 4.20 YH sistemi çıkış gerilimi

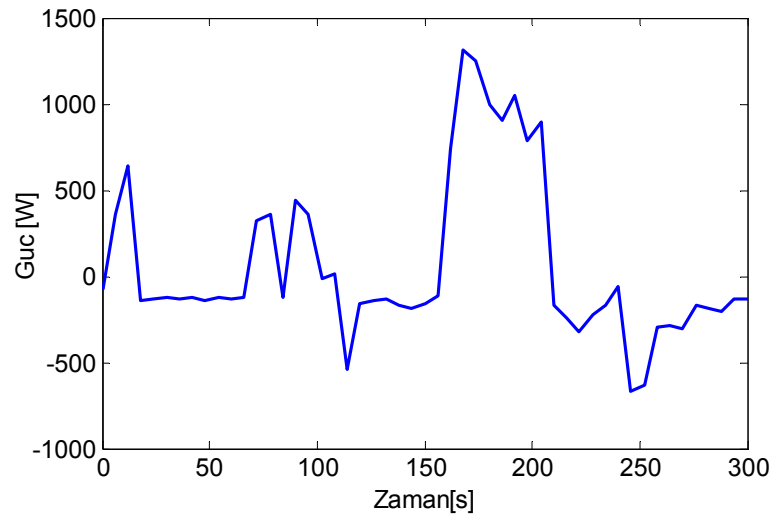
YH sistemi yukarıdaki güç, gerilim değişimlerine bağlı olarak çalışma sonucunda toplam hidrojen tüketimi ise 0,702 kmol olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.21’de ise YH yığınınındaki ortalama hücre geriliminin değişimi gösterilmektedir. Bu gerilim değişimi, YH yığını için hücre başına yaklaşık 0.74-0.82 V’luk bir gerilim aralığına karşılık gelmektedir. Görüldüğü gibi YH yığınının en verimli olduğu ve hücre başına yaklaşık 0,55-0,85 V aralığına denk gelen lineer çalışma bölgesinde işletilmesi sağlanmıştır.



Şekil 4.21 YH sistemi ortalama hücre gerilimi

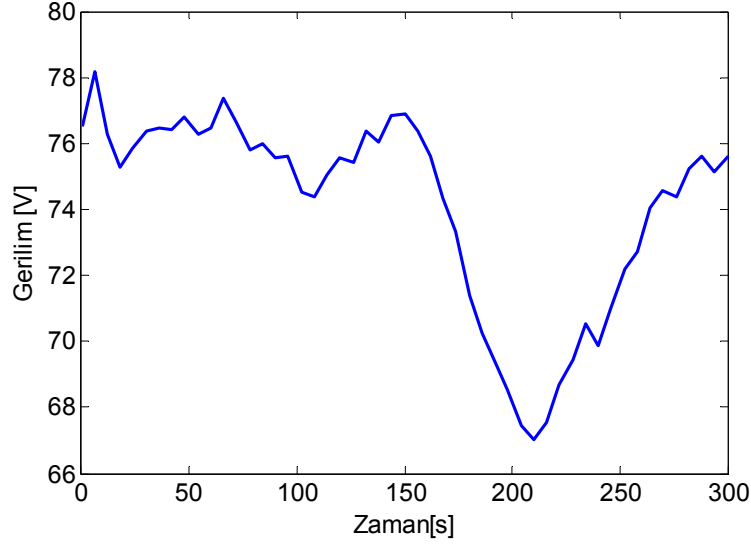
Şekil 4.22’de UK sisteminin karşıladığı güç değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.22 UK sistemi çıkış gücü

Görüldüğü gibi UK sistemi doğal yapısına uygun olarak hibrit sistem güç talebindeki hızlı

değişimlerin büyük bir kısmını üzerine almakta, frenleme enerjisini geri kazanmakta ve gerektiği yerlerde ise YH sistemi tarafından şarj edilmektedir. UK sistemi geriliminin değişimi ise Şekil 4.23’de verilmiştir. Sistemin farklı yüklenme durumlarında UK gerilimi ve doğru orantılı olarak UK sisteminin şarj durumu sistemin yapısında bulunan bulanık mantık kontrolör sayesinde uygun bir aralıkta tutulabilmektedir.

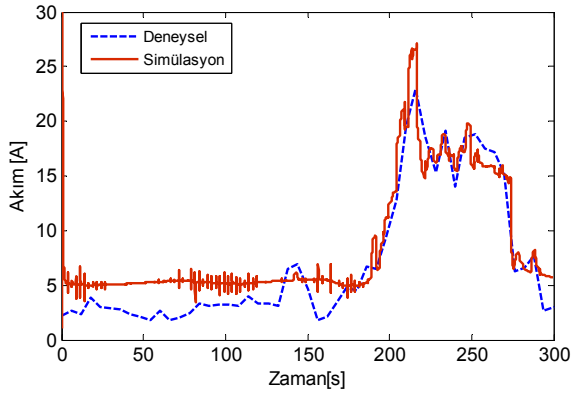


Şekil 4.23 UK sistemi çıkış gerilimi

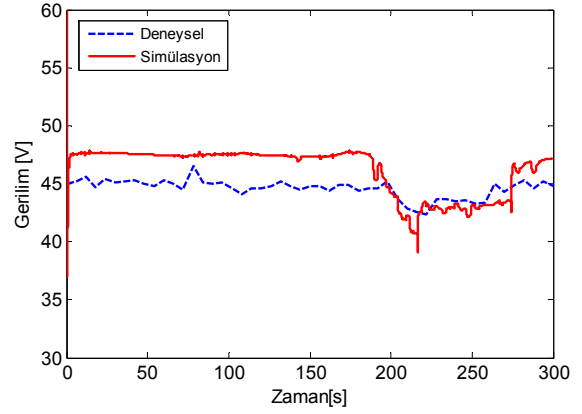
Deneysel çalışmalar neticesinde görüldüğü üzere sisteme dalgacık dönüşümü tabanlı bir yük paylaşımı algoritmasının eklenmesi, özellikle YH sisteminin ömrü ve verimli çalışması bakımından daha uygun sonuçları beraberinde getirmektedir.

4.2.3 Dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık tabanlı enerji yönetim stratejisi için benzetim ve deney çalışmalarının karşılaştırılması

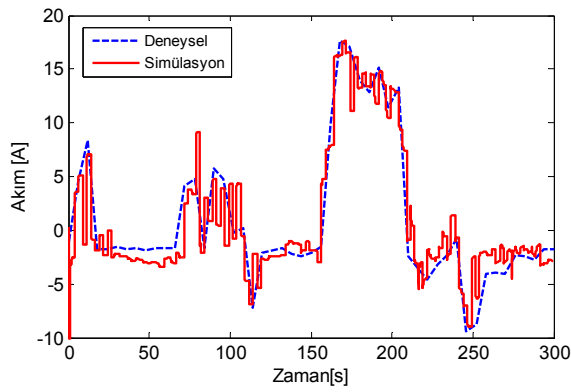
Dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık tabanlı enerji yönetimi için gerçekleştirilen deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar önceki bölümlerde verilen benzetim sonuçlarıyla paralellik arz etmektedir. Bu açıdan deneysel ve benzetim çalışmalarının sonuçlarının karşılaştırılması aşamasında, deneysel çalışmalarda uygulanan ve olumlu sonuç veren dalgacık dönüşümü-bulanık mantık tabanlı enerji yönetim algoritması aynen kullanılarak benzetim çalışması yenilenmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak aşağıda verilmiştir:



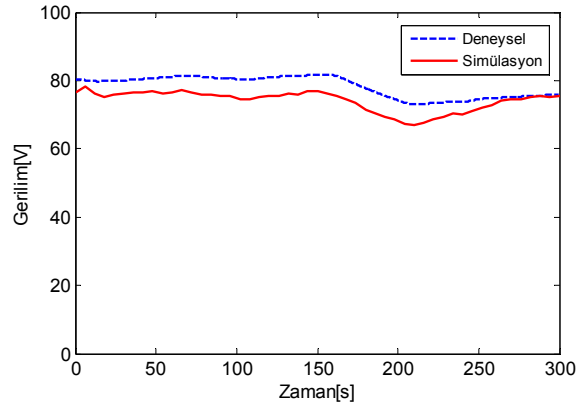
i – YH yığıcı çıkış akımı



ii – YH yığıcı çıkış gerilimi



iii – UK sistemi çıkış akımı



iv – UK sistemi çıkış gerilimi

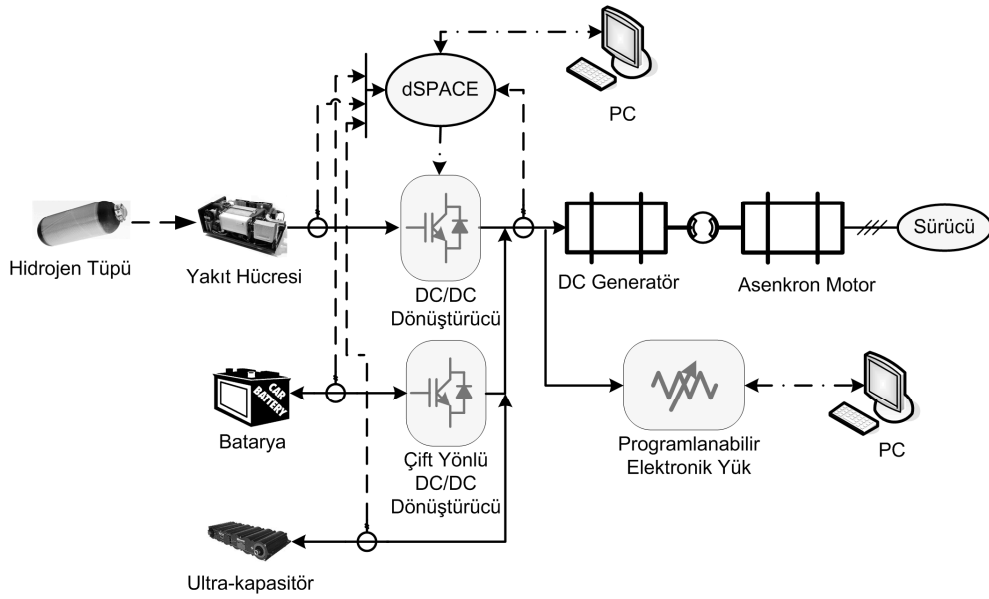
Şekil 4.24 Dalgacık dönüştürme ve bulanık mantık tabanlı enerji yönetim stratejisi için benzetim ve deneysel çalışmaların karşılaştırmalı sonuçları.

Karşılaştırmalı sonuçlardan da görüldüğü üzere sonuçlar birbirine oldukça yakındır. Aradaki farklılıklar ise ölçümlerdeki kalibrasyondan, benzetim çalışmasının ayrıık zamanlı olarak çalıştırılmasından ve benzetim ortamındaki sistemin dinamik cevabının gerçek zamanlı sistem ile olan farkından kaynaklanmaktadır.

