

**TEKERLEK İÇİ ELEKTRİK MAKİNESİNİN FARKLI
SÜRÜŞ ÇEVİRİMLERİ İÇİN BULANIK MANTIK
DENETLEYİCİ İLE SÜRÜLMESİ VE REJENERATİF
FRENLENMESİ**

**2018
DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

Tuncay SOYLU

**TEKERLEK İÇİ ELEKTRİK MAKİNESİNİN FARKLI SÜRÜŞ
ÇEVİRİMLERİ İÇİN BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ İLE SÜRÜLMESİ
VE REJENERATİF FRENLENMESİ**

Tuncay SOYLU

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında

Doktora Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Ocak 2018

Tuncay SOYLU tarafından hazırlanan “TEKERLEK İÇİ ELEKTRİK MAKİNESİNİN FARKLI SÜRÜŞ ÇEVİRİMLERİ İÇİN BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ İLE SÜRÜLMESİ VE REJENERATİF FRENLENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylım.

Prof. Dr. Raif BAYIR

Tez Danışmanı, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 19/01/2018

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Mehmet Rahmi CANAL (GÜ)

Üye : Prof. Dr. Raif BAYIR (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Selim ÖNCÜ (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ali UYSAL (CBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fecir DURAN (GÜ)

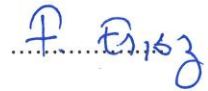


...../...../2018

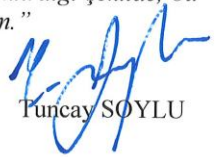
KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”


Tuncay SOYLU

ÖZET

Doktora Tezi

TEKERLEK İÇİ ELEKTRİK MAKİNESİNİN FARKLI SÜRÜŞ ÇEVİRİMLERİ İÇİN BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ İLE SÜRÜLMESİ VE REJENERATİF FRENLENMESİ

Tuncay SOYLU

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Raif BAYIR

Ocak 2018, 121 sayfa

Elektrikli araç bataryaları uzun şarj olma süresi ve düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Bu sebeplerden dolayı elektrikli araçlar hızlı şarj olamaz ve bir şarj ile uzun mesafe kat edemez. Elektrikli araç menzilin arttırılabilmesi için mevcut enerjinin etkin kullanılması gerekmektedir. Enerji kullanımı düşürülmeli ve kinetik enerji rejeneratif frenleme kullanılarak bataryalara depolanmalıdır. Bu tez çalışmasında elektrikli araçlarda kullanılan TİEM'in (tekerlek içi elektrik makinesi) farklı sürüş çevrimleri için BM (bulanık mantık) denetleyici ile normal sürme, rejeneratif frenleme benzetimi ve deneysel çalışması yapılmaktadır. MATLAB/Simulink'te TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme yapabilecek benzetim modeli hazırlanmıştır. Benzetim modeli ile iki farklı kontrol yönteminin performansları karşılaştırılmaktadır. Deneysel çalışmalar için bir TİEM ile bir DAEM (Doğru akım elektrik makinesi) birbirine kuplajlanmıştır. TİEM normal sürme olarak çalışırken

DAEM jeneratör olarak çalışmaktadır. DAEM'in ürettiği enerji bir frenleme direnci üzerinden harcanarak TIEM'e yük oluşturmaktadır. TIEM rejeneratif frenleme ile bataryaları şarj ederken, DAEM motor olarak çalışmaktadır. TIEM deneylerinin yapılabilmesi için MATLAB/Simulink ile gömülü sistem çalışabilen TIEM sürücü geliştirilmiştir. Standart sürüş çevrim hız referansları olan UDC (kentsel sürüş çevrimi) ve ölçeklendirilmiş NEDC (yeni Avrupa sürüş çevrimi) kullanılarak BM denetleyici ile farklı yükler altında TIEM normal sürme ve rejeneratif frenleme deneyleri yapılmaktadır. Sürüş çevrim hız referansları ile BM denetleyicisi kullanılarak TIEM normal sürme ve rejeneratif frenlemenin elektrikli araçlarda uygulanabilir olduğu gösterilmektedir. Rejeneratif frenleme ile referans hız takibinin yapılması bu çalışmanın özgünlüğüdür.

Anahtar Sözcükler : Tekerlek içi elektrik makinesi, tekerlek içi elektrik motoru, fırçasız doğru akım motoru, bulanık mantık denetleyicisi, rejeneratif frenleme

Bilim Kodu : 905.1.033

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

IN-WHEEL ELECTRIC MACHINE DRIVING AND REGENERATIVE BRAKING WITH FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR DIFFERENT DRIVING CYCLES

Tuncay SOYLU

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronics Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Raif BAYIR

January 2018, 121 pages

Electric vehicle batteries have a long charge time and low energy density. Because of these reasons, electric vehicles cannot be charged immediately and cannot go long distance with a charge. In order to increase the electric vehicle range, it is necessary to use the existing energy efficiently. Energy usage should be reduced and kinetic energy stored in the battery using regenerative braking. In this thesis, in-wheel electric machine driving, regenerative braking simulation and experimental studies are carried out with fuzzy logic controller for different driving cycles of in-wheel electric machine used in electric vehicles. A simulated model is prepared in MATLAB/Simulink that can perform in-wheel electric machine driving and regenerative braking. The performances of two different control methods are compared with the simulation model. An in-wheel electric machine and a direct current electric machine are coupled to each other for experimental studies. While

the in-wheel electric machine is driven, the direct current electric machine works as a generator. The energy produced by the direct current electric machine is consumed over a braking resistor, creating load on the in-wheel electric machine. When charging the batteries by means of regenerative braking, the direct current electric machine works as motor. In order to perform the in-wheel electric machine experiments, the in-wheel electric machine driver has been developed to work with MATLAB/Simulink embedded systems. Using the standard driving cycle speed references UDC (urban driving cycle) and the scaled NEDC (new European driving cycle), the fuzzy logic controller is performing the in-wheel machine driving and regenerative braking tests under different loads. It is shown that the fuzzy logic controller can be used in electric vehicles with driving and regenerative braking with the driving cycle speed references. Performing reference speed follow-up with regenerative braking is the originality of this study.

Key Word : In-wheel electric machine, in-wheel electric motor, brushless direct current motor, fuzzy logic controller, regenerative braking

Science Code : 905.1.033

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araŐtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıŐmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Raif BAYIR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma sürecinde bilgi ve tavsiyelerinden dolayı sayın hocalarım Doç. Dr. Selim ÖNCÜ ve Dr. Öğr. Üyesi Ali UYSAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma sürecinde desteklerinden dolayı Yusuf KARABACAK, Süleyman ÇEVEN ve Özcan ERÇİN'e teşekkür ederim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgmeden yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Her konuda sabırla yardımcı olan sevgili eşim Emel SOYLU'ya ve canım kızım Zeynep SOYLU'ya tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu tez Karabük Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), KBU-BAP-13/2-DR-007 numaralı proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Karabük Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
LİTERATÜR TARAMASI.....	4
BÖLÜM 3	12
TEKERLEK İÇİ ELEKTRİK MOTORU	12
3.1. DOĞRU AKIM MOTORLARI.....	12
3.1.1. Sabit Mıknatıslı Fırçalı Doğru Akım Motoru.....	13
3.1.2. Fırçasız Doğru Akım Motoru	14
3.2. TEKERLEK İÇİ ELEKTRİK MAKİNESİ.....	15
3.3. TİEM NORMAL SÜRÜLMESİ.....	17
3.4. TİEM İLE REJENERATİF FRENLEME.....	20
3.5. TİEM MATEMATİKSEL MODELİ VE BENZETİMİ.....	23
3.5.1. TİEM Matematiksel Denklemleri.....	23
3.5.2. TİEM Uzay Durum Denklemlerinin Çıkarılması.....	27
3.5.3. MATLAB/Simulink ile TİEM Modellemesi	28
BÖLÜM 4	34

	<u>Sayfa</u>
DENETİM YÖNTEMLERİ.....	34
4.1. PID DENETLEYİCİ.....	34
4.2. BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ	36
BÖLÜM 5	42
TEST DÜZENEGİ TASARIMI.....	42
5.1. KULLANILAN MATERYALLER.....	45
5.1.1. Tekerlek İçi Elektrik Makinesi	45
5.1.2. TİEM Sürücü	47
5.1.3. Batarya.....	50
5.1.4. Doğru Akım Elektrik Makinesi	51
5.1.5. DAEM Kontrol Kartı ve DAEM sürücü.....	52
5.1.6. Frenleme Direnci	54
5.1.7. Tako Jeneratör	55
5.1.8. Özel Yapım Malzemeler.....	56
5.1.9. Veri Alış Veriş Kartı.....	56
5.1.10. Akım ve Gerilim Algılayıcıları.....	57
5.1.11. İndüktif Algılayıcı ve Frekans Gerilim Çevirici.....	59
5.1.12. Yük Hücresi ve Yük Hücresi Gerilim Çevirici.....	60
5.2. SÜRÜŞ ÇEVİRİM HIZ REFERANSLARI.....	62
5.2.1. Ön Test Sürüş Çevrim Hız Referansları	62
5.2.1.1. Yamuk Fonksiyonu Hız Referansı.....	62
5.2.1.2. Rampa Fonksiyonu Hız Referansı	63
5.2.1.3. Merdiven Fonksiyonu Hız Referansı	64
5.2.2. Standart Sürüş Çevrim Hız Referansları.....	65
5.2.2.1. UDC Hız Referansı	66
5.2.2.2. NEDC Hız Referansı.....	67
BÖLÜM 6	70
BENZETİM VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	70
6.1. BENZETİM ÇALIŞMALARI.....	71
6.1.1. MATLAB/Simulink Benzetim Modeli.....	71
6.1.2. Ön Test Sürüş Çevrim Hız Referansları ile Benzetim Çalışmaları	73

	<u>Sayfa</u>
6.1.3. Benzetim Çalışmasında PID ve BM Denetleyici Karşılaştırması	80
6.2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	82
6.2.1. Gömülü Sistem Modelleri.....	83
6.2.2. Ön Test Sürüş Çevrim Hız Referansları ile Deneysel Çalışmalar	85
6.2.3. Deneysel Çalışmalarda PID ve BM Denetleyici Karşılaştırması	96
6.2.4. Standart Sürüş Çevrim Hız Referansları ile Deneysel Çalışmalar	99
6.2.5. Standart Sürüş Çevrim Hız Referansları ile Deneysel Çalışma Sonuçları.....	107
BÖLÜM 7	109
SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	109
KAYNAKLAR	112
ÖZGEÇMİŞ	121

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1. SMFDAM iç yapısı.	13
Şekil 3.2. FDAM iç yapısı.....	14
Şekil 3.3. TİEM iç yapısı.....	15
Şekil 3.4. TİEM rotor ve statoru.....	16
Şekil 3.5. TİEM elektriksel bağlantısı.....	17
Şekil 3.6. Alan etkili algılayıcı, ZEMK ve akım grafikleri.	18
Şekil 3.7. Etkin değeri % 25 olan örnek DGM sinyali.....	19
Şekil 3.8. TİEM normal sürülürken DGM'nin 1 olması durumunda akım yolu.	19
Şekil 3.9. TİEM normal sürülürken DGM'nin 0 olması durumunda akım yolu.	20
Şekil 3.10. TİEM rejeneratif frenlenirken DGM'nin 1 olması durumunda akım yolu.....	21
Şekil 3.11. TİEM rejeneratif frenlenirken DGM'nin 0 olması durumunda akım yolu.....	21
Şekil 3.12. Rejeneratif frenleme algoritması.	22
Şekil 3.13. DA motorunun elektriksel karşılığı.....	24
Şekil 3.14. TİEM elektriksel karşılığı.	24
Şekil 3.15. Uzay durum denklemleri blok diyagramı.....	27
Şekil 3.16. TİEM blok diyagramı.....	29
Şekil 3.17. TİEM matematiksel modeli.....	29
Şekil 3.18. TİEM uzay durum denklemleri bloğu.	30
Şekil 3.19. MATLAB/Simulink kullanılarak gerçekleştirilen model.	31
Şekil 3.20. TİEM matematiksel model ve TİEM MATLAB/Simulink hazır model adım fonksiyonu cevap grafikleri.....	32
Şekil 3.21. TİEM matematiksel model ve TİEM MATLAB/Simulink hazır model rampa fonksiyonu cevap grafikleri.....	33
Şekil 4.1. PID denetleyici blok şeması.....	35
Şekil 4.2. TİEM kontrolü için BM denetleyici blok şeması.....	37
Şekil 4.3. BM denetleyici çalışma şeması.	37
Şekil 4.4. BM girişler ve çıkış için örnek üyelik fonksiyonları.....	38
Şekil 4.5. TİEM kontrol için örnek BM örnek kural tabanı çıkarılması.	39
Şekil 4.6. Max-min yöntemi ile bulanık çıkarım.....	40