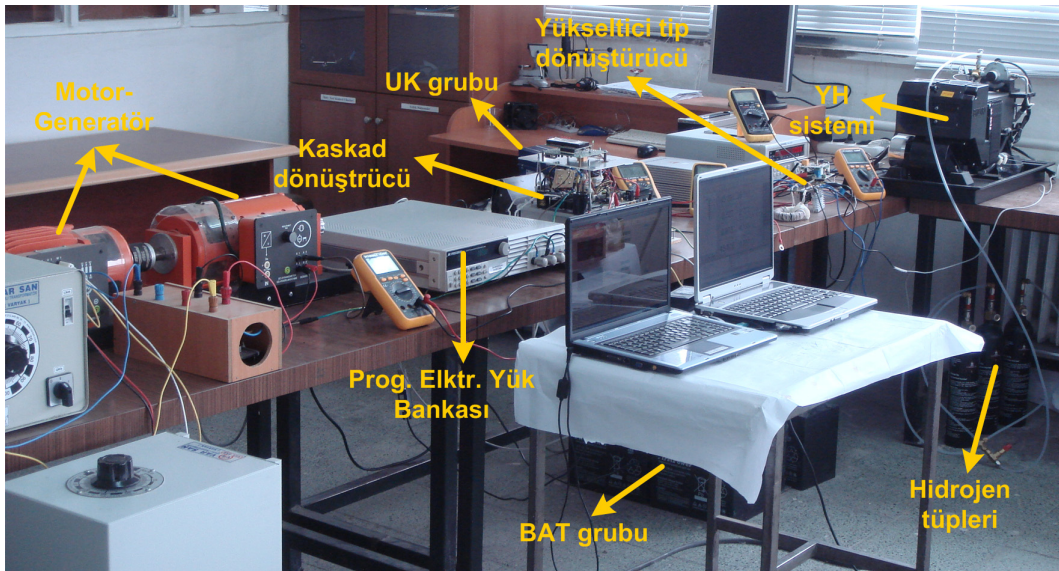
4.3 Elektrikli Taşıtlarda Farklı Bağlantı Topolojilerinin Deneysel Olarak Karşılaştırılması

Tez çalışmasının bu aşamasına kadar gerek benzetim gerekse deneysel çalışmalar ile elektrikli taşıtlarda iyileştirmeye yönelik çalışmalar sıralanmıştır. Bu çalışmalar, enerji depolama sistemlerinin etkileri, dönüştürücü topolojileri ve enerji yönetimi stratejileri üzerinedir. Bu aşamada ise elektrikli taşıtlarda, kaynakların farklı bağlantı topolojilerinin deneysel olarak kıyaslanması yapılarak, her bir bağlantı topolojisine ait sonuçlar irdelenmiştir. Belirtilen deneysel çalışmaları gerçekleştirmek amacı ile öncelikle Şekil 4.25’de görülen test platformu

oluşturulmuştur.



a – Test platformu blok şeması



b – Test platformu görünümü

Şekil 4.25 Test platformu

Test platformunda yer alan bileşenlerden UK grubu ve çift yönlü kaskad dönüştürücü ile ilgili ayrıntılı bilgi tezin 4.2 başlıklı kısmında verildiğinden burada tekrar bahsedilmemiştir. Test platformunda UK grubu dışında kaynak ve enerji depolama ünitesi olarak bir adet YH sistemi ve iki adet batarya grubu kullanılmıştır. Bunlara ait teknik detaylar sırası ile Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.6 PlugPower® Nexa PEMYH teknik özellikleri

Nominal çıkış gücü	1,2 kW
DC gerilim aralığı	22...50 V
Maksimum çıkış akımı	46 A dc
Yakıt girişi	%99,99 saflıkta hidrojen gazı
Maksimum yığın sıcaklığı	70 °C
Ağırlık	13 kg

Çizelge 4.7 Batarya gruplarının teknik özellikleri

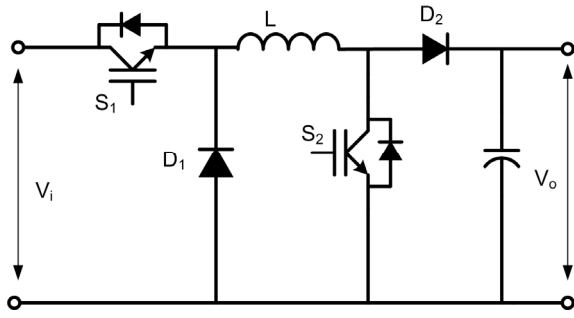
	Batarya grubu-1	Batarya grubu-2
Batarya türü	VRLA	VRLA
Batarya sayısı	3 adet seri bağlı	2 adet seri bağlı
Kapasite	40 Ah	7 Ah
Gerilim	12 V	12 V

YH'nin yakıt (hidrojen) talebini karşılamak için 700 NL kapasiteli üç adet metal-hidrür tüp paralel olarak kullanılmıştır. Test platformunda yüklenme senaryolarının uygulanması amacı ile teknik özellikleri Çizelge 4.8'de verilen programlanabilir elektronik yük bankası kullanılmıştır.

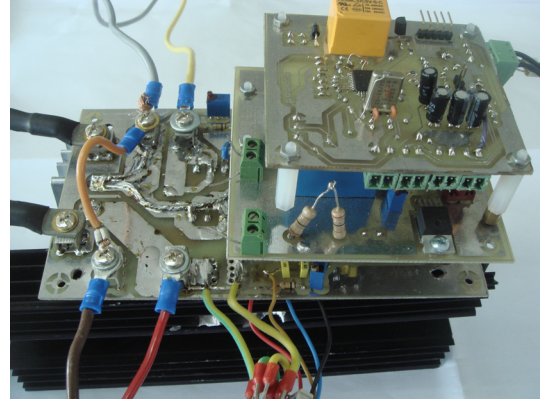
Çizelge 4.8 Programlanabilir elektronik yük bankasının teknik özellikleri

Maksimum güç	1,2 kW
Gerilim aralığı	0,1 – 120 V
Maksimum akım	240 A (@ 0,1 V)
Yükleme durumları	Sabit güç; sabit akım; sabit direnç

Platform üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda yük paylaşımı ve enerji yönetimi için akım kontrollü bir düşürücü-yükseltici tip dönüştürücü de kullanılmıştır. Bu dönüştürücü topolojisi ve prototipi Şekil 4.26'da yer almaktadır.



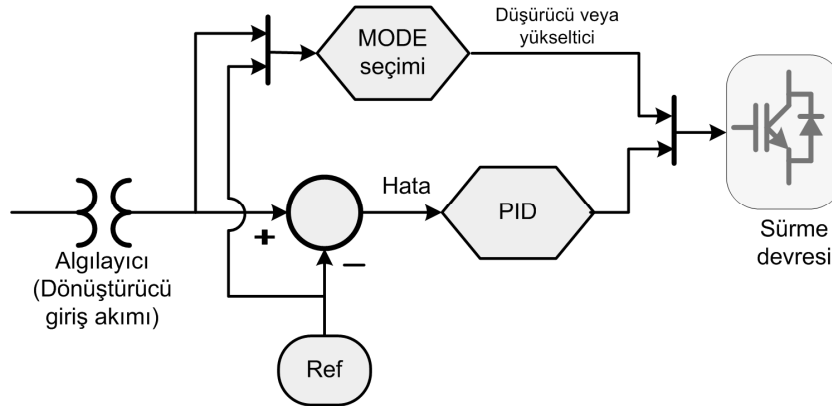
a – Dönüştürücü topolojisi



b – Dönüştürücü prototipi

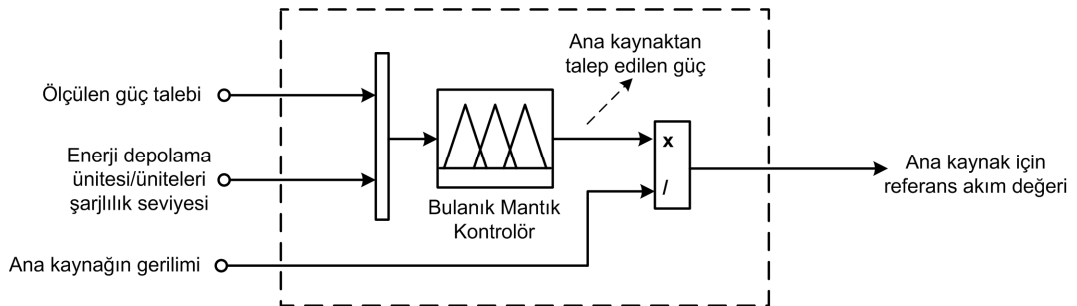
Şekil 4.26 Düşürücü-yükseltici tip dönüştürücü

Akım kontrollü olarak çalışan bu dönüştürücüye ait kontrol algoritması blok şeması ise Şekil 4.27’de verilmiştir.



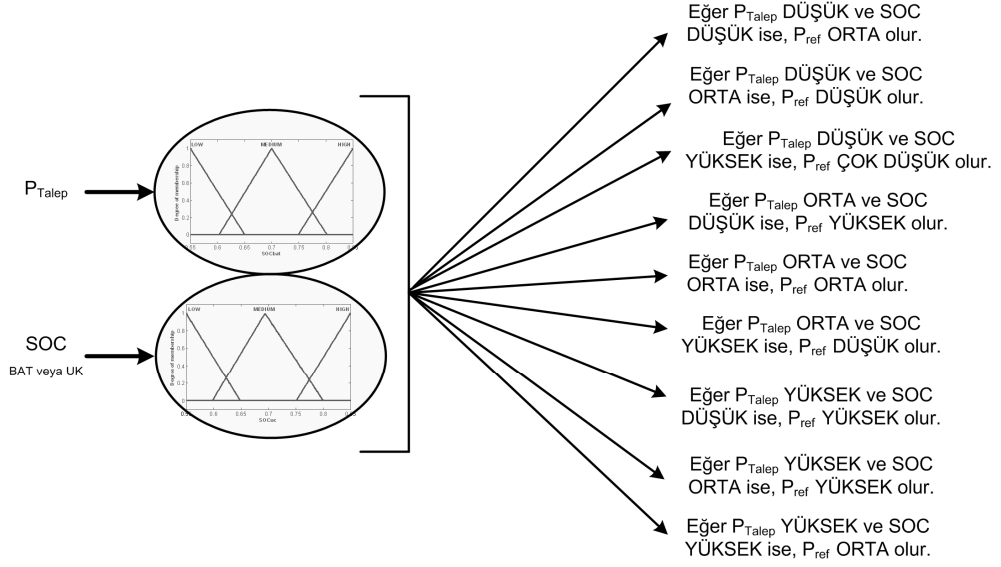
Şekil 4.27 Düşürücü-yükseltici tip dönüştürücünün kontrol algoritması

Şekilde de görüldüğü gibi dönüştürücü giriş akımı ile referans değer arasındaki hata bir PID kontrolör tarafından işlenerek, gerekli olan tetikleme sinyalleri üretilmektedir. Farklı bağlantı topolojileri için gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda enerji yönetim stratejisi için ana kontrol ünitesi olarak dSPACE gömülü kontrol sistemi kullanılmıştır. Şekil 4.28’de görülen bulanık tabanlı geliştirilen kontrol algoritması kodlara dönüştürülerek dSPACE içine gömülmüştür.



Şekil 4.28 Bulanık mantık tabanlı kontrol algoritması

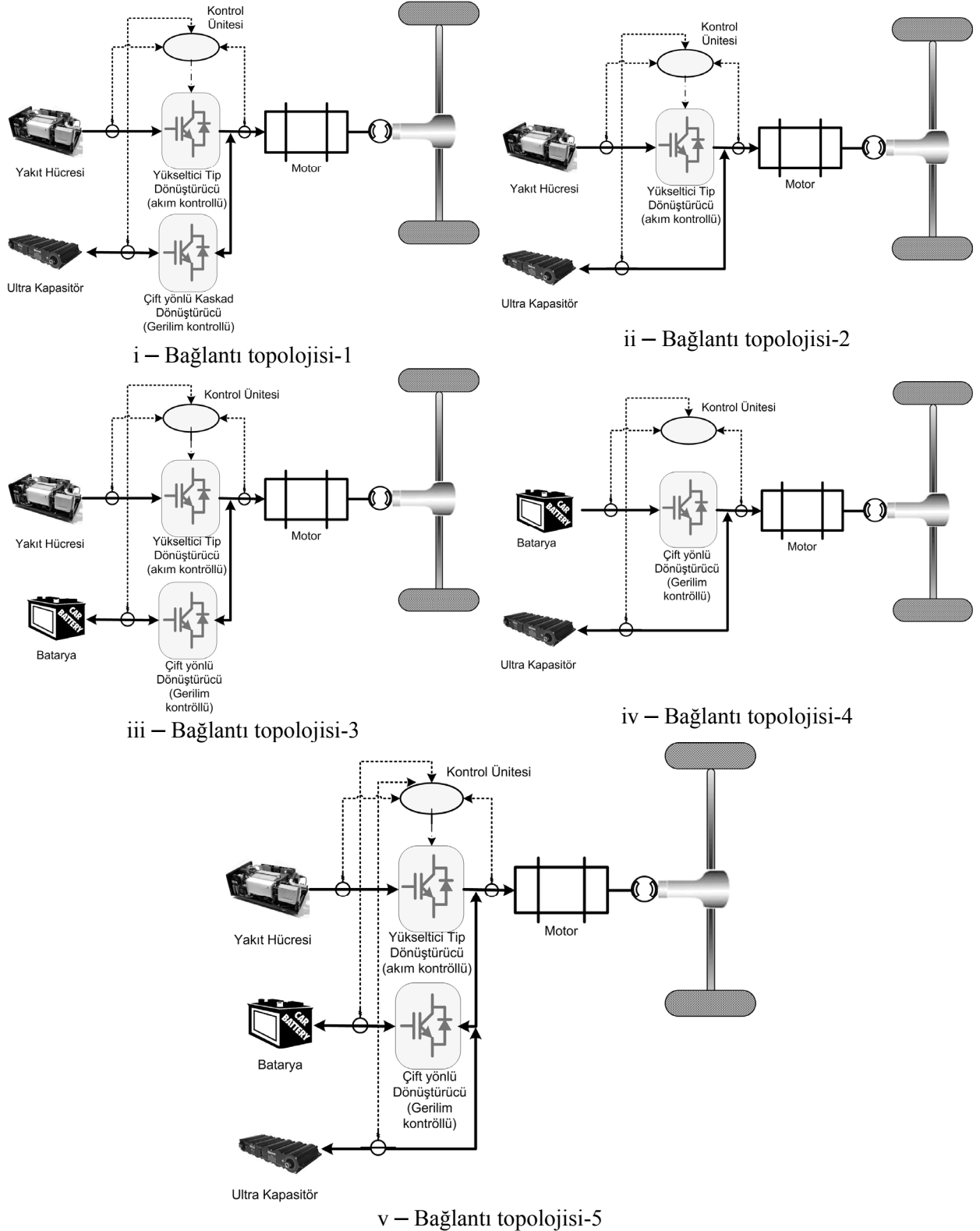
Şekilde görüldüğü gibi bulanık mantık tabanlı enerji yönetim stratejisi; ölçülen güç talebini, enerji depolama ünitesinin şarjlılık seviyesini ve ana kaynağın gerilim seviyesini dikkate alarak ana kaynağın bağlı olduğu düşürücü-yükseltici tip dönüştürücü için referans akım işareti üretmektedir. Bulanık mantık kontrolörün kural tabanlı algoritması ise Şekil 4.29'da yer almaktadır.



Şekil 4.29 Bulanık mantık kural tabanı

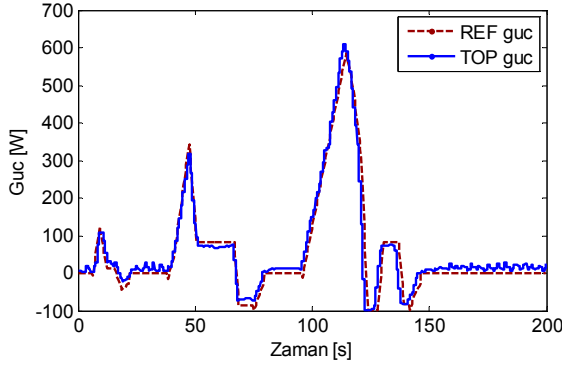
Bu algoritma daha sonra gömülü kontrol ünitesi için ağırlık merkezi yöntemine uygun olarak MATLAB tabanlı kodlara (Ek-1) dönüştürülmüştür.

Farklı bağlantı topolojilerinin deneysel çalışmaları için oluşturulan test platformuna ait bütün bileşenler Şekil 4.30'da görülen beş farklı topolojinin herbiri için tekrar düzenlenerek testler gerçekleştirilmiştir.

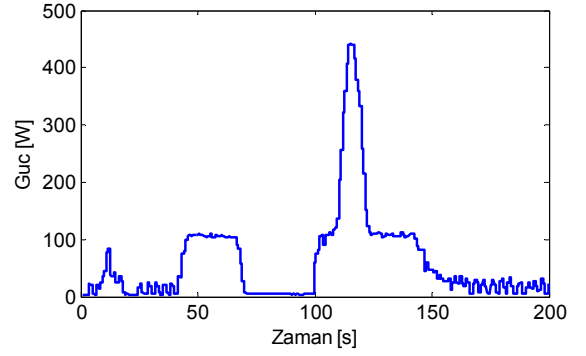


Şekil 4.30 Bağlantı topolojileri

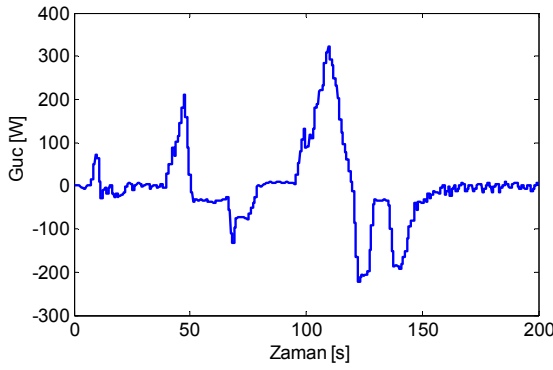
Şekil 4.30'daki her bir bağlantı topolojisi için gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ait sonuçlar sırası ile Şekil 4.31 – 4.35'de verilmiştir.



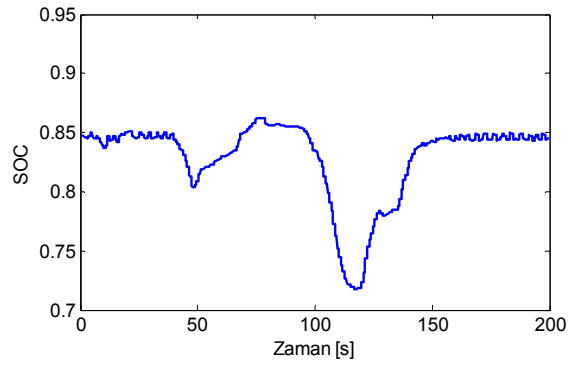
i – Toplam ve referans güç karşılaştırılması



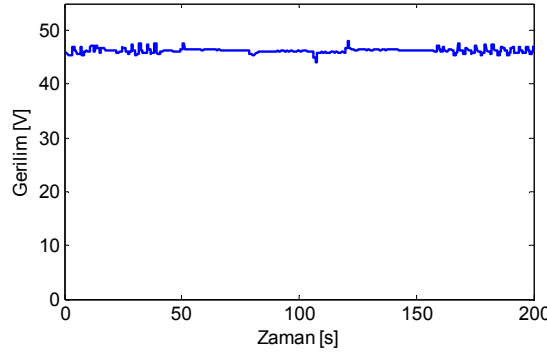
ii – YH gücü karşılaştırması



iii – UK güç değişimi



iv – UK şarjlılık durumu değişimi

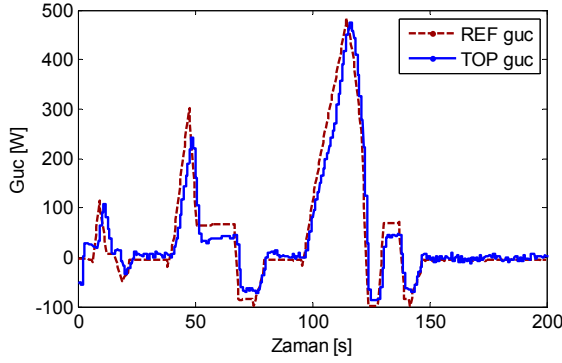


v – DC bara gerilimi değişimi

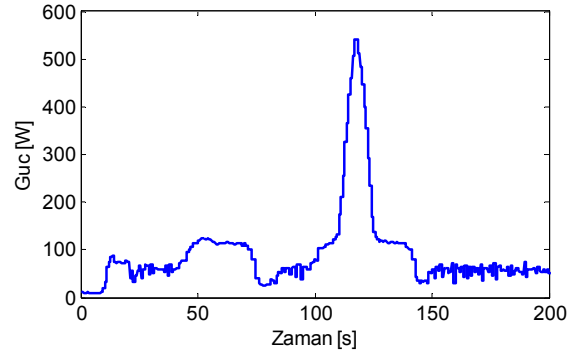
Şekil 4.31 Bağlantı topolojisi-1 için deneysel sonuçlar

Bağlantı topolojisi-1 için gerçekleştirilen deneysel çalışmada elde edilen sonuçlarda referans güç talebinin karşılandığı görülmektedir (Şekil 4.31.i). YH çıkış gücünde ani ve hızlı değişimler pek yaşanmamıştır (Şekil 4.31.ii). Ayrıca UK, faydalı frenleme enerjisini geri kazanmış ve YH çıkış gücü ile talep edilen güç arasındaki farkı karşılamıştır (Şekil 4.31.iii). Bütün bunlara ek olarak, dc bara geriliminde aşırı dalgalanmalar (çökme ve artış) meydana

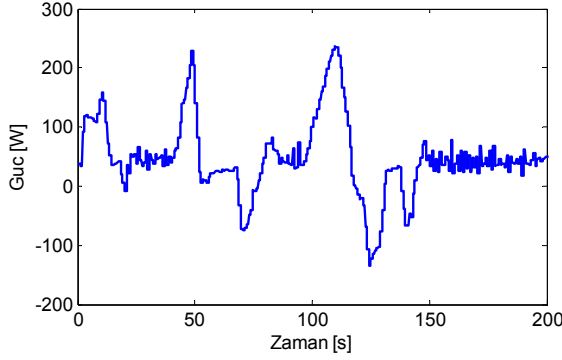
gelmemiştir (Şekil 4.31.v).



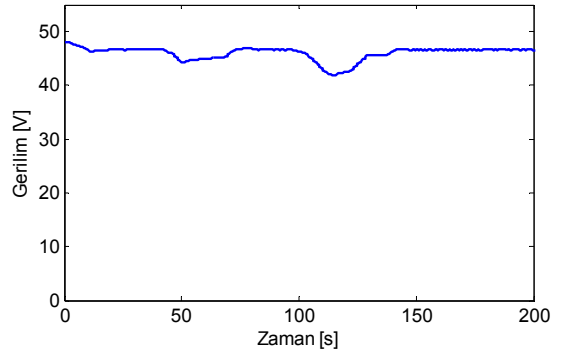
i – Toplam ve referans güç karşılaştırılması



ii – YH gücü karşılaştırması



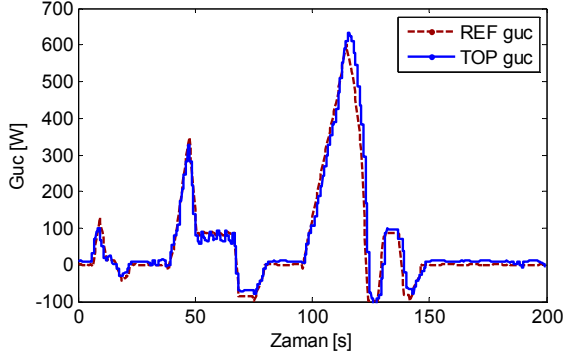
iii – UK güç değişimi



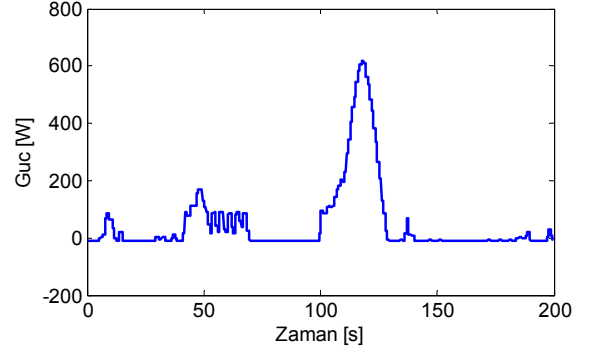
iv – DC bara gerilimi değişimi

Şekil 4.32 Bağlantı topolojisi-2 için deneysel sonuçlar

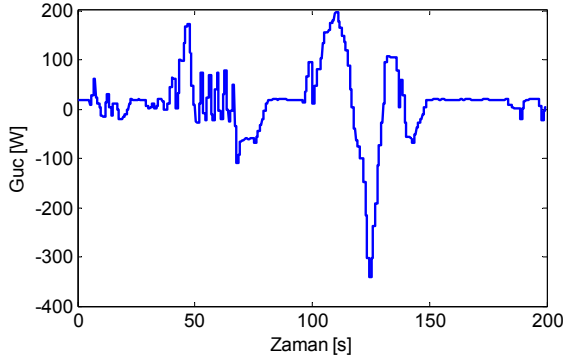
Bağlantı topolojisi-2 için gerçekleştirilen deneysel çalışmada elde edilen sonuçlarda referans güç talebinin karşılanmasında, bağlantı topolojisi-1'deki kadar olmasa da iyi bir sonuç elde edilmiştir (Şekil 4.32.i). YH çıkış gücünde ani ve hızlı değişimler pek yaşanmamıştır ancak, az da olsa sürekli bir güç harcanmıştır (Şekil 4.32.ii). Bunun nedeni ise UK baraya doğrudan bağlı olduğundan bara gerilimini en aza indirmek için YH sürekli sisteme enerji vermek durumunda kalmıştır. Burada yine UK, faydalı frenleme enerjisini geri kazanmış ve YH çıkış gücü ile talep edilen güç arasındaki farkı karşılamıştır (Şekil 4.32.iii). DC bara geriliminde ise belirli aralıklarda gerilim düşümleri oluşmuştur (Şekil 4.32.iv).