Şekil 5.1. Test düzeneği blok diyagramı.	43
Şekil 5.2. Bilgisayar ortamında hazırlanan test düzeneği tasarımı.....	44
Şekil 5.3. Test düzeneği görünümü.	44
Şekil 5.4. Kelly Controller TİEM.....	46
Şekil 5.5. TİEM hız, giriş gücü, mekanik çıkış gücü grafiği.....	47
Şekil 5.6. TİEM sürücü.	48
Şekil 5.7. TİEM sürücü ile TİEM bağlantı şeması.....	49
Şekil 5.8. TİEM normal sürme, TİEM rejeneratif frenleme, DAEM jeneratör ve DAEM motor için kullanılan BM denetleyici girişler ve çıkış üyelik fonksiyonu.....	49
Şekil 5.9. Test düzeneğinde kullanılan batarya.....	50
Şekil 5.10. Kurşun asit batarya deşarj grafiği.....	51
Şekil 5.11. Test düzeneğinde kullanılan DAEM.....	51
Şekil 5.12. DAEM performans grafiği.	52
Şekil 5.13. DAEM kontrol kartı.	53
Şekil 5.14. DAEM, DAEM kontrol kartı ve DAEM sürücü bağlantı şeması.	53
Şekil 5.15. DAEM sürücü.	54
Şekil 5.16. Frenleme direnci.....	55
Şekil 5.17. KAG Hannover tako jeneratör.	55
Şekil 5.18. Tako Jeneratör Çıkış Karakteristiği.....	55
Şekil 5.19. TİEM ve volan bağlantı materyali.	56
Şekil 5.20. TİEM, DAEM, volan tablaları ve yataklı rulman kirişleri.....	56
Şekil 5.21. Advantech PCI-1716 ve PLCD 8710 terminal bordu.	57
Şekil 5.22. LEM LTS 25-NP akım algılayıcı.	57
Şekil 5.23. LEM LA 55-P akım algılayıcı.....	58
Şekil 5.24. LEM LV25-P gerilim algılayıcı.	58
Şekil 5.25. MEFA ME4-S12-NA indüktif algılayıcı.....	59
Şekil 5.26. Klemsan FT-NAM-I-CFG frekans gerilim çevirici.	60
Şekil 5.27. Baykon S tipi yük hücresi.	60
Şekil 5.28. Yük hücresinin TİEM ile bağlantısı.	61
Şekil 5.29. Baykon TX 12 yük hücresi gerilim çevirici.....	61
Şekil 5.30. Yamuk fonksiyonu hız referansı.	63
Şekil 5.31. Rampa fonksiyonu hız referansı.....	64
Şekil 5.32. Merdiven fonksiyonu hız referansı.	65

Şekil 5.33. UDC hız referansı.....	66
Şekil 5.34. NEDC hız referansı.	67
Şekil 5.35. Ölçeklendirilmiş NEDC hız referansı.	68
Şekil 6.1. PID denetleyici ile TİEM benzetim modeli.	72
Şekil 6.2. BM denetleyici ile TİEM benzetim modeli.....	72
Şekil 6.3. PID ve BM denetleyicilerinin 15 N.m yük altında, yamuk fonksiyonu hız referansı ile benzetim çalışması.	74
Şekil 6.4. PID ve BM denetleyicilerinin 30 N.m yük altında, yamuk fonksiyonu hız referansı ile benzetim çalışması.	76
Şekil 6.5. PID ve BM denetleyicilerinin 15 N.m yük altında, rampa fonksiyonu hız referansı ile benzetim çalışması.	77
Şekil 6.6. PID ve BM denetleyicilerinin 30 N.m yük altında, rampa fonksiyon hız referansı ile benzetim çalışması.	79
Şekil 6.7. TİEM sürücü gömülü sistem modeli.....	83
Şekil 6.8. PID ve BM denetleyicilerinin 15 N.m yük altında, yamuk fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışması.	86
Şekil 6.9. PID ve BM denetleyicilerinin 30 N.m yük altında, yamuk fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışması.	88
Şekil 6.10. PID ve BM denetleyicilerinin 15 N.m yük altında, rampa fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışması.	89
Şekil 6.11. PID ve BM denetleyicilerinin 30 N.m yük altında, rampa fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışması.	91
Şekil 6.12. PID ve BM denetleyicilerinin 15 N.m yük altında, merdiven fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışması.	93
Şekil 6.13. PID ve BM denetleyicilerinin 30 N.m yük altında, merdiven fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışması.	95
Şekil 6.14. BM denetleyici kullanarak 15 N.m yük altında, UDC hız referansı ile deneysel çalışma.....	100
Şekil 6.15. BM denetleyici kullanarak 30 N.m yük altında, UDC hız referansı ile deneysel çalışma.....	103
Şekil 6.16. BM denetleyici kullanarak 15 N.m yük altında, ölçeklendirilmiş NEDC hız referansı ile deneysel çalışma.	105
Şekil 6.17. BM denetleyici kullanarak 30 N.m yük altında, ölçeklendirilmiş NEDC hız referansı ile deneysel çalışma.	106

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. TIEM'in normal sürülmesi için faz tetiklemeleri.	18
Çizelge 3.2. TIEM rejeneratif frenleme için faz tetiklemeleri.	22
Çizelge 3.3. Matematiksel ve hazır model için kullanılan TIEM parametreleri.	31
Çizelge 4.1. PID parametrelerinin sisteme etkileri.	36
Çizelge 4.2. TIEM kontrol için örnek BM örnek kural tabanı.	38
Çizelge 5.1. Kelly Controller TIEM parametreleri.	47
Çizelge 5.2. TIEM normal sürme ve rejeneratif frenleme için kullanılan PID denetleyici parametreleri.	49
Çizelge 5.3. TIEM normal sürme, TIEM rejeneratif frenleme, DAEM jeneratör ve DAEM motor için kullanılan BM denetleyici kural tabanı.	50
Çizelge 6.1. Benzetim çalışması PID ve BM denetleyici sonuçları.	81
Çizelge 6.2. Benzetim çalışması PID ve BM denetleyici karşılaştırması.	81
Çizelge 6.3. Deneysel Çalışma PID ve BM denetleyici sonuçları.	97
Çizelge 6.4. PID ve BM denetleyici deneysel çalışma karşılaştırması.	98
Çizelge 6.5. UDC ve ölçeklendirilmiş NEDC hız referansları ile BM denetleyici deneysel çalışma sonuçları.	107

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

V	: Motora uygulanan gerilim
i	: Motordan geçen akım
R	: Motor iç direnci
E	: Motorun ürettiği zıt elektro motor kuvveti
V_n	: TIEM yıldız bağlantının orta noktasındaki gerilim
V_a	: TIEM faz A gerilimi
V_b	: TIEM faz B gerilimi
V_c	: TIEM faz C gerilimi
V_{an}	: TIEM V_a ile V_n arasındaki gerilim
V_{bn}	: TIEM V_b ile V_n arasındaki gerilim
V_{cn}	: TIEM V_c ile V_n arasındaki gerilim
R_s	: TIEM faz direnci
i_a	: TIEM faz A akımı
i_b	: TIEM faz B akımı
i_c	: TIEM faz C akımı
L_{aa}	: TIEM faz A bobin indüktansı
L_{bb}	: TIEM faz B bobin indüktansı
L_{cc}	: TIEM faz C bobin indüktansı
L	: TIEM bobin indüktansı
L_{ab}	: TIEM karşılık indüktansı
L_{ac}	: TIEM karşılık indüktansı
L_{ba}	: TIEM karşılık indüktansı
L_{bc}	: TIEM karşılık indüktansı
L_{ca}	: TIEM karşılık indüktansı
L_{cb}	: TIEM karşılık indüktansı
M	: TIEM karşılık indüktansı

- E_a : TIEM faz A zıt elektro motor kuvveti
 E_b : TIEM faz B zıt elektro motor kuvveti
 E_c : TIEM faz C zıt elektro motor kuvveti
 ω_m : TIEM rotor dönüş hızı
 δ_m : TIEM akı yoğunluğu
 $\varphi_a(\theta)$: TIEM faz A Zıt elektromotor kuvvetinin rotor açısına göre şekli
 $\varphi_b(\theta)$: TIEM faz B Zıt elektromotor kuvvetinin rotor açısına göre şekli
 $\varphi_c(\theta)$: TIEM faz C Zıt elektromotor kuvvetinin rotor açısına göre şekli
 J : TIEM rotor eylemsizliği
 B : TIEM sürtünme katsayısı
 T_e : TIEM rotor döndürme momenti
 T_l : TIEM rotora uygulanan yük moment
 θ : TIEM rotor açısı
 P : TIEM stator kutup çifti
 x : TIEM uzay durum denklemi durum vektörü
 \dot{x} : TIEM uzay durum denklemi durum vektörünün türevi
 u : TIEM uzay durum denklemi giriş vektörü
 A : TIEM uzay durum denklemi durum matrisi
 B : TIEM uzay durum denklemi giriş matrisi
 y : TIEM uzay durum denklemi çıkış vektörü
 C : TIEM uzay durum denklemi çıkış matrisi
 D : TIEM uzay durum denklemi ileri besleme matrisi
 kt : TIEM akım-elektromanyetik tork sabiti
 kV : TIEM açısal hız-zıt elektro motor kuvvet sabiti
 $r(t)$: TIEM referans hız
 $y(t)$: TIEM dönüş hızı
 $e(t)$: TIEM hız hata değeri
 K_p : Oransal katsayı
 K_i : İntegral katsayısı
 K_d : Türev katsayısı
 $u(t)$: Çıkış
 $\Delta e(t)$: Hatanın değişimi

$e(t-1)$: Bir önceki hata
 $\Delta u(t)$: Çıkış değişimi
 $u(t-1)$: Bir önceki çıkış
 $\mu(x)$: BM girişler ve çıkış üyelik fonksiyon dereceleri
 μ_A : BM üyelik derecesi
 μ_B : BM üyelik derecesi
 μ_C : BM üyelik derecesi
 W : Watt
 Ω : Ohm
 H : Henry
 dev : Devir
 rad : Radyan
 sn : Saniye
 sa : Saat
 dk : Dakika
 Wb : Weber
 N : Newton
 F_r : Yuvarlanma direnci
 F_w : Araca etki eden aerodinamik sürtünme
 F_g : Eğim direnci
 m : Araç ağırlığı
 f_r : Yuvarlanma direnci katsayısı
 ρ : Hava yoğunluğu
 A_f : Araç ön alanı
 C_D : Aerodinamik sürtünme
 U : Araç hızı
 g : Yer çekimi ivmesi
 α : Eğim açısı
 r : TIEM tekerlek yarıçapı
 C : Batarya kapasitesi
 Hz : Hertz
 J : Joule