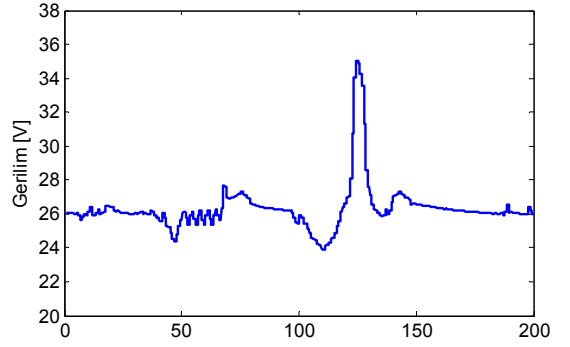
i – Toplam ve referans güç karşılaştırılması



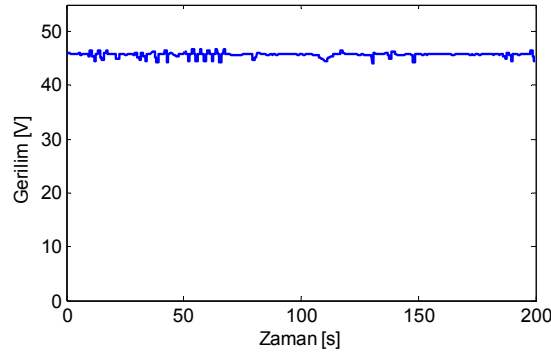
ii – YH gücü gücü karşılaştırması



iii – Batarya güç değişimi



iv – Batarya gerilimi değişimi

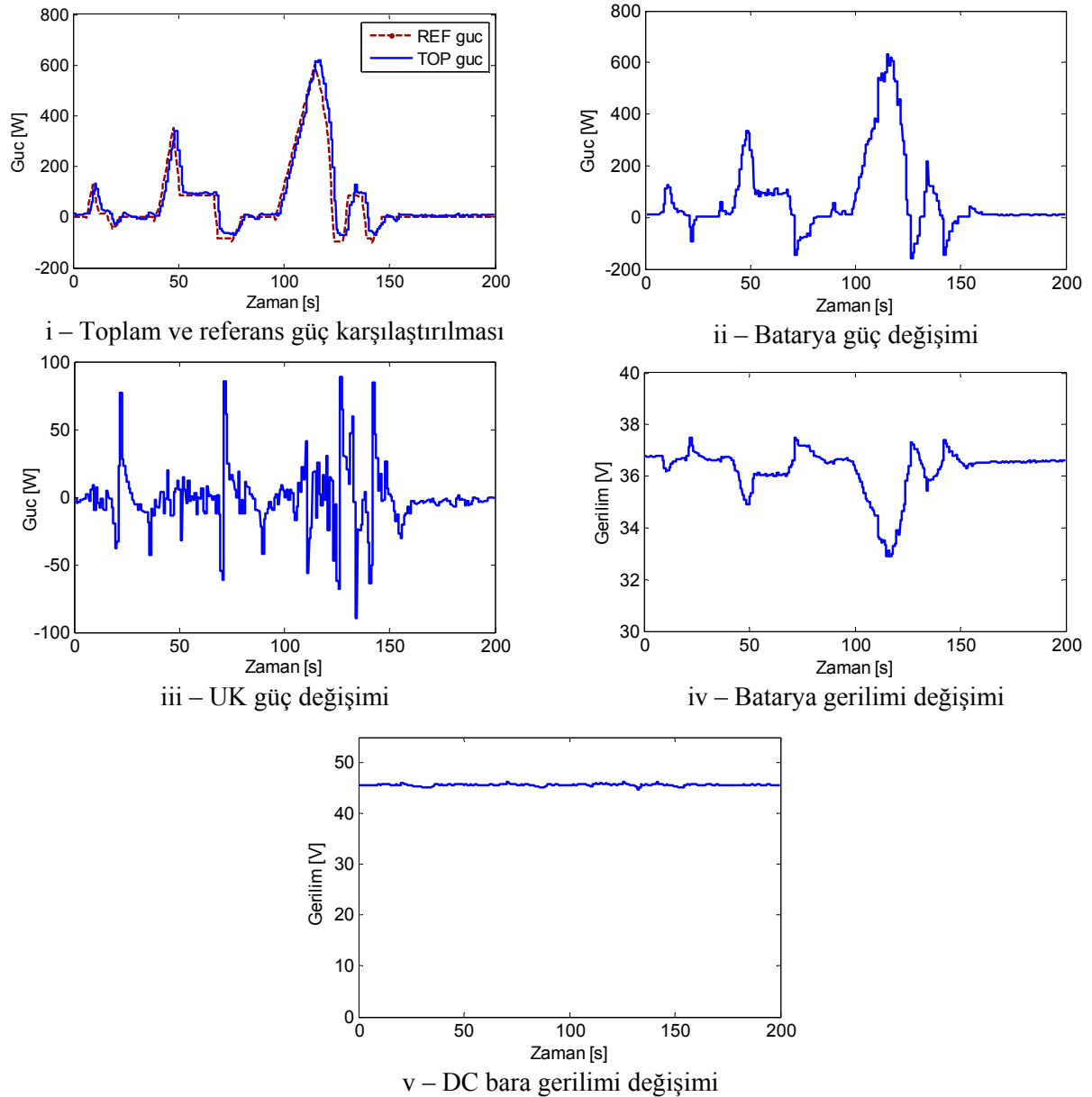


v – DC bara gerilimi değişimi

Şekil 4.33 Bağlantı topolojisi-3 için deneysel sonuçlar

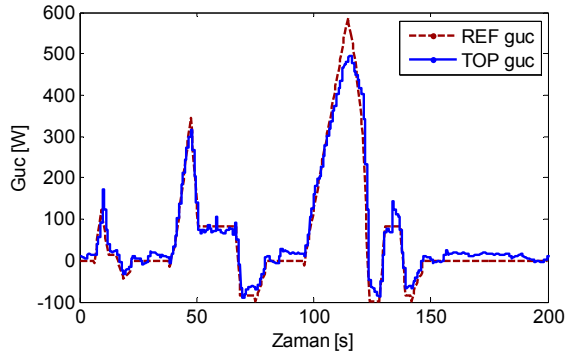
Bağlantı topolojisi-3 için gerçekleştirilen deneysel çalışmada elde edilen sonuçlarda referans güç talebinin karşılandığı görülmektedir (Şekil 4.33.i). YH çıkış gücünde ani ve hızlı değişimler pek yaşanmamıştır. Ancak, belirli bir zaman aralığında (~ 50-60 s) küçük bir aralıkta YH gücünde dalgalanma oluşmuştur (Şekil 4.33.ii). Burada, aynı zaman aralığında batarya gerilimindeki dalgalanmaya bağlı olarak YH gücünde de bir dalgalanma meydana gelmiştir. Bunun nedeni ise, bataryaların genel olarak iç dirençlerinden dolayı batarya sisteminin şarj ve deşarj anlarındaki gerilim ile boştaki gerilim değerleri arasında (batarya

sistemindeki batarya adedine bağlı olarak) birkaç V'lik bir fark oluşmasındandır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmada ana kontrolör ise YH referans güç değerini belirlerken batarya uç gerilimini de dikkate almaktadır. Dolayısı ile batarya gerilimindeki dalgalanma, YH referans güç değerinde ve YH çıkış gücünde dalgalanmaya neden olmaktadır. Burada, batarya faydalı frenleme enerjisini geri kazanmış ve YH çıkış gücü ile talep edilen güç arasındaki farkı karşılamıştır (Şekil 4.33.iii). Ancak batarya geriliminde yaklaşık 125. ve 150. saniyeler arasında aşırı şarj akımına ve iç direncine bağlı olarak geriliminde aşırı bir artış meydana gelmiştir (Şekil 4.33.iv). Bu değer, burada kullanılan Batarya grubu-2 (Çizelge 4.7) için tehlikeli bir durumdur. Bu sonuçlara ek olarak, dc bara geriliminde aşırı dalgalanmalar (çökme ve artış) meydana gelmemiştir (Şekil 4.33.v).

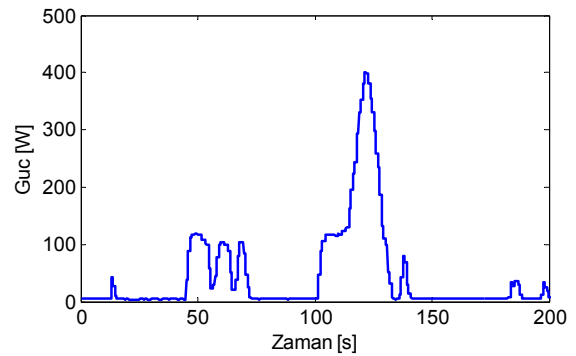


Şekil 4.34 Bağlantı topolojisi-4 için deneysel sonuçlar

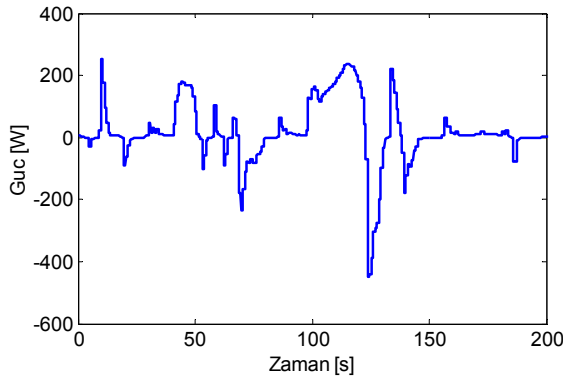
Bağlantı topolojisi-4 için gerçekleştirilen deneysel çalışmada, batarya gerilim kontrollü çift yönlü dönüştürücü üzerinden, UK ise doğrudan sisteme bağlanmıştır. Bu nedenle sistemde bir yük paylaşımı uygulanmamıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde referans güç talebinin karşılandığı görülmektedir (Şekil 4.34.i). Bataryanın ise hem frenleme enerjisini geri kazandığı hem de talep edilen gücün tamamına yakınına karşılığını karşıladığı görülmektedir. Ayrıca UK da faydalı frenleme enerjisini geri kazanmış ve baraya doğrudan bağlı olduğundan gerilimde dalgalanmalara izin vermemiştir.



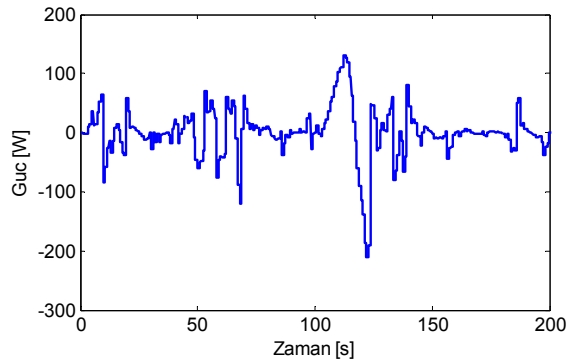
i – Toplam ve referans güçlerin karşılaştırılması



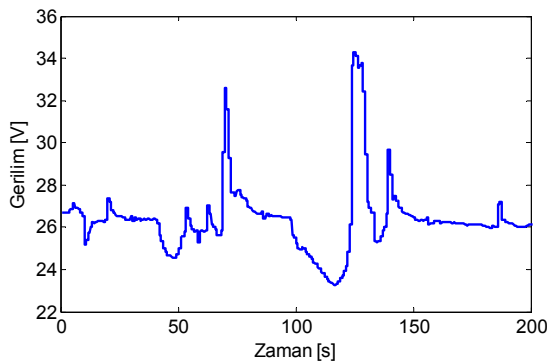
ii – YH gücü



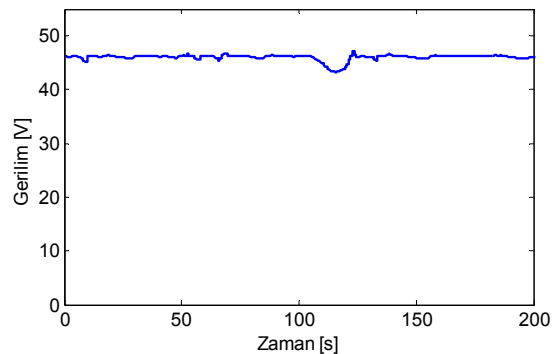
iii – Batarya gücü



iv – UK gücü



iv – Batarya gerilimi



v – DC bara gerilimi

Şekil 4.35 Bağlantı topolojisi-5 için deneysel sonuçlar

Son bağlantı topolojisi (Topoloji-5) için elde edilen sonuçlarda da genel olarak referans güç

talebinin karşılandığı ancak, en fazla güç talebinin olduğu anda ise sistemin talebi tam olarak karşılayamadığı görülmektedir (Şekil 4.35.i). Bu durumun benzeri bara geriliminde de görülmektedir (Şekil 4.35.v). En yüksek güç talebinin olduğu anda bara geriliminde çökme meydana gelmiştir. Bunun nedeni ise, yüklenmenin en fazla olduğu anın öncesinde UK deşarj olmaya başlamış ve azami güç talebi anında hem UK'yı şarj edip bara gerilimini nominal değerine çıkarmak, hem de talebi karşılamak için kaynakların gücü yeterli olmamıştır. YH çıkış gücünde ise 50. ve 100. saniyeler arasında, bağlantı topolojisi-3'dekine benzer ve aynı nedenle dalgalanma oluşmuştur ancak, ani ve hızlı değişimler pek yaşanmamıştır. Ayrıca batarya geriliminde de yine topolojisi-3'deki ile aynı nedenle aşırı artışlar meydana gelmiştir.

Deneysel çalışmaları gerçekleştirilen beş adet farklı bağlantı topolojisi için elde edilen sonuçların irdelenmesine ek olarak, yakıt tüketimi ve faydalı frenleme enerjisinin geri kazanımı bakımından karşılaştırmalı sonuçlar Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9 Yakıt tüketimi ve kazanılan faydalı frenleme enerjisi bakımından topolojilerin karşılaştırılması sonuçları

Topolojiler	Yakıt tüketimi	Kazanılan faydalı frenleme enerjisi
Topoloji-1 (YH/UK)	430,3 (NL)	2574 (Ws)
Topoloji-2 (YH/UK _{doğrudan bağlı})	554,3 (NL)	1613 (Ws)
Topoloji-3 (YH/BAT)	438,7 (NL)	2124 (Ws)
Topoloji-4 (BAT/UK)	-	2559 (Ws)
Topoloji-5 (YH/BAT/UK)	317,8 (NL)	1889 (Ws)

Çizelge 4.9'da görüldüğü üzere yakıt tasarrufu bakımından en iyi sonucu veren bağlantı topolojisi, YH, batarya ve UK'nın birlikte kullanıldığı 5 numaralı topolojidir. Faydalı frenleme enerjisinin geri kazanılması açısından en iyi sonuçlar topoloji-1 ve 4 ile yapılan deneysel çalışmalardan elde edilmiştir. Hem yakıt tasarrufu ve hem de frenleme enerjisinin geri kazanılması bakımından en kötü sonuçlar ise topoloji-2'den elde edilmiştir. YH ve bataryanın birlikte kullanıldığı topoloji-3'den elde edilen sonuçlar ise diğer topolojilere kıyasla vasat derecededir.

Topoloji-5'in faydalı frenleme enerjisinin kazanımında gerilerde olmasına rağmen yakıt tasarrufunda en iyi olmasındaki en büyük etken, YH'nin yanında batarya ve UK'nın birlikte kullanılmasıdır. Şekil 4.35.iv incelendiğinde, testin sonunda batarya geriliminin, başlangıçtaki

değerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, bataryanın sisteme verdiği enerjinin aldığından daha fazla olduğunun göstermektedir. Bu sayede YH daha az enerji harcamış ve buna bağlı olarak da daha az yakıt tüketimi gerçekleşmiştir.

Faydalı frenleme enerjisini geri kazanımında en kötü sonuçlar alınan Topoloji-2 ve 5'nin ortak yanı, her iki topolojide de UK sisteme doğrudan bağlıdır. Burada, UK'nın sisteme doğrudan bağlanmasının uygun olmayacağı yargısına varılabilir. Ancak, topoloji-4'de de UK sisteme doğrudan bağlı olmasına rağmen, faydalı frenleme enerjisinin kazanılmasında oldukça iyi bir sonuç elde edilmiştir. Bu duruma açıklık getirmek için topoloji-4 ve 5'deki batarya gerilimi değişimleri (Şekil 4.34.iv ve Şekil 4.35.iv) incelendiğinde, topoloji-5'de batarya geriliminde çok fazla ve geniş bir aralıkta değişim yaşandığı görülmektedir. Bunun nedeni ise topoloji-5'de kullanılan batarya grubunun (Çizelge 4.7, batarya grubu-2) kapasitenin daha düşük olması ve bu nedenle yüklenmeye bağlı olarak geriliminde daha fazla değişimin meydana gelmesidir. Sistemdeki tüm kontrol devreleri, ölçme ve karar vermede gerilimdeki bu değişimleri de dikkate almaktadır. Böylece sistemin verimi ve performansı da bu değişimlerden önemli ölçüde etkilenmektedir.

4.4 Sonuç

Üç farklı test platformu üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, farklı güç dönüştürücülerinin, enerji yönetim stratejilerinin ve hibrit bağlantı topolojilerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Faydalı frenleme enerjisinin daha iyi kazanılmasına yönelik yapılan deneysel çalışmalarda, enerji depolama üniteleri ile birlikte kaskad bağlı çift yönlü güç dönüştürücü topolojisinin kullanımının daha avantajlı olduğu görülmüştür. Farklı enerji stratejilerinin karşılaştırılmasında ise, (dalgacık dönüşümü ile) yük paylaşımli enerji yönetim stratejisinin verimlilik ve performans açısından daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak beş farklı hibrit bağlantı topolojisinin karşılaştırılmasında, faydalı frenleme enerjisinin geri kazanımında Topoloji-1 (YH/UK) ve Topoloji-4 (BAT/UK) ile en iyi sonuçlar alınmıştır. Bunun yanında, yakıt (hirojen) tüketiminde ise en iyi sonuç ise Topoloji-5 (YH/BAT/UK) ile elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Ulaşım insanlar için temel bir ihtiyaçtır. Bu yönüyle ulaşımı daha hızlı, rahat ve ekonomik kılmak için, insanoğlu hep bir arayış içindedir. Bu arayış sayesinde geçmişten günümüze sürekli olarak ulaşım gereçlerinde ve teknolojisinde bir ilerleme gerçekleşmiştir. Ancak 19. yüzyılın sonlarında ve 20. yüzyıl boyunca ulaşım teknolojilerinde, insanlık tarihinde o zamana kadar alınan mesafenin çok üzerinde bir gelişme yaşanmıştır ve günümüzde bu gelişme baş döndürücü bir hızla devam etmektedir. Bugün, iki-üç asır önceki insanların bir yılda ancak gidebildikleri bir uzaklığa uçakla yolculuk sayesinde bir günde varılabilmektedir.

Ulaşım teknolojileri ve gereçleri; kara, deniz ve hava olmak üzere üç farklı sınıfa ayrılmaktadır. Hava yoluyla ulaşım yaklaşık iki asırlık geçmişi ile diğer ulaşım yollarına kıyasla çok yenidir. Ancak diğer iki ulaşım yoluna ait teknolojilerde de her geçen gün büyük gelişmeler yaşanmaktadır. Azalan fosil kökenli yakıt rezervleri ve artan çevresel kaygılar nedeni ile özellikle binek kara taşıtlarında, alternatif taşıt teknolojileri ile ilgili çalışmalara büyük maddi kaynaklar ayrılmaktadır. Alternatif taşıt teknolojisi geliştirmeye yönelik çalışmalarda ise elektrikli taşıtlar öne çıkmaktadır.

Elektrikli taşıtlar içten yanmalı taşıtlara kıyasla, düşük emisyon oranları ve yüksek verim gibi üstün yanlara sahiptir. Bu nedenle birçok taşıt üreticisi ve otorite, elektrikli taşıtların yakın gelecekte belirli bir oranda içten yanmalı taşıtların yerini alacağını öngörmektedir. Ancak elektrikli taşıtlarda, menzil başta olmak üzere çözüm ve iyileştirme bekleyen eksiklikler de mevcuttur. Bu yönüyle elektrikli taşıtlara geçiş sürecinde ilk aşama olarak, içten yanmalı motor ve elektrik motorunun birlikte kullanıldığı hibrit (seri hibrit veya paralel hibrit) yapılar düşünülmektedir. Elektrikli taşıtlarda kullanılacak YH ve batarya gibi güç kaynaklarının maliyetlerinin uygun seviyelere düşmesi ve bataryaların yeniden şarj süresinin kısalmasına bağlı olarak, mevcut elektrikli taşıt pazarının çok daha genişleyeceği beklenmektedir.

Günümüzde elektrikli taşıtlar ile ilgili yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu da menzil, performans ve verimlilik artırma amacı taşımaktadır. Bu nedenle çalışmaların belirli bir kısmı, faydalı frenleme enerjisinin geri kazanılmasına, enerji yönetim stratejisine ve hibritleştirme topolojilerine odaklanmıştır.

Bu tez çalışmasında da elektrikli taşıtlarda faydalı frenleme enerjisinin daha iyi kazanılması, iyi bir enerji yönetim stratejisinin ve hibritleştirme topolojisinin elde edilmesi amacı ile benzetim ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları sürecinde, tüm

sisteme ait her alt sistem/bileşen için dinamik bir model oluşturulmuş ve sistem entegrasyonu sağlanarak çalışmalar tamamlanmıştır. Deneysel çalışmalar sürecinde ise gerekli tasarım ve prototipler tamamlanıp, test platformları kurularak deneyler tamamlanmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmalardan elde edilen veriler irdelenerek sunulmuştur. Benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen ve irdelenen tüm bu verilerden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

Tez süresince hem benzetim hem de deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi ve elde edilen sonuçların paralellik göstermesi, sonuçların doğruluğunu ve buna bağlı olarak güvenilirliğini arttırmaktadır. Ayrıca, öncelikli olarak benzetim çalışmalarının yapılması, deneysel çalışmalar için önemli bir referans oluşturmakta ve oluşabilecek birçok durum için öngörü sahibi olmayı sağlamaktadır. Örnek olarak; YH/BAT/UK hibrit yapısı için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında, YH/UK hibrit yapısına kıyasla yakıt tasarrufu açısından çok daha iyi bir sonuç alınmıştır. Benzer bir sonuç (Çizelge 4.9) yapılan deneysel çalışlarda da elde edilmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen benzetim çalışmaları ile yük paylaşımının avantajı da belirgin bir şekilde ortaya konulmuştur. Daha sonra gerçekleştirilen ve tezin 4.2 başlıklı kısmında sonuçları verilen deneysel çalışmalarda da, benzetim çalışmalarını destekler bir biçimde yük paylaşımli enerji yönetim stratejisinin avantajı açıkça görülmüştür.

Benzetim çalışmalarından elde edilen veriler değerlendirildiğinde, elektrikli taşıtlarda YH gibi enerji depolama kabiliyeti olmayan kaynaklarla birlikte mutlaka bir enerji depolama ünitesi kullanılmalıdır. Ayrıca kullanılan enerji depolama ünitesi, sisteme çift yönlü bir dönüştürücü üzerinden bağlanmalıdır. Çift yönlü dönüştürücü ek bir maliyet getirmekle birlikte sistem verimliliğini ve performansına olumlu yönde büyük bir katkı sağlamaktadır. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler dikkate alındığında ise, çift yönlü dönüştürücü topolojisinin, düşük taşıt hızlarında yapılacak faydalı frenlemede de frenleme enerjisini kazanabilecek bir özelliğe sahip olması gerekmektedir.