KISALTMALAR

ABS	: Anti-lock blocking system (Kilitlenme karşıtı frenleme sistemi)
BM	: Bulanık mantık
CNC	: Computer Numerical Control
DA	: Doğru akım
DAEM	: Doğru akım elektrik makinesi
DGM	: Darbe genişlik modülasyon
DSP	: Digital signal processing (Sayısal işaret işleme)
ESP	: Electronic stability program (Elektronik stabilite kontrolü)
EUDC	: Extra urban driving cycle (Ekstra kentsel sürüş çevrimi)
FDAM	: Fırçasız doğru akım motoru
İYM	: İçten yanmalı motor
NEDC	: New European driving cycle (Yeni Avrupa sürüş çevrimi)
PD	: Proportional derivative (Oransal türev)
PI	: Proportional integral (Oransal integral)
PID	: Proportional integral derivative (Oransal integral türev)
SMFDAM	: Sabit mıknatıslı fırçalı doğru akım motoru
SOC	: State of charge (Şarj durumu)
TİEM	: Tekerlek içi elektrik makinesi
UDC	: Urban driving cycle (Kentsel sürüş çevrimi)
ZEMK	: Zıt elektro motor kuvveti

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Pahalı yakıt, karbon emisyonları, gürültülü çalışma, düşük verim, petrol rezervlerinin azalması gibi dezavantajlarına rağmen fosil yakıtın yüksek enerji yoğunluklu olması, uzun menzil mesafesi ve hızlı yakıt dolumu İYM'li (İçten yanmalı motor) araçları cazip kılmaktadır. Elektrikli araçlar ucuz enerji, sessiz, sıfır emisyon, yüksek verim gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadır fakat düşük enerji yoğunluklu bataryalar ve bataryaların şarj hızı elektrikli araç üretiminin önündeki en ciddi engellerdir. İYM'li araç üreten firmalar elektrik enerjisinden faydalanabilmek için İYM ve elektrik makinesinin beraber çalışabileceği hibrit sistemler ile mevcut araçlarını revize ederek yakıt tasarrufu sağlamayı başarmışlardır.

Uzak doğu, Avrupa ve Amerika'da hibrit araçlar hızla yaygınlaşmıştır. Batarya teknolojisindeki ilerlemeler ile günümüzde tamamen elektrikli araçlar seri üretime geçmiştir. Batarya teknolojisi ilerlese de enerji yoğunluğu istenilen düzeye ulaşmamıştır. Elektrikli araçların menzil problemleri devam etmektedir ve bu problemleri aşabilmek için mevcut enerjinin yüksek verimlilik ile kullanılması gerekmektedir. Elektrik makinesinin motor olarak sürülme veriminin artırılması, rejeneratif frenleme ile aracın kinetik enerjisinin bataryaya depolanması, rejeneratif frenleme veriminin artırılması, elektrikli araçların menziline arttırmaya katkı sağlamaktadır.

Elektrik makinesi seçimi elektrikli aracın verimliliğini değiştirebilmektedir. Yüksek dönüş hızına sahip fakat tork değeri düşük olan bir elektrik makinesi için redüksiyon sistemlerinin kullanılması gerekmektedir. Redüksiyon işlemi sırasında verim kaybı olmaktadır. Fırça kayıplarından dolayı fırçalı elektrik makinelerinin, fırçasız elektrik makinelerine göre verimi düşük olmaktadır. Bu çalışmada redüksiyona ihtiyaç duymadan tekerlek içerisine monte edilebilen, yüksek torklu, düşük devirli, fırçasız

doğru akım makinesi olan TİEM tercih edilmiştir.

Elektrikli araçlar için üretilmiş olan TİEM ile ilgili literatür çalışması ikinci bölümde yapılmıştır. TİEM ve FDAM (fırçasız doğru akım motoru) ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. Literatürde matematiksel model çıkarılması, farklı denetleyiciler ile TİEM normal sürülmesi, TİEM rejeneratif frenlenmesi, rejeneratif frenleme ile sürtülmeli frenlemenin işbirlikçi çalışması yapılmıştır. Rejeneratif frenleme ile genelde maksimum enerji geri kazanımı ya da frenleme mesafesinin azaltılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmanın farklılığı rejeneratif frenleme ile hız kontrolünün yapılmasıdır.

TİEM'in matematiksel modelinin çıkarılması üçüncü bölümde yapılmaktadır. TİEM'in matematik eşitliklerinden faydalanarak TİEM uzay durum denklemleri çıkarılmaktadır. Matematiksel TİEM modeli ile MATLAB/Simulink hazır TİEM modeli karşılaştırılması yapılmaktadır. PID denetleyici ve BM denetleyici dördüncü bölümde anlatılmaktadır. PID katsayılarının belirlenmesi, BM denetleyicinin avantajları anlatılmaktadır.

TİEM deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için bir test düzeneği hazırlanmıştır. Test düzeneğinde kullanılan malzemeler, TİEM ön test referans hız fonksiyonları ve TİEM standart sürüş çevrim hız fonksiyonları beşinci bölümde açıklanmaktadır. Kurulan test düzeneği ile TİEM bir DAEM'e kuplajlanmaktadır. TİEM normal sürme olarak çalışırken DAEM jeneratör olarak çalışmaktadır ve jeneratörün ürettiği enerji tork kontrollü olarak bir frenleme direnci üzerinde harcanmaktadır. Bu sayede TİEM normal sürme sırasında sabit tork altında çalışmaktadır. TİEM rejeneratif frenleme yaparken bataryayı şarj etmektedir ve DAEM tork kontrollü motor olarak çalışmaktadır. TİEM sabit tork ile rejeneratif frenleme yapmaktadır.

Benzetim çalışması ile TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme için PID ve BM denetleyicileri karşılaştırılmaktadır. Benzetim çalışması için yamuk ve rampa fonksiyonu referans hızları kullanılmaktadır. Deneysel çalışmayla da TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme için PID ve BM denetleyicileri karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırma yapabilmek için ön test sürüş çevrim hız referansları kullanılmaktadır.

Standart sürüş çevrim hız referans deneyleri araç egzoz emisyon ölçümleri için kullanılan UDC ve ölçeklendirilmiş NEDC ile yapılmaktadır. TIEM standart sürüş çevrim hız referansı deneysel çalışması BM denetleyici ile gerçekleştirilmektedir. Deneyler sırasında batarya akımı, batarya gerilimi, TIEM dönüş hızı ve TIEM torku bilgisayar ortamına bir veri alış veriş kartı ile aktarılarak gerçek zamanlı kaydedilmektedir.

Benzetim ve deneysel çalışma sonuçlarının değerlendirilmesi yedinci bölümde yapılmaktadır. Deney sırasında hedeflenen mesafe, gidilen mesafe, normal sürme ile gidilen mesafe, rejeneratif frenleme ile gidilen mesafe, harcanan enerji ve geri kazanılan enerji miktarı verilmektedir. BM denetleyicisinin elektrikli araçlarda normal sürme ve rejeneratif frenlemede kullanılabilir olduğu, rejeneratif frenleme ile referans hız takibinin yapılabildiği, enerji kazanımı sağlandığı benzetim ve deneysel çalışmalar sonucunda görülmektedir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR TARAMASI

Elektrikli araçlarda kullanılan TIEM temelde bir FDAM'dır ve FDAM ile ilgili çok sayıda akademik çalışma bulunmaktadır. Elektrikli araçlar ve TIEM ile ilgili çalışmaların büyük çoğunluğu benzetim çalışması ya da deneysel çalışma ile benzetim çalışmasının karşılaştırılması şeklinde yapılmıştır.

Benzetim çalışmalarında MATLAB programı sıklıkla kullanılmaktadır. MATLAB içerisinde bulunan araç kutuları sayesinde araştırmacılar yeni fonksiyon üretmek zorunda kalmadan sistem benzetimi, optimizasyon, yapay sinir ağları gibi uygulamalar çalışabilmektedir. MATLAB programının kullanılabilmesi için kod yazmak gereklidir ve kod yazmak süreci yavaşlatmaktadır. Simulink ise MATLAB içerisinde çalışmaktadır ve kod yazmadan istenilen sistemin oluşturulması sağlamaktadır. Simulink araç kutularından seçilen kutuların birbirine bağlanmasıyla, ilgili sistem kurulup çalıştırılabilmektedir.

Araç benzetimi çalışmalarında çok sık kullanılan CarSim programı MATLAB/Simulink ile entegre çalışabilmekle birlikte tek başına bağımsız bir program olarak da kullanılabilen bir platformdur. Araç dinamik testleri, önden kayma, arkadan kayma, patinaj, ABS (kilitlenme karşıtı frenleme sistemi), ESP (elektronik stabilite kontrolü) gibi genel araç deneyleri bu program ile yapılabilmektedir.

Literatürde bu alanda yapılan çalışmalar FDAM matematiksel modeli çıkartma, elektrikli araç modelleme, elektrikli araç benzetimi, elektrikli araçlar için enerji yönetim sistemi, TIEM modelleme, TIEM normal sürme, TIEM algılayıcı sürme, TIEM algılayıcısız sürme, TIEM rejeneratif frenleme, farklı denetleyicilerin karşılaştırılması, elektrikli araçlarda rejeneratif frenleme ile sürtümlü frenlemenin işbirlikçi çalışması olarak sınıflandırılabilir.

FDAM'ın matematiksel modeli, transfer fonksiyonu ve uzay durum modeli çıkarılarak MATLAB/Simulink programı benzetimi gerçekleştirilmiştir [1–3]. FDAM ile farklı yükler altında PID denetleyici ile normal sürme ve rejeneratif frenleme benzetimi yapılmıştır [4]. DGM (Darbe genişlik modülasyonu) ile FDAM modellenmesi ve kontrolü yine MATLAB/Simulink kullanılarak benzetimi gerçekleştirilmiştir [5]. Normal sürme ve rejeneratif frenlemenin MATLAB/Simulink programı ile benzetimi ve deneysel çalışması yapılarak karşılaştırma sonuçları incelenmiştir [6]. Başka bir çalışmada dört anahtarlama elemanı ile FDAM sürücü yapılmıştır [7]. DSP (sayısal işaret işleme) kullanarak FDAM'ın algılayıcı, algılayıcısız kontrolü ve PID denetleyici ile normal sürme ve rejeneratif frenleme yapılmıştır [8, 9]. PI denetleyici ve BM denetleyici ile FDAM sürülmüştür. Normal çalışırken PI denetleyici aktif olurken, osilasyon ve taşma durumlarında BM denetleyici aktif olmuştur [10]. FDAM kontrolü için PID denetleyici kullanılmıştır. P, I ve D parametreleri bir BM denetleyici ile gerçek zamanlı olarak belirlenmiştir [11]. Adaptif bulanık sinir ağı ile FDAM sürücü geliştirilmiş ve PID denetleyici ile karşılaştırılarak daha başarılı olduğu gösterilmiştir [12]. Genetik tabanlı BM denetleyici ile algılayıcısız FDAM kontrolü yapılmıştır. ZEMK'nın (zıt elektro motor kuvveti) izlenmesi ile algılayıcı kullanmaya gerek duyulmadan FDAM sürülmüştür. Genetik algoritma kullanarak, kural tabanı yerine parametrelerin optimize edildiği kontrol sistemi geliştirilmiştir [13]. PI denetleyici ve BM denetleyicinin karşılaştırıldığı bir başka çalışmada güneş pilleri ile FDAM motor sürücü denenmiştir. Maksimum güç noktasının referans olduğu sistemde BM denetleyicinin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür [14].