Hem benzetim ve hem de deneysel çalışmalardan elde edilen verilerden çıkarılan diğer bir sonuç ise, yük paylaşımı yapılmadan uygulanacak bir enerji yönetim stratejisinin performans ve verimlilik açısından yeterli olmayacağıdır. Yük paylaşımının uygulanmadığı testlerde YH ve bataryaya gibi ana kaynaklar anlık yüklenmelere maruz kalmıştır. Bu durum, UK'ya kıyasla gibi cevap verme süresi nispeten uzun olan YH ve bataryaya kaynaklarda verimin ve ömrün azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca bataryaya gücündeki ani ve büyük değişimler nedeni ile bataryaya iç direncine bağlı olarak bataryaya ısınmakta ve şarj-deşarj kayıpları da artmaktadır. Benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen bir diğer sonuç ise, enerji yönetim stratejisi

ile daha başarılı bir sonuç elde etmek için uygun bir bağlantı topolojisinin seçilmesidir.

Elektrikli taşıtlarda bağlantı topolojisi olarak, YH sisteminin yüksek maliyeti dikkate alındığında, günümüz için en uygun topoloji batarya ve UK'nın birlikte kullanıldığı topoloji-4 olacaktır. Ancak ileride YH maliyetinin uygun seviyelere inmesi ile topoloji-1 (YH/UK) ve topoloji-5'i (YH/BAT/UK) tercih etmek daha uygun olacaktır.

Topoloji-5 ile faydalı frenleme enerjisinin geri kazanılmasında çok başarılı bir sonuç elde edilemese de, yakıt tasarrufunda oldukça iyi bir sonuç elde edildiği Çizelge 4.9'da açıkça görülmektedir. Bunun yanında Şekil 4.35 incelendiğinde, topoloji-5'nin önemli bir avantajının daha olduğu görülmektedir. Yakıt tüketiminin az olmasına bağlı olarak YH'den çekilen güç de (Şekil 4.35.ii) daha düşük seviyelerdedir. Bu durum dikkate alınarak bir boyutlandırma yapıldığında, YH kullanılan diğer topolojilere kıyasla daha düşük boyutlarda bir YH sistemi yeterli olacaktır. Burada batarya kullanımı ek bir maliyet gibi gözükse de, YH maliyetindeki düşüş dikkate alınırca batarya ek maliyetinin çok büyük olmayacağı görülecektir. Ayrıca, topoloji-5 faydalı frenleme enerjisinin geri kazanılması açısından da avantajlı kılmak için topolojiye bir dönüştürücü daha eklemek yararlı olacaktır. Eklenen bu dönüştürücü çift yönlü ve akım kontrollü olarak batarya çıkışına bağlanıp, UK çıkışına ise mevcut gerilim kontrollü çift yönlü dönüştürücü bağlanmalıdır. Topoloji-5'de yapılacak bu iyileştirmenin çok daha iyi sonuçlar vereceği öngörülmektedir. Topoloji-5 için önerilen iyileştirmeler ise gelecekte yapılması planlanan çalışmalar arasındadır. Ayrıca, enerji depolama sistemine sahip elektrikli taşıtların akıllı şebeke ile bağlantısı ve şebeke güç kalitesini düzeltmeye yönelik geliştirme çalışmaları da yine yakın gelecekte yapılması planlanan çalışmalar dahilindedir.

Tez süresince gerçekleştirilen tüm çalışmalar ve çıkarılan sonuçlar değerlendirildiğinde, elektrikli taşıtlar ile ilgili gerçekleştirilecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler dikkate alınmalıdır:

- Elektrikli taşıtlarda YH veya batarya gibi güç kaynaklarının tek başına kullanılması yerine, UK gibi güç yoğunluğu yüksek enerji depolama sistemleri ile birlikte kullanılması daha uygun olacaktır.
- Faydalı frenleme enerjisini daha iyi kazanabilmek için güç yoğunluğu yüksek bir enerji depolama ünitesi ile birlikte, çift yönlü düşürücü-yükseltici çalışabilen kaskad topoloji benzeri bir dönüştürücü de gerekmektedir.

- Elektrikli taşıtlarda enerji yönetimi veya yük paylaşımının tek başına kullanılması yerine birlikte kullanılması ile daha başarılı sonuçlar alınabilecektir.
- Bataryalı elektrikli taşıtlarda, batarya ömrünü arttırmak ve şarj-deşarj kayıplarını azaltmak için akımın değerini ve değişim hızını sınırlayabilen çift yönlü bir dönüştürücü kullanılmalıdır.
- YH gibi yüksek maliyetli bir ana kaynağın boyutunu en az indirmek ve yakıt tasarrufu sağlamak için, güç yoğunluğu yüksek olan bir enerji depolama ünitesine (UK) ek olarak batarya gibi enerji yoğunluğu yüksek bir depolama ünitesi de kullanılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Adzakpa, K. P., Agbossou, K., Dube, Y., Dostie, M., Fournier, M. ve Poulin, A., (2008), "PEM Fuel Cells Modeling and Analysis Through Current and Voltage Transient Behaviors", *IEEE Trans. Energy Conversion*, 23(2): 581-591.
- Andujar, J. M., Segura, F. ve Vasallo, M. J., (2008), "A suitable model plant for control of the set fuel cell-DC/DC converter", *Renewable Energy*, 33(4):813-826.
- Ates, Y., Erdinc, O., Uzunoglu M., Vural B., (2010), "Energy management of an FC/UC hybrid vehicular power system using a combined neural network-wavelet transform based strategy", *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(2):774-783.
- Barbir, F., (2005), *PEM Fuel Cells (Theory and Practice)*, Elsevier Academic Press, California, USA.
- Bauman, J. ve Kazerani, M., (2008), "A Comparative Study of Fuel-Cell–Battery, Fuel-Cell–Ultracapacitor, and Fuel-Cell–Battery–Ultracapacitor Vehicles", *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 57(2):760-769.
- Bentley, P., Stone, D. A., (2005), "Schofield, The parallel combination of a VRLA cell and supercapacitor for use as a hybrid vehicle peak power buffer", *J. Power Sources*, 147(1-2):288-294.
- Cacciato, M., Caricchi, F., Giuhlii, F., 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.
- Chau, K. T. ve Wong, Y. S., (2002), "Overview of power management in hybrid electric vehicles", *Energy Conversion and Management*, 43(15):1953-1968.
- Chen, M. ve Mora, G. A. R., (2006) "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21:504-511.
- Chen, S. M. ve Huang, C. M., (2008), "A new approach to generate weighted fuzzy rules using genetic algorithms for estimating null values", *Expert Systems with Applications*; 35:905–917.
- Corbo, P., Migliardini, F. ve Veneri, O., (2007), "Performance investigation of 2.4 kW PEM fuel cell stack in vehicles", *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 32(18):4340-4349.
- Darkrim, F. L., Malbrunot P. ve Tartaglia G. P., (2002), "Review of hydrogen storage by adsorption in carbon nanotubes", *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(2):193-202
- Di Napoli, A., Crescimbin, F., Rodo, S., Solero, L., (2002a), "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.
- Di Napoli, A., Crescimbin, F., Solero, L., Caricchi, F. ve Capponi F.G., (2002b), "Multiple-input DC-DC power converter for power-flow management in hybrid vehicles", *Industry Applications Conference*, 13-18 Oct. 2002, 3:1578-1585.
- Dobbs, B.G., Chapman, P.L., (2003), "A multiple-input DC-DC converter topology", *IEEE Power Electronics Letters*, 1(1):6-9.
- 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.

- Erdinc, O., Vural, B., Uzunoglu, M., (2009c), "A dynamic lithium-ion battery model considering the effects of temperature and capacity fading," International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 9-11 June 2009, Capri - Italy.
- Erdinc, O., Vural, B., Uzunoglu, M., (2009a), "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.
- Erdinc, O., Vural, B., Uzunoglu, M., Ates, Y., (2009b), "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.
- 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.
- Gao, L., Liu, S. and Dougal, R. A., (2002), "Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation", *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 25:495-505.
- Gualous, H., Bouquain, D., Berthon, A. ve Kauffmann, J. M., (2003), "Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature", *Journal of Power Sources*; 123(1):86-93.
- Haiping, X., Gang M., Changfu, S., Xuhui, W., 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.
- Helmolt, R. V., Eberle, U., (2007) "Fuel Cell Vehicles: Status 2007", *J Power Sources*; 165 (833-843).
- Honda fuel cell power FCX (December 2004) (Online) Available: <http://world.honda.com/FuelCell/FCX/FCXPK.pdf>, Pres Information.
- Huang-Jen, C., Hsiu-Ming, H., Li-Wei, L., 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.
- Hussain, M. M., Dincer, I., Li, X., "A preliminary life cycle assessment of PEM fuel cell powered automobiles", *Applied Thermal Engineering* 2007; 27: 2294-2299.
- Jain, M., Jain, P.K., Daniele, M., (1997), "A bi-directional DC-DC converter topology for low power application", *Power Electronics Specialists Conference PESC '97*, 22-27 June 1997, 1:804-810.
- Jeong, K. S., Lee, W. Y., Kim C. S., (2005), "Energy management strategies of a fuel cell/battery hybrid system using fuzzy logics", *Journal of Power Sources*; 145(2):319-326.
- Joshi, R. P. ve Deshmukh A. P., (2006), "Hybrid Electric Vehicles: The Next Generation Automobile Revolution" *IEEE Conference on Electric and Hybrid Vehicles*, 18-20 Dec. 2006, 1-6.
- Khan, M. J., Iqbal M. T., (2005), "Dynamic modeling and simulation of a small wind–fuel cell hybrid energy system", *Renewable Energy*, 30(3):421-439.
- Kim, J.-H., Lee, H., Han, S.-C., Kim, H.-S., Song, M.-S. Lee, J.-Y.,(2004), "Production of Hydrogen From Sodium Borohydride in Alkaline Solution : Development of Catalyst with High Performance", *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(3):263-267.

- Lajnef, W., Vinassa, J. M., Briat, O., Azzopardi, S. ve Woïrgard E., (2007), "Characterization methods and modelling of ultracapacitors for use as peak power sources", *Journal of Power Sources*; 168(2):553-560.
- Lam, L. T., Louey, R., Haigh, N. P., Lim, O. V., Vella, D. G., Phyland, C. G., Vu, L. H., Furukawa, J., Takada, T., Monma, D., Kano, T., (2007) "VRLA Ultrabattery for high-rate partial-state-of-charge operation", *J. Power Sources*, 174(1):16-29.
- Larminie, J. ve Lowry, J., (2003), *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley&Sons, West Sussex, England.
- Larminie, J., Dicks, A., (2005) *Fuel Cells Systems Explained*, John Wiley& Sons, West sussex, England.
- Leondes, C. T., (1998), *Fuzzy logic and expert systems application*, Academic Press, California, USA.
- Li C.-Y., Liu G.-P., (2009), "Optimal fuzzy power control and management of fuel cell/battery hybrid vehicles", *Journal of Power sources*, 192(2):525-533.
- Liu D., Li, H., (2006), "A ZVS Bi-Directional DC-DC Converter for Multiple Energy Storage Elements", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21(5):1513-1517.
- Mann, R. F., Amphlett, J. C., Hooper, M. A. I., Jensen, H. M., Peppley, B. A. ve Roberge P. R., (2000), "Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell", *Journal of Power Sources*, 86(1-2):173-180.
- Marchesoni, M., Vacca, C., (2007) "New DC-DC Converter for Energy Storage System Interfacing in Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(1):301-308.
- Matsuo H., Wenzhong L., Kurokawa, F., Shigemizu T., Watanabe N., (2004), "Characteristics of the multiple-input DC-DC converter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(3):625-631.
- 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.
- Nakayama Y., Hojo E., Koike T., (2003), "Development of VRLA battery for hybrid bus", *J. Power Sources*, 124(2):551-558.
- Ouyang M., Xu L., Li J., Lu L., Gao D. ve Xie Q., (2006), "Performance comparison of two fuel cell hybrid buses with different powertrain and energy management strategies", *J Power Sources*, 163: 467-479.
- Ozpineci B., Tolbert L.M., Zhong D., (2004), "Multiple input converters for fuel cells", *IEEE Industry Applications Conference 39th IAS Annual Meeting*, 3-7 Oct. 2004, 2:791-797.
- Park, S. K. ve Choe, S. Y., (2008), "Dynamic modeling and analysis of a 20-cell PEM fuel cell stack considering temperature and two-phase effects", *Journal of Power Sources*, 179(2):660-672.
- Pasquier, A. D., Plitz, I., Menocal, S. ve Amatucci, G., (2003), "A comparative study of Li-ion battery, supercapacitor and nonaqueous asymmetric hybrid devices for automotive applications", *Journal of Power Sources*; 115(1):171-178.
- Pathapati P. R., Xue X., Tang J., (2005), "A new dynamic model for predicting transient phenomena in a PEM fuel cell system", *Renewable Energy*, 30(1):1-22.

- Peng F.Z., Hui L., Gui-Jia S., 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.
- Rodatz P., Paganelli G., Sciarretta A., Guzzella L., (2005)," Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle", *Control Engineering Practice*, 13 (41-53).
- Schell A., Peng H., Tran D., Stamos E., Lin C. C., Kim M. J., (2005), "Modelling and control strategy development for fuel cell electric vehicles", *Annual Reviews in Control*, 29 (159-168).
- Senol R., Ucgul I., Acar M., (2006), "Yakıt pili teknolojisindeki gelişmeler ve taşıtlara uygulanabilirliğinin incelenmesi", *Mühendis ve Makine*, 47 (563).
- Solero L., Lidozzi A., Pomilio J.A., (2005), "Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(5):1007-1016.
- Tao H., Duarte J. L., 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.
- Tao H., Kotsopoulos A., Duarte J.L., 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.
- Tolbert, L.M., Peterson, W.A., White, C.P., Theiss, T.J., 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.
- Uzunoglu, M., Alam, M.S., (2008), "Modeling and Analysis of an FC/UC Hybrid Vehicular Power System Using a Novel Wavelet Based Load Sharing Algorithm, *IEEE Trans. Energy Conversion*, 23(1):263-272.
- Ünlü, N., Karahan, Ş., Tür, O., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A., Turhan, L., Akgün, F. ve Tırıs M., (2003), *Elektrikli Araçlar, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, Gebze, Kocaeli.*
- Vural, B, Erdinc O., Uzunoglu M., (2010) "Paralel combination of FC and UC for vehicular power systems using a multi-input converter-based power interface", *J. Energy Conversion and Management*, 51(12):2613-2622.
- Vural, B., Dusmez S., Uzunoglu, M., (2010) "A Improved Power Conditioning Unit for Energy Storage Systems in Hybrid Electrical Vehicles" *5th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-5)*, 27-30 June 2010, Denizli, Turkey,
- 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)*, 9-11 June 2009, Capri - Italy.
- Waffler S., 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.
- Wang, L. X., (1997), *A course in fuzzy systems and control*", Prentice-Hall International, USA.
- Westbrook, M., H., (2005), *The Electric Car*, The Institution of Electrical Engineers, London, England

Xue, X., Tang, J., Smirnova, A., England, R. ve Sammes, N., (2004), "System level lumped-parameter dynamic modeling of PEM fuel cell", *Journal of Power Sources*, 133(2):188-204.

Yalamanchili K.P., Ferdowsi M., 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.

Yaow-Ming C., Yuan-Chuan L., Feng-Yu W., (2002), "Multi-input DC/DC converter based on the multi-winding transformer for renewable energy applications", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(4):1096-1104.

Zhang X., Mi C. C., Masrur A., Daniszewski D., (2008), "Wavelet-transform-based power management of hybrid vehicles with multiple on-board energy sources including fuel cell, battery and ultracapacitor", *Journal of Power Sources*, 185(2):1533-1543.

Zhang, Z., Huang, X., Jiang, J. ve Wu, B., (2006), "An improved dynamic model considering effects of temperature and equivalent internal resistance for PEM fuel cell power models", *Journal of Power Sources*, 161(2):1062-1068.

EKLER

- Ek 1 Ayrık zamanlı bulanık mantık kontrolör kodları
- Ek 2 Deneysel çalışmalarda kullanılan güç dönüştürücülerin mikroişlemci kodları
- Ek 3 Tez çalışması ile ilgili yayınların listesi

Ek 1 Ayrık zamanlı bulanık mantık kontrolör kodları

```

function P_FC_Ref=fuzzy(SOC,P_TOP)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%SOC icin uyelik fonksiyonlari; M_SOC_D; M_SOC_O; M_SOC_Y
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
SOCd=0.8;
SOCo=0.85;
SOCy=0.9;
%%SOC DUSUK icin uyelik fonksiyonu
if SOC<SOCo
    M_SOC_D=1-SOC/SOCo;
else M_SOC_D=0;
end
%%SOC ORTA icin uyelik fonksiyonu
if SOC>SOCd
    if SOC<=SOCo
        M_SOC_O=(SOC-SOCd)/(SOCo-SOCd);
    elseif SOC<SOCy
        M_SOC_O=(SOCy-SOC)/(SOCy-SOCo);
    else M_SOC_O=0;
    end
else M_SOC_O=0;
end
%%SOC YUKSEK icin uyelik fonksiyonu
if SOC>SOCo
    M_SOC_Y=(SOC-SOCo)/(1-SOCo);
else M_SOC_Y=0;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%P_TOP icin uyelik fonksiyonlari; M_Ptop_D;M_Ptop_O;M_Ptop_Y
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
P_TOPd=0.4;
P_TOPo=0.5;
P_TOPy=0.6;
if P_TOP>=0
    %%P_TOP DUSUK icin uyelik fonksiyonu
    if P_TOP<P_TOPo
        M_Ptop_D=1-P_TOP/P_TOPo;
    else M_Ptop_D=0;
    end
    %%P_TOP ORTA icin uyelik fonksiyonu
    if P_TOP>P_TOPd
        if P_TOP<=P_TOPo
            M_Ptop_O=(P_TOP-P_TOPd)/(P_TOPo-P_TOPd);
        elseif P_TOP<P_TOPy
            M_Ptop_O=(P_TOPy-P_TOP)/(P_TOPy-P_TOPo);
        else M_Ptop_O=0;
        end
    else M_Ptop_O=0;
    end
end

```

```

%%P_TOP YUKSEK icin uyelik fonksiyonu
if P_TOP>P_TOPO
    M_Ptop_Y=(P_TOP-P_TOPO)/(1-P_TOPO);
else M_Ptop_Y=0;
end
else
    M_Ptop_D=1;
    M_Ptop_O=0;
    M_Ptop_Y=0;
End
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%KURALLAR; CD= Cok Dusuk, D=Dusuk, O=Orta, Y=YukseK
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%SOC / P_TOP | D   O   Y
%-----|-----
%   D         | O   Y   Y
%   O         | D   O   Y
%   Y         | CD  D   O
%Kural matrisi
Rules=(0:2;0:2;0:2);
Rules(1,1)=min(M_SOC_D,M_Ptop_D);
Rules(1,2)=min(M_SOC_D,M_Ptop_O);
Rules(1,3)=min(M_SOC_D,M_Ptop_Y);
Rules(2,1)=min(M_SOC_O,M_Ptop_D);
Rules(2,2)=min(M_SOC_O,M_Ptop_O);
Rules(2,3)=min(M_SOC_O,M_Ptop_Y);
Rules(3,1)=min(M_SOC_Y,M_Ptop_D);
Rules(3,2)=min(M_SOC_Y,M_Ptop_O);
Rules(3,3)=min(M_SOC_Y,M_Ptop_Y);
%Kural matrisinde CD olanlarin maksimumu
M_CD=Rules(3,1);
Alfa_CD=max(M_CD);
%Kural matrisinde D olanlarin maksimumu
M_D=(Rules(2,1),Rules(3,2));
Alfa_D=max(M_D);
%Kural matrisinde O olanlarin maksimumu
M_O=(Rules(1,1),Rules(2,2),Rules(3,3));
Alfa_O=max(M_O);
%Kural matrisinde Y olanlarin maksimumu
M_Y=(Rules(1,2),Rules(1,3),Rules(2,3));
Alfa_Y=max(M_Y);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%P_FC icin uyelik fonksiyonlari; M_Pfc_D; M_Pfc_O; M_Pfc_Y
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
P_FCcd=0.05; %Cok Dusuk
P_FCd=0.2; %Dusuk
P_FCo=0.5; %Orta
P_FCy=0.7; %YukseK
P_FC=0:0.01:1; %Normalize edilmiş P_FC deger araligi
k=length(P_FC);
M_Pfc_CD=1:k;

```

```

M_Pfc_D=1:k;
M_Pfc_O=1:k;
M_Pfc_Y=1:k;
for i=1:k
    %%P_FC COK DUSUK icin uyelik fonksiyonu
    if P_FC(i)<P_FCcd
        M_Pfc_CD(i)=1-P_FC(i)/P_FCo;
    else M_Pfc_CD(i)=0;
    end
    %%P_FC DUSUK icin uyelik fonksiyonu
    if P_FC(i)>P_FCcd
        if P_FC(i)<=P_FCd
            M_Pfc_D(i)=(P_FC(i)-P_FCcd)/(P_FCd-P_FCcd);
        elseif P_FC(i)<P_FCo
            M_Pfc_D(i)=(P_FCo-P_FC(i))/(P_FCo-P_FCd);
        else M_Pfc_D(i)=0;
        end
    else M_Pfc_D(i)=0;
    end
    %%P_FC ORTA icin uyelik fonksiyonu
    if P_FC(i)>P_FCd
        if P_FC(i)<=P_FCo
            M_Pfc_O(i)=(P_FC(i)-P_FCd)/(P_FCo-P_FCd);
        elseif P_FC(i)<P_FCy
            M_Pfc_O(i)=(P_FCy-P_FC(i))/(P_FCy-P_FCo);
        else M_Pfc_O(i)=0;
        end
    else M_Pfc_O(i)=0;
    end
    %%P_FC YUKSEK icin uyelik fonksiyonu
    if P_FC(i)>P_FCo
        M_Pfc_Y(i)=(P_FC(i)-P_FCo)/(1-P_FCo);
    else M_Pfc_Y(i)=0;
    end
end
for i=1:k
    M_Pfc_CD(i)=min(Alfa_CD,M_Pfc_CD(i));
    M_Pfc_D(i)=min(Alfa_D,M_Pfc_D(i));
    M_Pfc_O(i)=min(Alfa_O,M_Pfc_O(i));
    M_Pfc_Y(i)=min(Alfa_Y,M_Pfc_Y(i));
end
M_Pfc=1:k;
for i=1:k
    M_Pfc(i)=max(M_Pfc_CD(i),M_Pfc_D(i));
    M_Pfc(i)=max(M_Pfc(i),M_Pfc_O(i));
    M_Pfc(i)=max(M_Pfc(i),M_Pfc_Y(i));
end
M_FC=P_FC.*M_Pfc;
Top_M_FC=sum(M_FC);
Top_M_Pfc=sum(M_Pfc);
P_FC_Ref=Top_M_FC/Top_M_Pfc*1000;

```

Ek 2 Deneysel çalışmalarda kullanılan güç dönüştürücülerin mikroişlemci kodları

```

/////////////////////////////////////////////////////////////////
///////////////////////////////////////////////////////////////// YÜKSELTİCİ TIP DÖNÜŞTÜRÜCÜ ///////////////////////////////////////////////////////////////////
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void modeSelection(void)
{
if((mode==FC_to_Motor_BUCK)&&(rOut==TAM_PWM)&&(REF_CUR>(I_OUT+0.5)))
    mode=FC_to_Motor_BOOST;
else if((mode==FC_to_Motor_BOOST)&&(rOut==0)&&(REF_CUR<(I_OUT-0.5))){
    START_UP=0;
mode=FC_to_Motor_BUCK;
}
if(modeOld!=mode)
    modeRefresh=1;
modeOld=mode;
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
///////////////////////////////////////////////////////////////// MODES ///////////////////////////////////////////////////////////////////
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void Forward_boost(void)
{
rOut=0;
rIn=0;
sPID.SumError = 0;
sPID.PrevError = 0;
sPID.LastError = 0;
pwm_set_values(BUCK_SWITCH, INACTIVE);
delay_uS(MODE_ARASI);
pwm_controller(BUCK_SWITCH, PWM_GENERATOR_CONTROL);
delay_uS(MODE_ARASI);
pwm_controller(BOOST_SWITCH, PWM_GENERATOR_CONTROL); //2.PDC kullanılacak
delay_uS(MODE_ARASI);
set_pwm_duty_val(PWM_DUTY_1, TAM_PWM);
pwm_set_values(BUCK_SWITCH, ACTIVE);
pwm_set_values(BOOST_SWITCH, ACTIVE);
}
void Forward_buck(void)
{
if(START_UP){
    rOut=0;
    sPID.SumError = 0;
}
else
{
    rOut=TAM_PWM;
    sPID.SumError = TAM_PWM;
}
rIn=0;
sPID.PrevError = 0;
sPID.LastError = 0;
pwm_set_values(BOOST_SWITCH, INACTIVE);
delay_uS(MODE_ARASI);
pwm_controller(BOOST_SWITCH, PWM_BEFORE_SPEC_CONTROL); //1.PDC kullanılacak
delay_uS(MODE_ARASI);
pwm_controller(BUCK_SWITCH, PWM_GENERATOR_CONTROL);
delay_uS(MODE_ARASI);
pwm_set_values(BUCK_SWITCH, ACTIVE);
}