FDAM ile elektrikli araç topolojileri, yönetim sistemleri, BM, PID denetleyiciler ile normal sürme, rejeneratif fren benzetimleri ve deneysel çalışmaları yapılmıştır. Elektrikli ve hibrit araçlar için FDAM kullanımına genel bakış yapılmıştır. Araç üreticileri, yönetimler ve tüketiciler için elektrik makine topolojileri, FDAM sürme operasyonları ve FDAM kontrol stratejileriyle ilgili bilgiler verilmiştir [15]. MATLAB/Simulink'de FDAM ile elektrikli, hibrit araç benzetim çalışmaları yapılmıştır. Hibrit araçlar için kullanılan yakıt hücresi BM denetleyici kontrollü bir DA-DA çevirici ile araç sistemine entegre edilmiş, hem normal sürme hem de rejeneratif frenlemede kullanılmıştır [16]. FDAM ile benzetimi ve elektrikli araç kullanılarak deneyi yapılan rejeneratif frenleme çalışmaları da mevcuttur [17].

FDAM'ın BM ve PID denetleyicileri kullanılarak normal sürme, rejeneratif frenleme benzetimi ve deneysel çalışmaları yapılmıştır [18]. Dört tekerlekten çekişli bir TİEM elektrikli aracın kullanılabilirliğini ve kararlılığını arttırmak için adaptif kısmi PID denetleyici tasarlanmıştır [19].

Elektrikli araçlarda TİEM kullanılmasıyla edinilecek avantajlar açıklanmıştır. TİEM'lerin araç dinamiklerine katkı sağladığı ve araç içi geniş hacimlere olanak tanıyabileceği gösterilmiştir. TİEM'in yakıt pilli ve elektrikli araçlar için kullanılabilirliği ve öneminden bahsedilmiştir [20]. Elektrikli araçlar için yüksek performanslı 25 kW güç ve 42,5 kg.m torca sahip dıştan rotorlu içten statorlu yeni bir TİEM ve TİEM sürücü tasarlanmıştır [21]. Güneş enerjisi yarışları için özel olarak üretilen bir araç için verimi çok yüksek TİEM geliştirilmiştir. Geliştirilen TİEM'in verimi % 97,5 olarak açıklanmıştır [22]. Mikro elektrikli araçlar için TİEM tasarımı ve analizi yapılmıştır [23]. Elektrikli bisiklet için TİEM ve TİEM sürücü teorik olarak hesaplanmış ve hayata geçirilmiştir. TİEM'in elektrikli bisiklet için kullanılabilir olduğu belirtilmiştir [24]. Elektrikli bir mobilet için ekonomik TİEM tasarlanmış ve üretilmiştir [25]. Elektrikli araçlar için optimal TİEM tasarımı yapılmıştır. Araç maksimum ağırlığı, eğimli yolun maksimum açısı, ivme ve maksimum hız parametreleriyle TİEM tasarımı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen TİEM hibrit ya da elektrikli araçlar için kullanılabilir olduğu gösterilmiştir [26]. TİEM tasarlanırken istenen elektromanyetik parametreler ile fonksiyonelliği ve verim için gereken geometrik sınırlamalar arasındaki ilişki analiz edilmiştir [27]. Motor boyutunu küçültmek için manyetik dişli sistemi kullanılan bir TİEM benzetimi ve üretimi yapılmıştır. Benzetim ve deneysel sonuçlar üretilen yeni TİEM'in düşük hızda ve yüksek tork ürettiğini göstermiştir [28].

TİEM tork kontrollü olarak sürülebilmesinin doğru ve etkili bir yöntem olduğu benzetim ve deneysel çalışmalarla ispatlanmıştır [29]. İki tekerlekli elektrikli araç için tork kontrollü elektronik diferansiyel uygulaması yapılmıştır [30]. TİEM'li bir elektrikli araç ile insan destekli benzetimi yapılmış ve araç parametreleri ile aracın tork kontrolü ile rotada kalması sağlanmıştır [31]. Elektrikli araçlarda kullanılan TİEM'in PID, sinirsel PID, BM, BM PID, sinir ağı PID, olasılık bulanık sinir ağı gibi denetleyiciler ile kontrolü yapılmıştır [32–36]. Kullanılan bu denetleyicilerin tamamı

TİEM tork kontrolü yapmaktadır. Tork kontrolü ile elektrikli aracın düz gitmesi, dönüşü sırasında oluşacak tork farkının kontrolü, elektronik diferansiyel uygulaması, araç kaymasının önlenmesi benzetim ve deneysel çalışmalar ile gösterilmiştir [37, 38]. MATLAB/Simulink'te bir elektrikli aracın kaymalı mod BM denetleyici elektronik diferansiyel çalışması yapılmış, sonuçlar PID denetleyici ile kıyaslanmıştır ve kaymalı mod BM denetleyicinin avantajları gösterilmiştir [39].

Dört tekerlekten çekişli elektrikli araçlar için elektronik diferansiyel çalışması MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve dört tekerden çekişli elektrikli araçlar için tork kontrol yönteminin etkili çalıştığı görülmüştür [40]. Dört tekerden çekişli TİEM'li bir elektrikli aracın normal sürülmesi, rejeneratif frenlemesi incelenmiş ve tork dağıtım metodunun TİEM'lerde kullanılabileceği gösterilmiştir [41]. MATLAB/Simulink'te modellenen dört tekerlekten çekişli TİEM elektrikli bir aracın algılayıcısız bulanık tork kontrolü yapılmıştır [42]. Dört tekerlekten çekişli bir elektrikli aracın düşük frekanstaki tork dalgalanmaları ile ilgili çalışma yapılmıştır [43].

Araç menziline en üst seviyeye çıkarmak için TİEM elektrikli araçlarda enerji kontrol stratejisi üzerine benzetim çalışması yapılmıştır. Elektrikli aracın minimum enerji harcaması için TİEM tork dağılımı, optimal araç hızı benzetim sonuçlarıyla bulunmuştur [44, 45]. Bir başka çalışmada araç menziline arttırmak için enerji yönetimi ve sürüş strateji optimizasyonu MATLAB/Simulink CarSim araç kutusu kullanılarak gerçekleştirilmiştir [46]. Enerji harcamayı düşürmek için dört tekerlekten çekişli bir elektrikli araçta optimum tork dağılımı çalışması yapılmıştır. Modellenen elektrikli araç NEDC ile MATLAB/Simulink kullanılarak benzetimi gerçekleştirilmiş ve enerji tüketiminin % 4,8 azaldığı tespit edilmiştir [47]. Elektrikli bir araç enerji verimliliğini arttırmak için BM denetleyici ile yönetilmiştir. Hız, arazi tipi, yük, frenleme, hızlanma ve seçilen vites BM giriş parametreleri olarak seçilmiştir. Seçilen bu parametrelere göre DA motoru sürülmüştür ve araç sürüş menziline PI denetleyiciye kıyasla arttığı tespit edilmiştir [48].

Dört tekerden çekişli elektrikli bir aracın farklı yol koşullarında tork kontrolü ile ESP benzetimi MATLAB/Simulink, CarSim programı ile yapılmıştır [49–52]. Dört

tekerlekten çekişli TİEM elektrikli bir aracın optimal tork dağılımı için ESP çalışması gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları ESP performansının iyileştiğini göstermektedir [53].

Elektrikli bir metro hattında trenlerin rejeneratif frenlemesiyle enerji kazanımının deneyi yapılmıştır ve rejeneratif frenleme esnasında kazanılan enerji tespit edilmiştir [54]. MATLAB/Simulink CarSim araç kutusuyla modellenen ön tekerleklerinde TİEM olan hibrit elektrikli bir aracın rejeneratif fren dengesinin optimizasyonunu sağlamıştır [55]. TİEM'li bir mobiletin simülatörde rejeneratif frenleme ile enerji geri dönüşümü yapılmıştır [56]. Önden çekişli İYM'lu bir aracın arka tekerleklerine TİEM eklemiş ve hem hibrit araç hem de elektrikli araç modlarında iken rejeneratif frenleme başarılmıştır [57]. MATLAB'da yapılan bir benzetim çalışmasında elektrikli bir araç NEDC sürüş döngüsü kullanılarak rejeneratif frenleme yaptırılmıştır [58]. Hibrit elektrikli bir aracın rejeneratif frenlemesi MATLAB/Simulink kullanarak döngüde donanımsal benzetim ile gerçekleştirilmiştir ve batarya şarj durumuna katkısı gözlemlenmiştir [59]. Rejeneratif frenleme ile araç emisyonlarının azaltıldığı, yakıt tasarrufu yaptığı hibrit elektrikli ve İYM'li iki aracın denenmesi ile ortaya konmuştur [60]. Yokuş aşağı güvenli sürüş için TİEM'li tekerlekli sandalyenin rejeneratif frenleme kontrolü yapılmıştır [33]. Hibrit elektrikli araçlar için rejeneratif frenleme sisteminin analizi ve benzetimi MATLAB/Simulink kullanarak farklı sürüş şartlarında gerçekleştirilmiştir [61]. Hibrit bir araç için standart yol testlerinde rejeneratif frenleme kullanarak % 25'e varan yakıt tasarrufu sağlayan bir benzetim çalışması yapılmıştır [62]. Elektrikli araçlarda rejeneratif frenleme için BM denetleyici geliştirilmiştir. Araç hızlanması, hızlanmanın türevi ve yol eğimi giriş değişkenleri, rejeneratif frenlemenin kuvveti çıkış değişkeni olarak tanımlanmıştır ve sonuçlar kullanılan yöntemin doğruluğunu göstermiştir [63]. Rejeneratif frenleme esnasında elde edilen enerjinin depolanması için süper kapasitörlü DA-DA çevirici geliştirilmiştir [64]. TİEM ile rejeneratif frenlemeden elde edilen enerjiyi süper kapasitörlere yüklenmiş ve MATLAB/Simulink ortamında benzetimi NEDC hız döngüsü ile yapılmıştır [65]. Süper kapasitörlü araçlar için rejeneratif frenleme stratejisi geliştirilmiştir. Süper kapasitörlerin çok yüksek enerji yoğunluğundan faydalanarak farklı koşullar altında rejeneratif frenlemeler yapılmış, maksimum % 88 enerji geri kazanımı sağlanmıştır [66]. Elektrikli araçların güvenliğini ve enerji geri

dönüşümü sağlamak için tekerlek tutunma gücü ve motor torku anlık olarak hesaplanarak rejeneratif frenleme benzetimi ve deneysel çalışma yapılmıştır [67].

TİEM elektrikli araçlar için ABS çalışma performansını yükselten çalışmalar yapılmıştır [56, 68, 69]. TİEM elektrikli araç için yapılan döngüde donanımsal benzetim çalışmasında ortak kontrol algoritmasıyla elektrikli fren merkezi ile ABS kontrol edilmiştir [70]. Elektrikli araçlar için rejeneratif frenleme ve sürtünmeli frenleme için döngüde donanımsal benzetim deneyi gerçekleştirilmiştir [71]. BM kullanılarak akıllı rejeneratif frenleme stratejisi geliştirilmiştir. Frenleme gücü, araç hızı, batarya SOC'u (Şarj durumu), batarya sıcaklığı kullanılarak sürtünmeli frenleme ve rejeneratif frenleme arasında dağılımı belirlenmiştir. % 25,7 oranında iyileşme görülmüştür [72]. Rejeneratif frenleme ve sürtünmeli frenleme arasında işbirlikçi algoritma kurarak maksimum düzeyde enerji kazanımı elde edilebileceği MATLAB ortamında gösterilmiştir [73]. Dört tekerlekten çekişli bir elektrikli aracın ön, arka frenler arasındaki güç dağılımı ve rejeneratif frenleme ile sürtünmeli frenleme arasındaki fren güç dağılımının benzetimi yapılmıştır [74]. Hibrit elektrikli bir araç için sürtünmeli frenleme ve rejeneratif frenlemenin benzetimi MATLAB/Simulink'te yapılmıştır [75, 76]. Benzer sistemin deneyi ise bir başka çalışmada yapılmıştır [77]. Hibrit elektrikli araçlarda PI, PID kontrollü rejeneratif frenleme ile yokuş iniş desteği sağlanmıştır [78]. Otomatik vitesli hibrit araçlar için rejeneratif frenleme algoritması geliştirilmiştir [79]. Elektrikli araçlarda sürtünmeli frenleme ve rejeneratif frenleme arasındaki tork dengelenmesi hakkında çalışma yapılmıştır [70, 80]. Dört tekerden çekişli TİEM'li bir elektrikli aracın ani optimal rejeneratif frenlemesi gerçekleştirilmiştir [81]. Dört tekerlekten çekişli elektrikli bir aracın rejeneratif frenleme sırasında maksimum enerji elde edecek fren güç dağıtım benzetimi yapılmıştır [82]. Hibrit elektrikli bir otobüsün işbirlikçi rejeneratif frenleme stratejisi geliştirilmiştir. Yapılan sistemin geleneksel sisteme göre ani acil frende % 17'ye varan iyileştirme gösterdiği tespit edilmiştir [83].

TİEM elektrikli bir aracın motor torku, motor açısal hızı ve araç hızlanması bilgileri ile düz yol, dairesel yol, düşük sürtünmeli yolda denenmiş ve araç hız tahmini yapılmıştır [84]. TİEM ile lastik dinamiklerinin etkileşimi farklı tork değerlerinde dikey ve yatay vibrasyonu ele alınmıştır [85]. Dört tekerlekten çekişli TİEM'li

elektrikli araçlarda yanal kayma ile viraj sertliği tespiti CarSim benzetim programı ile yapılmıştır [74]. Elektrikli araçlarda tekerlek kaymasının minimuma indirilmesi için yol durumu kestirimi yapılmıştır [86]. Bir elektrikli aracın hem elektrik hem de mekanik modeli bir araya getirilerek analitik analizi yapılmıştır. Oluşturulan model MATLAB kütüphanesiyle oluşturulan model ile karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Hız, hızlanma, elektrikli aracın gücü araştırma sonucu olarak incelenmiştir [87]. İki tekerlekli elektrikli araç sürüş performansı iyileştirilmesi için dinamometre üzerinde döngüde donanımsal benzetim çalışması yapılmıştır. Döngüde donanımsal benzetim için bir adet elektrik motoru dinamoya bağlanmış ve kontrolü bilgisayar üzerinden gerçekleştirilmiştir [88]. Elektrikli araç batarya ömürlerinin uzatılması için bir DA-DA çevirici ve kapasitör kullanarak tampon batarya kullanılmıştır. Sonuçlar araç menziline % 5-6 arttığını, batarya ömrünün % 20 arttığını göstermiştir [89]. Bir elektrikli araç için gömülü sistem ile batarya SOC tahmini yapılmıştır [90].

Bu tez çalışmasında elektrikli araçlar için üretilen yüksek torklu, düşük devirli, redüksiyona ihtiyaç duymadan hafif bir elektrikli araca tahrik verebilen, fırçasız, 3 kW gücünde bir TİEM, bir DAEM ile kuplajlanarak test düzeneği kurulmaktadır. TİEM ile normal sürme ve rejeneratif frenleme deneysel çalışmaları test düzeneği üzerinde yapılmaktadır. TİEM normal sürülürken DAEM tork kontrollü jeneratör olarak çalışmaktadır. TİEM rejeneratif frenleme ile bataryaları şarj ederken DAEM tork kontrollü motor olarak çalışmaktadır ve TİEM'e gerekli tahrik gücünü sağlamaktadır. Kurulan test düzeneği ile TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme sırasında sabit tork altında çalışmaktadır.

TİEM'in normal sürülmesi ve rejeneratif frenlenmesi için MATLAB/Simulink gömülü sistem ile programlanabilen bir TİEM sürücü kullanılmaktadır. MATLAB/Simulink ortamında hazırlanan PID ve BM denetleyicileri ile oluşturulan bloklar TİEM sürücüyü gömülerek deneysel çalışmalar gerçekleştirilebilmektedir. Deneysel çalışmalar için ön test sürüş çevrimleri ve standart sürüş çevrimleri referans hız olarak TİEM'e uygulanmaktadır. Referans hız denemeleri içerisinde normal sürme ve rejeneratif frenleme mevcuttur. TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme ön test sürüş çevrimleri PID ve BM kullanılarak gerçekleştirilmekte ve denetleyici

karşılaştırması yapılmaktadır. Standart sürüş çevrimleri için sadece BM denetleyici kullanılmaktadır.

Literatür çalışmasında TIEM'in PID ve BM denetleyicileri ile normal sürülebildiği görülmektedir. Rejeneratif frenleme ile ABS, ESP, maksimum enerji kazanımı, minimum frenleme mesafesi, sürtünmeli fren ile işbirlikçi çalışması literatürde yapılmıştır. Bu tezin özgünlüğü ise rejeneratif frenleme ile hız takibi yapılarak TIEM dönüş hızının istenilen referans hız düzeyinde tutulmasıdır. TIEM hızının rejeneratif frenleme ile sabitlenmesi, yokuş aşağı eğimli bir yolda PID ve BM denetleyicileri kullanarak rejeneratif frenleme ile hız sabitleme çalışması literatüre katkı sağlamaktadır [91].

BÖLÜM 3

TEKERLEK İÇİ ELEKTRİK MOTORU

Elektrikli araçların hareket edebilmesini sağlayan elektrik motorları farklı şekillerde araca monte edilebilmektedir. Elektrik motoru debriyaj-şanzıman-diferansiyel, redüksiyon-diferansiyel, redüksiyonla direk, redüksiyonsuz direk tekerlek sürülebilmektedir. Elektrikli araçlar için üretilen, redüksiyonsuz direk tekerlek süren, tekerlek içine monte edilen doğru akım motoru olan TİEM birçok akademik çalışmada elektrikli araçlar üzerinde kullanılmıştır [21, 22, 26, 29–31, 36, 39–42, 50, 51].

Mekanik sürtünme olmadığı için TİEM'in enerji verimliliği çok yüksektir ve enerji verimliliğini daha arttırmak için yapılan çalışmalar mevcuttur [21, 22, 44–47, 49]. Veriminin yüksek olması ve elektrikli araç içerisinde çok az yer kapladığı için TİEM'in elektrikli araçlar için doğru tercih olduğu ispatlanmıştır [21, 22, 24, 26, 28]. TİEM'in daha iyi anlaşılabilmesi için SMFDAM (sabit mıknatıslı fırçalı doğru akım motoru) ve FDAM olmak üzere doğru akım motorları incelenmelidir.

3.1. DOĞRU AKIM MOTORLARI

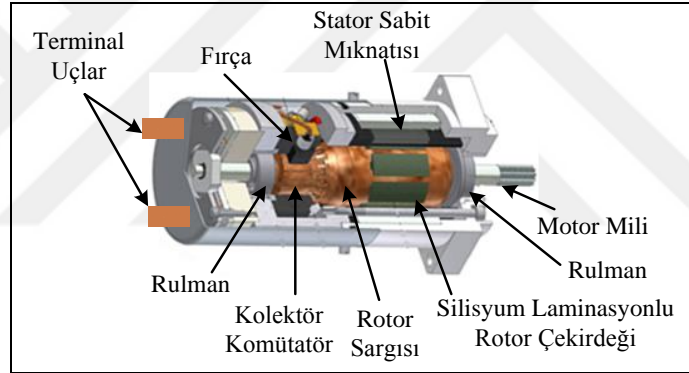
Elektrik motorları elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirmektedir. Elektrik motorlarının kullanım alanlarına göre birçok çeşidi vardır. Doğru akım motorları hayatın hemen her yerinde kullanılmaktadır.

Arabalarda marş motorları, cam silecek motorları, bilgisayarlarda bulunan soğutma fanları, yeni nesil çamaşır makinelerinin tambur motorları, elektrikli bisikletlerde ve mobiletlerde tekerleğe tahrik veren motorlar bunlara örnek olarak verilebilir. FDAM TİEM'e çok benzemektedir ancak konunun daha iyi kavranması için SMFDAM'dan bahsedilecektir.

3.1.1. Sabit Mıknatıslı Fırçalı Doğru Akım Motoru

Kullanımı basittir, bir yöne dönüş hareketi sağlamak için terminal uçlarına DA gerilimi verilmesi yeterlidir. Şekil 3.1’de bir SMFDAM iç yapısı gösterilmektedir. Stator, rotor ve fırçalar olmak üzere temel olarak üç ana bölümden meydana gelmektedir. Stator elektrikli motorların hareket almayan kısımlarına denir ve sabittirler. Stator sabit mıknatıslı ya da alan sargılı olabilmektedir.

Alan sargılı statorunun çok çeşidi mevcut olup burada sadece sabit mıknatıslı olan stator anlatılacaktır. Rotor elektrik motorlarının dönen kısmına denir. Rotor çok sayıda, kalınlığı 0,3-0,7 mm arasında değişen silindirik yapıda silisyumlu çelik laminasyon saçların bir araya gelmesi ile oluşturulmaktadır.



Şekil 3.1. SMFDAM iç yapısı [92].

Laminasyonlu saçların içerisinde rotor sargılarının geçebilmesi için boşluk bulunmaktadır. Laminasyonlu saçlar, içerisinden geçen motor miline bağlıdır. Mil iki ucundan motorun dış gövdesine rulman veya burç ile yataklanmaktadır. Milin bir ucunda kolektör ya da komütatörler bulunmaktadır. Kolektörlere fırçalar temas sağlamaktadır. Fırçalar ise terminal uçlarına bağlıdır. Fırça ile kolektörlerin temas ettiği yüzey üzerinden geçen akım ve sürtünme neticesinde ısınmaktadır. Bu ısı çoğu zaman rotor miline bağlı bir fan vasıtasıyla soğutulur.

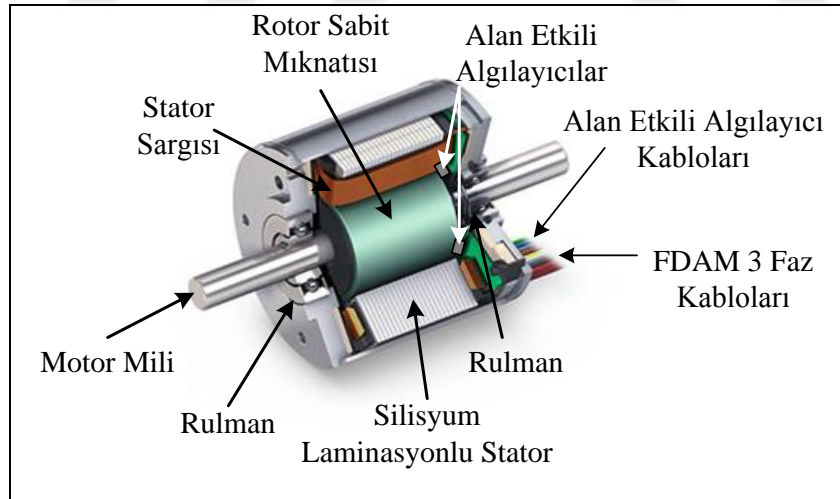
Motor fırçalarından geçen elektrik akımı kolektörler üzerinden rotor sargısından geçmektedir. Üzerinden elektrik akımı geçen rotor sargısı manyetik alan

oluşturmaktadır. Oluşan bu manyetik alan aynı kutupların bir birini itmesi ve zıt kutupların birbirini çekmesiyle rotorun dönmesini sağlamaktadır.

Fırça ve kolektörler olmasaydı rotor dönüşünü zıt kutuplar dengeye geldiği zaman tamamlayacaktı ancak zıt kutuplar dengeye gelmeden kolektörler vasıtasıyla rotor akımının yönü değiştirilir ve dönüş hareketi devam eder. SMFDAM'ın fırça-kolektör aşınmaları ömrünün kısa olmasına, veriminin düşük olmasına ve ısınma problemlerine neden olmaktadır. Bunun yanında kullanımının kolay olması dezavantajlarına rağmen tercih sebebidir.

3.1.2. Fırçasız Doğru Akım Motoru

Fırça kolektör sürtünmelerinden kaynaklanan SMFDAM dezavantajları FDAM ile ortadan kalkmaktadır ancak fırçasız doğru akım motorunun sürülmesi daha zordur. Şekil 3.2'de bir FDAM'ın iç yapısı verilmektedir. FDAM stator ve rotor olmak üzere iki kısımdan meydana gelmektedir.



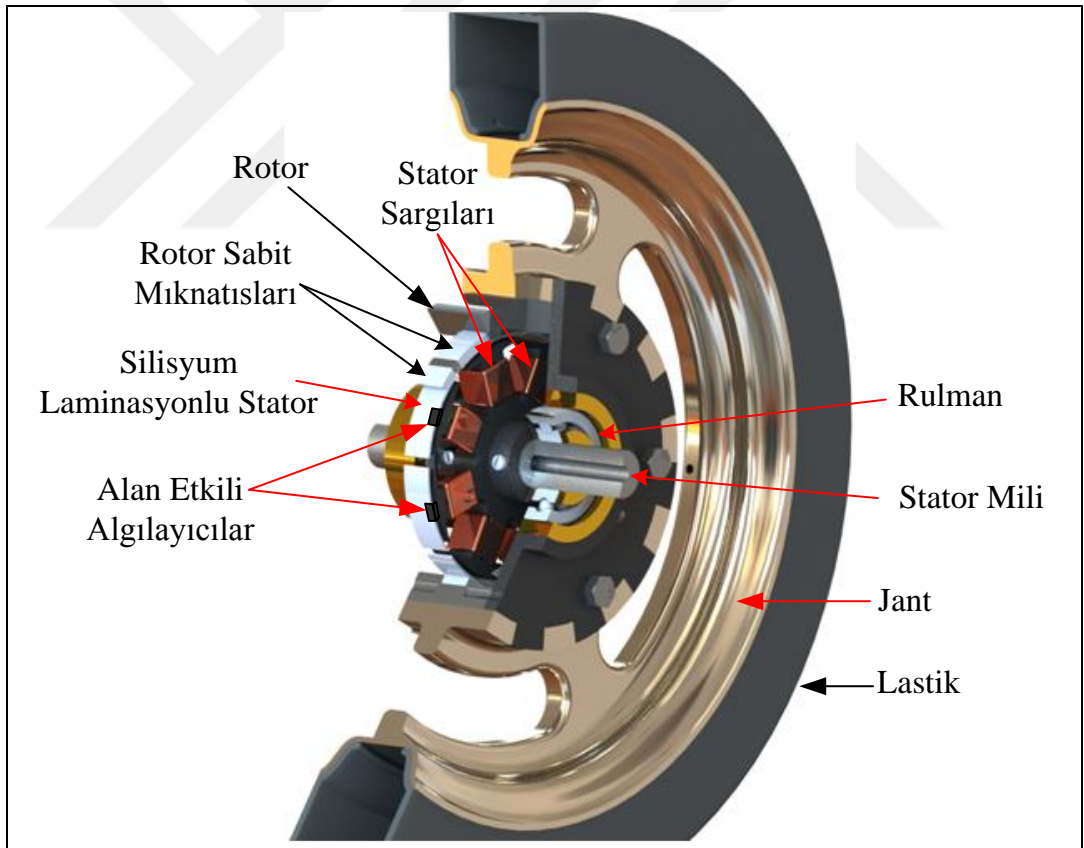
Şekil 3.2. FDAM iç yapısı [93].

FDAM statorunda sargılar mevcuttur. Genelde yıldız şeklinde bağlı üç fazdan meydana gelmektedir. Stator silisyum laminasyonlu saçlardan oluşmaktadır. FDAM rotorunda motor miline yerleştirilmiş sabit mıknatıs bulunmaktadır ve silindirik yapıdadır. Motor mili her iki ucundan FDAM dış kasasına sabitlenmiştir.

FDAM içerisinde herhangi bir komütatör bulunmadığından dolayı stator sargıları rotorun pozisyonuna göre tetiklenmelidir. Bu işlem için rotor açısı ZEMK ile belirlenebilir ya da alan etkili algılayıcılar ile rotor mıknatısının yönü tespit edilebilir. Üç fazlı bir FDAM'ın sürülmesi için üç yarım köprüden oluşan bir FDAM sürücü kullanılmaktadır. Temel çalışma prensipleri aynı olduğu için TİEM konusu içerisinde detaylı olarak anlatılmaktadır.

3.2.TEKERLEK İÇİ ELEKTRİK MAKİNESİ

TİEM temelde bir FDAM'dır ve iki ana parçadan meydana gelmektedir. Bu parçalar stator ve rotordur. Stator sabit olan kısımdır ve içeridedir. Rotor ise dönel kısımdır ve dışarıdadır. Şekil 3.3'te bir TİEM'in iç yapısı verilmektedir.

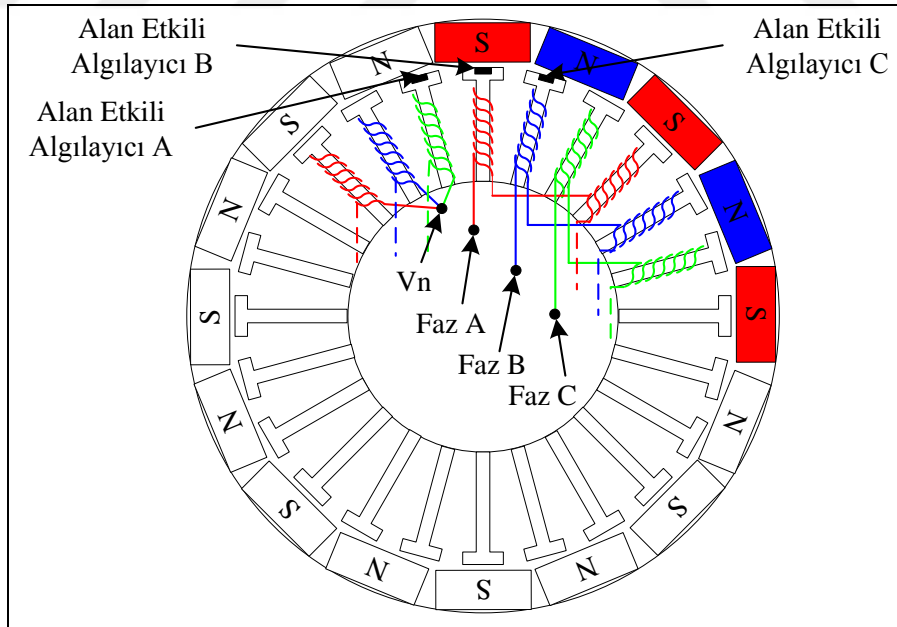


Şekil 3.3. TİEM iç yapısı.

Stator mili statora bağlıdır ve elektrikli araca sabitlenmektedir. Stator mili her iki taraftan rotora rulman ile yataklanmaktadır. Stator silisyum laminasyonlu saçlardan

meydana gelmektedir. Stator sargılarının sarılabilmesi için bu saçların arasında boşluk bırakılmaktadır. TİEM'in çok sayıda stator sargısı mevcuttur. Stator sargı sayısının fazla olması torku arttırmakta ve dönüş hızını azaltmaktadır. Bu sayede dişli sisteme gerek kalmadan bir aracın tekerleğini direk tahrik edebilecek torka sahip olmaktadır. Rotorda sabit mıknatıslar bulunmaktadır. Rotora jant, tekerlek, disk fren veya kampana fren bağlanabilen çeşitleri mevcuttur. Elektrikli araçlarda kullanılan TİEM'ler genellikle alan etkili algılayıcılardan alınan konum sinyalleri ile sürülürler.

TİEM'in rotor kısmında bulunan mıknatıslar bir ters bir düz yerleştirilmiştir. Yani bir mıknatısın N kutbu statora bakacak şekilde yerleştirilirse bir sonraki mıknatısın S kutbu statora bakacak şekilde yerleştirilir. Bu yerleşime kutup çifti adı verilmektedir. Şekil 3.4'te verilen TİEM'in 8 adet kutup çifti ve 24 stator sargısı bulunmaktadır. TİEM'ler genellikle 3 faz olarak üretilmektedirler. Şekil 3.4'te gösterilen TİEM'de 8'er adet Faz A, Faz B ve Faz C stator sargısı bulunmaktadır ve sıra ile sarılmışlardır. V_n ile gösterilen noktada yıldız şeklinde birbirine bağlanmaktadır. TİEM'in hareket etmesi için fazlar rotorun durumuna göre tetiklenmelidir.



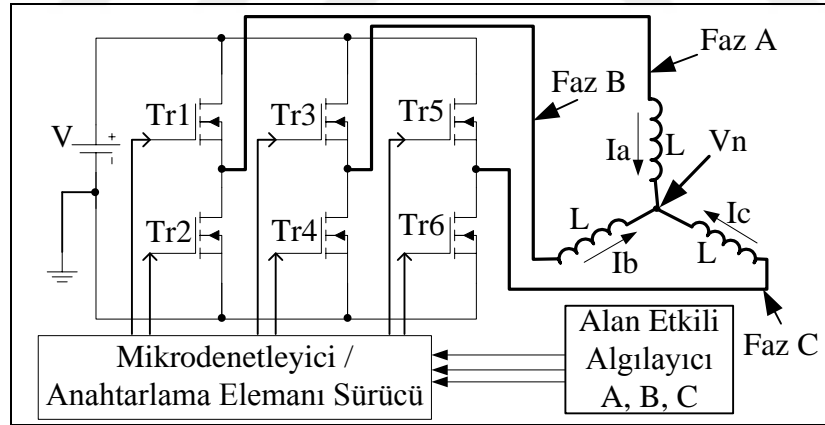
Şekil 3.4. TİEM rotor ve statoru.

Rotorun durumunu belirlemek için alan etkili algılayıcılar kullanılmaktadır. Alan etkili algılayıcılar genellikle stator içerisinde bulunmaktadır ve rotor pozisyonunu

algılayarak konum bilgisini denetleyiciye göndermektedir. Denetleyici ise algılayıcılardan gelen bilgiye göre uygun fazları tetiklemekte ve hareket sağlanmaktadır.

3.3. TIEM NORMAL SÜRÜLMESİ

TIEM'in normal sürülmesi üzerine akademik çalışmalar mevcuttur. Çalışmaların çoğu 3 yarım H köprüsü ile 3 fazlı TIEM'in sürülebildiğini ve bunun doğru bir sürme şekli olduğunu ifade etmektedir [3–5, 9, 15, 18, 21]. TIEM'in elektriksel bağlantısı Şekil 3.5'te verilmektedir. Elektriksel bağlantıda her bir iki yarım iletken anahtarlama elemanlarından oluşan üç adet yarım H köprüsü, 3 adet faz sargısı, 3 adet alan etkili algılayıcı, bir mikrodenetleyici ve yarım iletken anahtarlama elemanı sürücüsü kullanılmaktadır. H köprüsünün +V'ye bağlı olan anahtarlama elemanlarına üst anahtar, -V'ye bağlı olan anahtarlama elemanlarına alt anahtar adı verilmektedir. Yani Tr1, Tr3 ve Tr5 üst anahtarlama elemanları, Tr2, Tr4 ve Tr6 alt anahtarlama elemanları olarak adlandırılır.



Şekil 3.5. TIEM elektriksel bağlantısı.

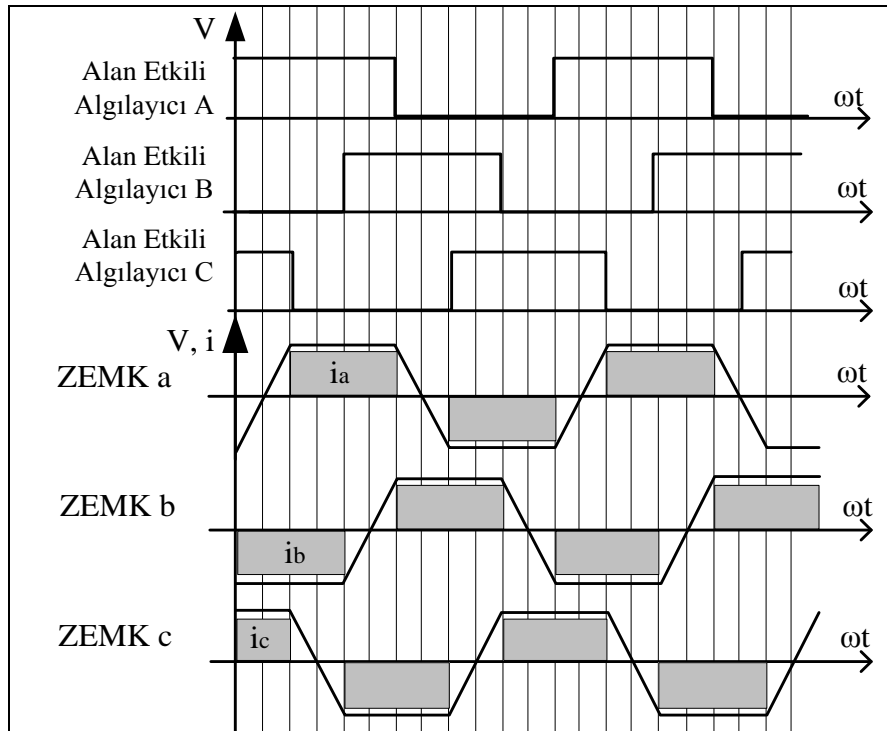
Kullanılan yarım H köprülerinin her birisi bir faz için kullanılmaktadır. Alan etkili algılayıcılar rotorun konumunu mikrodenetleyiciye göndermektedir. Mikrodenetleyici ise alan etkili algılayıcılardan gelen bilgiye göre iki yarım H köprüsünün anahtarlama elemanlarından birisini aktif etmektedir. Örneğin Faz A pozitif ve Faz B negatif olacak ise Tr1 ve Tr4 anahtarlama elemanları aktif olmalı diğer anahtarlama elemanları ise

pasif olmalıdır. TIEM ilk dönüş hareketini aldıktan sonra alan etkili algılayıcılar rotor konumu değişene kadar mevcut durumun korunmasını sağlamaktadır.

Konum değiştiğinde mikrodenetleyici diğer uygun iki anahtarlama elemanını aktif eder ve bu şekilde dönüş sürekli hale gelir. Çizelge 3.1’de alan etkili algılayıcı konumlarına göre faz tetiklemeleri ve aktif edilen anahtarlama elemanları gösterilmektedir. TIEM hareketinde alan etkili algılayıcıların bilgileri, faz akımları ve ZEMK Şekil 3.6’da gösterilmektedir.

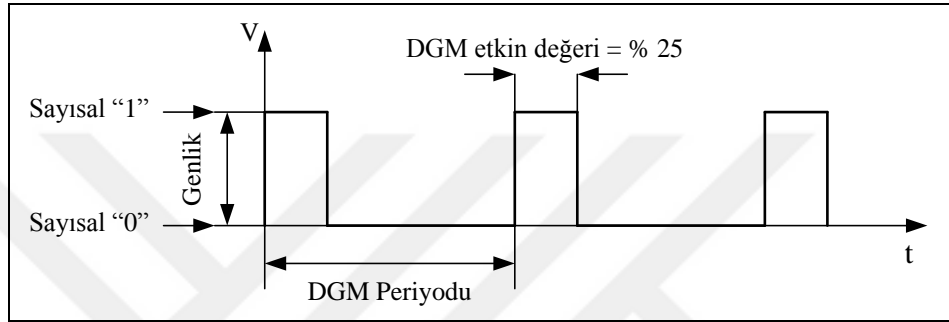
Çizelge 3.1. TIEM’in normal sürülmesi için faz tetiklemeleri.

Alan Etkili Algılayıcı Konumları			Faz A	Faz B	Faz C	Tr1	Tr2	Tr3	Tr4	Tr5	Tr6
A	B	C									
1	0	1	-	GND	+V	0	0	0	1	1	0
1	0	0	+V	GND	-	1	0	0	1	0	0
1	1	0	+V	-	GND	1	0	0	0	0	1
0	1	0	-	+V	GND	0	0	1	0	0	1
0	1	1	GND	+V	-	0	1	1	0	0	0
0	0	1	GND	-	+V	0	1	0	0	1	0



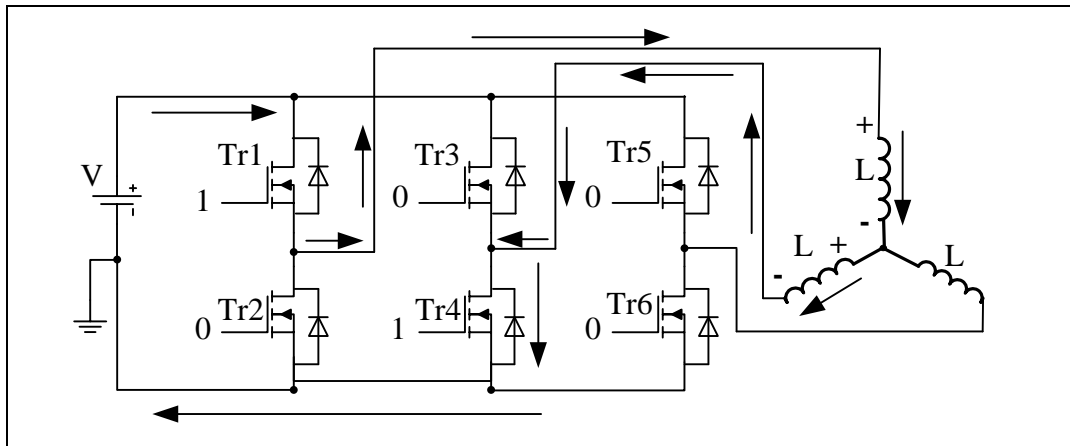
Şekil 3.6. Alan etkili algılayıcı, ZEMK ve akım grafikleri.

TİEM'in normal sürme hız kontrolünün yapılabilmesi için anahtarlama elemanlarının, anahtarlama elemanı sürme entegrelerinin, mikrodenetleyicilerin desteklediği ve literatürde kullanılan DGM kullanılmaktadır. DGM etkin değeri % 25 olan bir DGM sinyali Şekil 3.7'de gösterilmektedir. TİEM'in bağlı olduğu 3 yarım H köprünün üst anahtarlama elemanları DGM ile tetiklenir alt anahtarlama elemanları ise faz sırasına göre aktif edilir. DGM sinyali 1 olduğunda Tr1 ve Tr4 anahtarlama elemanları TİEM faz sargısına Şekil 3.8'de gösterildiği gibi enerji iletmektedir.



Şekil 3.7. Etkin değeri % 25 olan örnek DGM sinyali.

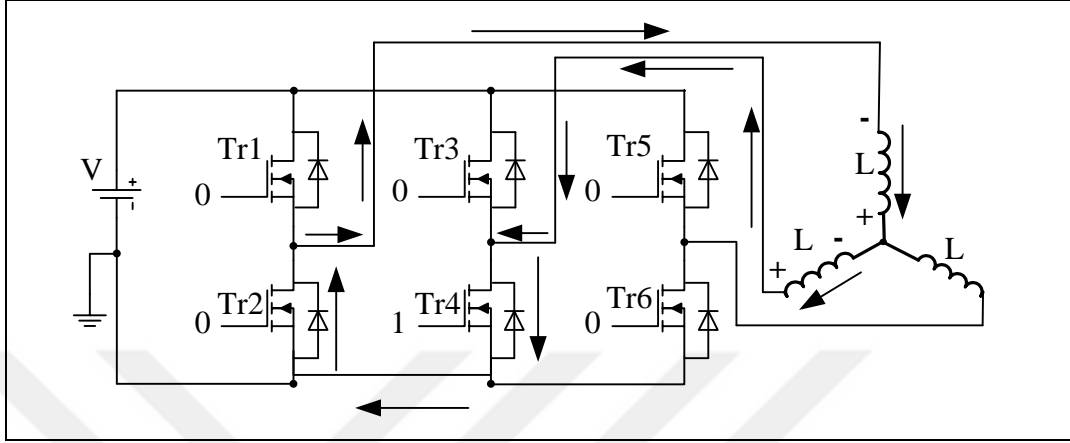
Üzerinden akım geçen faz sargısı manyetik alan oluşturur ve TİEM'i harekete geçirir. Akımın yönü oklar ile gösterilmekte, faz sargılarının üzerindeki gerilimler + ve - işaretleriyle gösterilmektedir.



Şekil 3.8. TİEM normal sürülürken DGM'nin 1 olması durumunda akım yolu.

TİEM faz sargıları enerjilendikten sonra DGM 0 olduğu zaman, faz sargıları Şekil 3.9'da gösterildiği gibi Tr2 anahtarlama elemanının diyotu ve Tr4 anahtarlama

elemanı üzerinden kısa devre olarak deşarj olmaktadır. Anahtarlama elemanlarından geçen akım ok yönleriyle, faz sargıları üzerindeki gerilimler - ve + işaretleriyle gösterilmektedir.

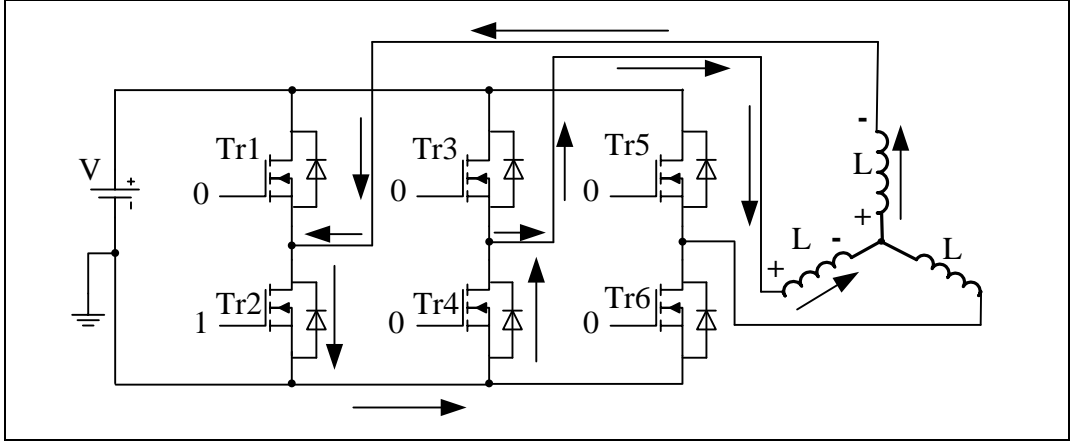


Şekil 3.9. TİEM normal sürülürken DGM'nin 0 olması durumunda akım yolu.

3.4. TİEM İLE REJENERATİF FRENLEME

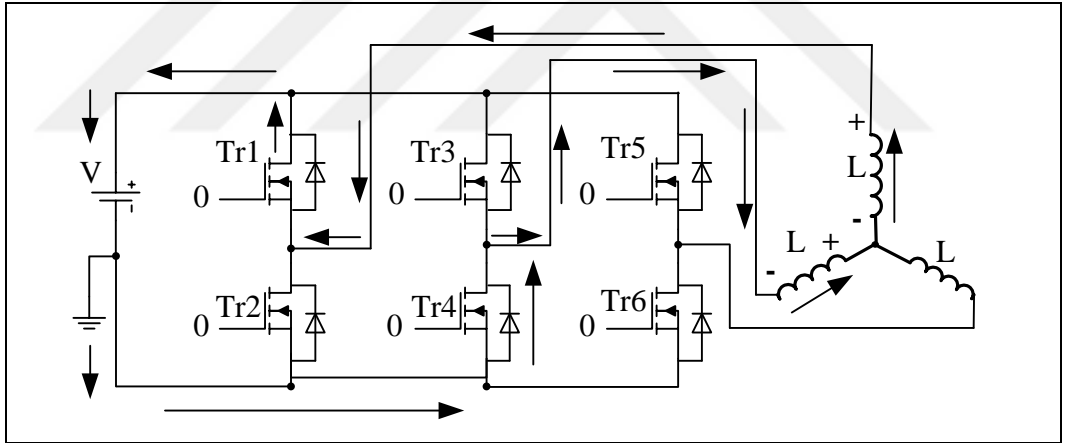
Rejeneratif frenleme tahrik edilen bir elektrik makinesinin mekanik enerjisi elektrik enerjisine çevirmesi ve bu enerjinin tekrar kullanılabilmesi için bir iletim hattına ya da bataryaya aktarılması olarak ifade edilmektedir. Elektrikli araçlarda rejeneratif frenleme aracın kinetik enerjisinin, içerisinde bulunan elektrik makinesiyle aracın yavaşlatılması ve araç bataryasının şarj edilmesi için yapılmaktadır. TİEM ile rejeneratif frenleme yaparak bataryanın şarj edilebilmesi ve elektrikli araç menzilinün uzatılması mümkündür [17, 18, 30, 33, 55–58, 78].

Rejeneratif frenleme yapabilmek için TİEM'in belirli bir hızda dönmesi, bataryanın belirli bir şarj değerinin altında olması, TİEM'den geçen akımın ve TİEM sürücü sıcaklığının kontrol edilmesi gerekmektedir. DGM'nin belirli bir değerin altında olması gerekmektedir. Bu şartlar sağlandıktan sonra TİEM ile rejeneratif frenleme alt anahtarlama elemanlarına DGM uygulanarak yapılabilmektedir. TİEM'in belirli bir hızda döndüğü kabul edilirse, TİEM faz sargıları DGM 1 iken Şekil 3.10'da gösterildiği gibi ile Tr2 anahtarlama elemanı ve Tr4 diyotu üzerinden enerjilendirilmektedir [17, 18, 30, 33].



Şekil 3.10. TİEM rejeneratif frenlenirken DGM'nin 1 olması durumunda akım yolu.

DGM 0 olduğunda Şekil 3.11'de gösterildiği gibi Tr2 anahtarlama elemanı pasif edilir. Enerjilenen TİEM faz sargıları, bataryayı Tr1 diyotu ve Tr4 diyotu üzerinden şarj eder. Bu sırada TİEM negatif yönde tork oluşturarak frenleme sağlar [17, 18, 30, 33].



Şekil 3.11. TİEM rejeneratif frenlenirken DGM'nin 0 olması durumunda akım yolu.

TİEM ile rejeneratif frenleme yapabilmek için DGM'nin alan etkili algılayıcı konumlarına göre doğru anahtarlama elemanlarını tetiklemesi gerekmektedir. Çizelge 3.2'de alan etkili algılayıcı konumlarına göre rejeneratif frenleme sırasında tetiklenmesi gereken anahtarlama elemanları verilmektedir.

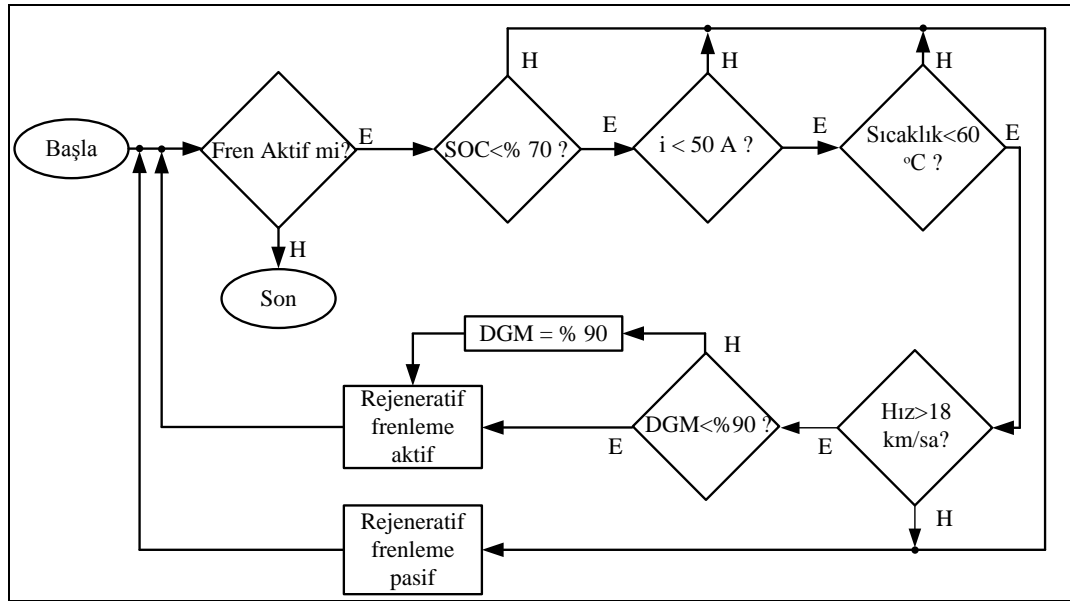
Rejeneratif frenlemenin başlayabilmesi için dört ana şarta ve bir doyum değerine bakılmaktadır. Rejeneratif frenleme için belirlenen algoritma Şekil 3.12'de

verilmektedir. Bataryanın şarj durumu (% 70'den az olmalı), rejeneratif frenleme akımı (50 A'den az olmalı), anahtarlama elemanlarının sıcaklıkları (60 °C'den az olmalı) ve TİEM hızı (18 km/sa'den fazla olmalı) istenilen şartları sağlıyorsa rejeneratif frenleme aktif olmaktadır.

Çizelge 3.2. TİEM rejeneratif frenleme için faz tetiklemeleri.

Alan Etkili Algılayıcı Konumları			Tr1	Tr2	Tr3	Tr4	Tr5	Tr6
A	B	C						
1	0	1	0	0	0	0	0	DGM
1	0	0	0	DGM	0	0	0	0
1	1	0	0	DGM	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	DGM	0	0
0	1	1	0	0	0	DGM	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	DGM

İstenilen şartlar sağlanmıyorsa rejeneratif frenleme pasif duruma geçmektedir. Rejeneratif frenlemeyi DGM ile kontrol etmek mümkündür. DGM etkin değeri % 90'nın üzerine çıkarsa anahtarlama elemanları, kısa devre süresi artacağından dolayı zarar görecektir. Anahtarlama elemanlarını korumak için DGM etkin değer şartı en fazla % 90 olmalıdır.



Şekil 3.12. Rejeneratif frenleme algoritması.

TİEM normal sürülürken DGM 1 olduğunda iki anahtarlama elemanından akım geçmektedir, DGM 0 olduğunda bir anahtarlama elemanı ve bir diyottan akım geçmektedir. TİEM rejeneratif frenleme yaparken DGM 1 olduğunda bir anahtarlama elemanı ve bir diyot üzerinden akım geçmektedir, DGM 0 olduğunda iki diyottan akım geçmektedir. Yani 1 DGM periyodu için TİEM normal sürülürken 3 anahtarlama elemanı ve bir diyot üzerinden akım geçmektedir. 1 DGM periyodu için TİEM rejeneratif frenleme yaparken 1 anahtarlama elemanı ve üç diyot üzerinden akım geçmektedir. Rejeneratif frenleme yaparken akımın geçtiği diyot sayısı fazla olduğu için TİEM sürücü fazla ısınmaktadır.

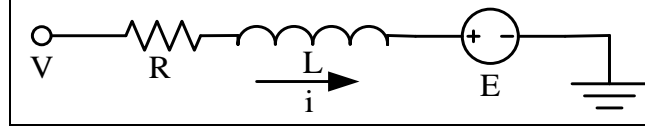
3.5. TİEM MATEMATİKSEL MODELİ VE BENZETİMİ

Bir sistemin benzetimini oluşturmak yapılacak deneydeki hatalara aza indirir. Benzetim sonuçları gerçek sonuçlar hakkında ön bilgi vermektedir. Benzetim sayesinde hataların, yanlışların veya eksiklerin kolay ve hızlı bir şekilde tespit edilip düzeltilmesi sağlanarak zamandan ve maddiyattan tasarruf edilmektedir. Bir sistemin benzetiminin gerçekleştirmek için matematiksel modelinin çıkarılması gerekir. Bunun için de matematiksel denklemlerinin yazılması gerekmektedir. TİEM'in matematiksel modeli literatürde uzay durum denklemleri şeklinde yazılmaktadır [1–5, 14, 94]. Uzay durum denklemleri zaman eksenli olduğu için TİEM benzetiminin gerçekleştirilmesi daha kolay olmaktadır. TİEM matematiksel modeli çıkarılırken temel DA motor denklemleri kullanılmaktadır. TİEM benzetimi oluşturulurken bulunan matematiksel model kullanılmaktadır. TİEM benzetimi MATLAB/Simulink ortamında yapılmaktadır. MATLAB/Simulink temel blokları kullanarak hızlı ve doğru bir şekilde benzetim gerçekleştirilebilmektedir. Oluşturulan matematiksel model, MATLAB/Simulink içerisinde hazır bulunan TİEM modeli ile karşılaştırılarak oluşturulan modelin doğruluğu sınanmaktadır.

3.5.1. TİEM Matematiksel Denklemleri

TİEM matematiksel modelinin daha iyi anlayabilmek için önce DA motorunun matematiksel modelinin incelenmesi gerekmektedir. Şekil 3.13'te bir DA motorunun elektriksel karşılığı verilmektedir. DA motoru terminal uçlarına gerilim

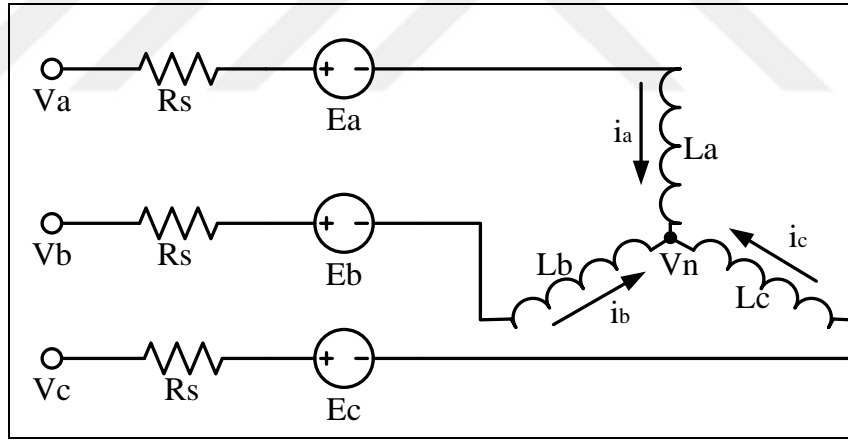
uygulandığında rotor sargısı üzerinden akım geçmeye başlayarak manyetik alan oluşur ve DA motorunun rotoru dönel harekete başlar. DA motorunun matematiksel denklemini Eşitlik 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.13. DA motorunun elektriksel karşılığı.

$$V = i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt} + E \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1’de verilen V , motor terminal uçlarına uygulanan gerilim, i rotor sargısı üzerinden geçen akım, R motor terminal uçları arasındaki iç direnç, L motor terminal uçları arasındaki indüktans, E motorun ürettiği ZEMK’yı göstermektedir.



Şekil 3.14. TİEM elektriksel karşılığı.

Şekil 