```



```

/////////////////////////////////////////////////////////////////
/////////////////////////////////////////////////////////////////PID MODES/////////////////////////////////////////////////////////////////
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void Forward_boost_PID(void)
{
sPID.SetPoint = REF_CUR;
rIn = I_OUT;
rOut = PIDCalc ( &sPID,rIn );
if(rOut>YARI_PWM)
    rOut=YARI_PWM;
else if(rOut<0)
rOut=0;
set_pwm_duty_val(PWM_DUTY_3,(unsigned int)rOut);
}
void Forward_buck_PID(void)
{
sPID.SetPoint = REF_CUR;
rIn = I_OUT;
rOut = PIDCalc ( &sPID,rIn );
if(rOut>TAM_PWM)
    rOut=TAM_PWM;
else if(rOut<0)
    rOut=0;
set_pwm_duty_val(PWM_DUTY_1,(unsigned int)rOut);
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
/////////////////////////////////////////////////////////////////MODE REFRESH/////////////////////////////////////////////////////////////////
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void mode_refresh(void)
{
if(modeRefresh)
    {
    switch(mode)
    {
    case(FC_to_Motor_BOOST):Forward_boost();break;
    case(FC_to_Motor_BUCK) :Forward_buck();break;
    }
    modeRefresh=0;
    }
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
/////////////////////////////////////////////////////////////////PID SELECTION/////////////////////////////////////////////////////////////////
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void pidSelection(void)
{
switch(mode)
    {
    case(FC_to_Motor_BOOST) :Forward_boost_PID();break;
    case(FC_to_Motor_BUCK)  :Forward_buck_PID();break;
    }
}

/////////////////////////////////////////////////////////////////
/////////////////////////////////////////////////////////////////ÇİFT YÖNLÜ DÖNÜŞTÜRÜCÜ/////////////////////////////////////////////////////////////////
/////////////////////////////////////////////////////////////////
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;
}
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////MODES////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
void mod1(void)//hazır
{
    rOut=0;
    rIn=0;
    sPID.SumError = 0;
    sPID.PrevError = 0;
    sPID.LastError = 0;
    pwm_set_values(PWM1_H, INACTIVE);
    pwm_set_values(PWM2_L, INACTIVE);
    pwm_set_values(PWM2_H, INACTIVE);
    pwm_set_values(PWM1_L, INACTIVE);
    delay_uS(MODE_ARASI);
    pwm_controller(PWM1_H, PWM_BEFORE_SPEC_CONTROL);
    pwm_controller(PWM2_L, PWM_BEFORE_SPEC_CONTROL);
}

```

```

    pwm_controller(PWM1_L,PWM_BEFORE_SPEC_CONTROL);
    pwm_controller(PWM2_H,PWM_BEFORE_SPEC_CONTROL);
    delay_uS(MODE_ARASI);
}
void mod2(void)//hazır
{
    rOut=0;
    rIn=0;
    sPID.SumError = 0;
    sPID.PrevError = 0;
    sPID.LastError = 0;
    pwm_set_values(PWM1_H,INACTIVE);
    pwm_set_values(PWM2_L,INACTIVE);
    pwm_set_values(PWM1_H,INACTIVE);
    pwm_set_values(PWM2_L,ACTIVE);
    delay_uS(MODE_ARASI);
    pwm_controller(PWM1_H,PWM_BEFORE_SPEC_CONTROL);
    pwm_controller(PWM2_H,PWM_BEFORE_SPEC_CONTROL);
    pwm_controller(PWM2_L,PWM_BEFORE_SPEC_CONTROL);
    delay_uS(MODE_ARASI);
    pwm_controller(PWM1_L,PWM_GENERATOR_CONTROL); //1.PDC kullanılacak
}
void mod3(void)
{
    if(SIFIRDAN_BASLA){
        rOut=0;
        rIn=0;
        sPID.SumError = 0;
        sPID.PrevError = 0;
        sPID.LastError = 0;
    }
    else{
        rOut=TAM_PWM;
        rIn=0;
        sPID.SumError = TAM_PWM;
        sPID.PrevError = 0;
        sPID.LastError = 0;
    }
    pwm_set_values(PWM1_H,INACTIVE);
    pwm_set_values(PWM1_L,INACTIVE);
    pwm_set_values(PWM2_L,INACTIVE);
    pwm_set_values(PWM2_H,INACTIVE);
    delay_uS(MODE_ARASI);
    pwm_controller(PWM1_L,PWM_BEFORE_SPEC_CONTROL); //1.PDC kullanılacak
    pwm_controller(PWM2_H,PWM_BEFORE_SPEC_CONTROL);
    pwm_controller(PWM2_L,PWM_BEFORE_SPEC_CONTROL);
    delay_uS(MODE_ARASI);
    pwm_controller(PWM1_H,PWM_GENERATOR_CONTROL);
}
void mod4(void)//hazır
{
    rOut=0;
    rIn=0;
    sPID.SumError = 0;
    sPID.PrevError = 0;
    sPID.LastError = 0;
    pwm_set_values(PWM1_H,ACTIVE);
    pwm_set_values(PWM2_L,INACTIVE);
    pwm_set_values(PWM2_H,INACTIVE);
    pwm_set_values(PWM1_L,INACTIVE);
    delay_uS(MODE_ARASI);
}

```

```

    pwm_controller(PWM1_H,PWM_BEFORE_SPEC_CONTROL); //2.PDC kullanılacak
    pwm_controller(PWM2_L,PWM_BEFORE_SPEC_CONTROL);
    pwm_controller(PWM1_L,PWM_BEFORE_SPEC_CONTROL);
    delay_uS(MODE_ARASI);
    pwm_controller(PWM2_H,PWM_GENERATOR_CONTROL);
}
void mod5(void)//hazır
{
    if(SIFIRDAN_BASLA){
        rOut=0;
        rIn=0;
        sPID.SumError = 0;
        sPID.PrevError = 0;
        sPID.LastError = 0;
    }
    else{
        rOut=TAM_PWM;
        rIn=0;
        sPID.SumError = TAM_PWM;
        sPID.PrevError = 0;
        sPID.LastError = 0;
    }
    pwm_set_values(PWM1_H,INACTIVE);
    pwm_set_values(PWM1_L,INACTIVE);
    pwm_set_values(PWM2_H,INACTIVE);
    pwm_set_values(PWM2_L,INACTIVE);
    delay_uS(MODE_ARASI);
    pwm_controller(PWM1_L,PWM_BEFORE_SPEC_CONTROL); //2.PDC kullanılacak
    pwm_controller(PWM2_H,PWM_BEFORE_SPEC_CONTROL);
    pwm_controller(PWM1_H,PWM_BEFORE_SPEC_CONTROL);
    delay_uS(MODE_ARASI);
    pwm_controller(PWM2_L,PWM_GENERATOR_CONTROL);
}
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////MODE REFRESH////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
void mode_refresh(void)
{
    if(modeRefresh)
    {
        switch(mode)
        {
            case(Shut_Mode)
            case(BAT_to_DC_LINK_BOOST) :mod2();break;
            case(DC_LINK_to_BAT_BUCK) :mod3();break;
            case(DC_LINK_to_BAT_BOOST) :mod4();break;
            case(BAT_to_DC_LINK_BUCK) :mod5();break;
        }
        modeRefresh=0;
    }
}
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////PID MODES////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
void mod1PID(void)
{
    set_pwm_duty_val(PWM_DUTY_2,0);
    set_pwm_duty_val(PWM_DUTY_1,0);
}
void mod2PID(void)
{

```

```

    sPID.SetPoint = refVol;
    rIn = V_out;
    rOut = PIDCalc ( &sPID,rIn );
    if(rOut>YARI_PWM)
    rOut=YARI_PWM;
    else if(rOut<0)
    rOut=0;
    set_pwm_duty_val(PWM_DUTY_1,(unsigned int)rOut);
}
void mod3PID(void)
{
    sPID.SetPoint = V_out;
    rIn = refVol;
    rOut = PIDCalc ( &sPID,rIn );
    if(rOut>TAM_PWM)
    rOut=TAM_PWM;
    else if(rOut<0)
    rOut=0;
    set_pwm_duty_val(PWM_DUTY_1,(unsigned int)rOut);
}
void mod4PID(void)
{
    sPID.SetPoint=V_out;
    rIn = refVol;
    rOut = PIDCalc ( &sPID,rIn );
    if(rOut>YARI_PWM)
    rOut=YARI_PWM;
    else if(rOut<0)
    rOut=0;
    set_pwm_duty_val(PWM_DUTY_2,(unsigned int)rOut);
}
void mod5PID(void)
{
    sPID.SetPoint = refVol;
    rIn = V_out;
    rOut = PIDCalc ( &sPID,rIn );
    if(rOut>TAM_PWM)
    rOut=TAM_PWM;
    else if(rOut<0)
    rOut=0;
    set_pwm_duty_val(PWM_DUTY_2,(unsigned int)rOut);
}
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////PID SELECTION////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
void pidSelection(void)
{
    switch(mode)
    {
    case(Shut_Mode)
    case(BAT_to_DC_LINK_BOOST) :mod2PID();break;
    case(DC_LINK_to_BAT_BUCK) :mod3PID();break;
    case(DC_LINK_to_BAT_BOOST) :mod4PID();break;
    case(BAT_to_DC_LINK_BUCK) :mod5PID();break;
    }
}

```

Ek 3 Tez çalışması ile ilgili yayınların listesi

Uluslar arası hakemli dergiler basılmış yayınlar:

1. **Vural B.**, Boynuegri A. R., Nakir I., Erdinc O., Balıkci A., Uzunoglu M., Gorgun H., Dusmez S., Fuel-cell and ultra-capacitor hybridization: A prototype test bench based analysis of different energy management strategies for vehicular applicaions, *Int. Journal of Hydrogen Energy*, doi:10.1016/j.ijhydene.2010.07.063.
2. **Vural B.**, Erdinc O., Uzunoglu M., Paralel combination of FC and UC for vehicular power systems using a multi-input converter-based power interface, *J. Energy Conversion and Management*, Volume 51, Issue 12, 2010, Pages 2613-2622.
3. Erdinc, O., **Vural, B.**, Uzunoglu, M., A Wavelet-Fuzzy Logic Based Energy Management Strategy for a Fuel Cell/Battery/Ultra-capacitor Hybrid Vehicular Power System, *Journal of Power Sources*, Volume 194, Issue 1, 20 October 2009, Pages 369-380.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler :

1. **Vural, B.**, Dusmez S., Uzunoglu, M., "An Improved Power Conditioning Unit for Energy Storage Systems in Hybrid Electrical Vehicles" *5th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-5)*, 269, Denizli, Turkey, June 27-30, 2010.
2. Erdinc, O., **Vural, B.**, Uzunoglu, M., "A dynamic lithium-ion battery model considering the effects of temperature and capacity fading," *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, 383-386, Capri, Italy, June 9-11, 2009.
3. **Vural, B.**, Uzunoglu, M., Erdinc, O., Onar, O. C., "A Dynamic Ultra-Capacitor Model for Vehicular Applications," *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, 595-598, Capri, Italy, June 9-11, 2009.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

- Vural, B.**, Uzunoglu, M., Nakir, İ., "Yakıt Hücreli Elektrikli Taşıt Sistemleri için Enerji Depolama Ünitesi olarak Ultrakapasitörlerin Kullanılması", *II. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi*, Eskişehir, Haziran 2008.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 01.07.1978

Doğum yeri Elazığ

Lise 1990-1991 Elazığ Anadolu Lisesi
1992-1996 Tarsus A. Kerim Bengi Anadolu Lisesi

Lisans 1997-2000 Dokuz Eylül Üniv. Müh. Fak. Elk-Elektronik Müh. Böl.
2000-2004 Yıldız Teknik Üniv. Elk-Eltr Fak. Elektrik Müh. Böl.

Yüksek Lisans 2004-2007 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Müh. Anabilim Dalı, Elektrik Tes. Programı

Çalıştığı kurumlar

2005-Devam ediyor YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi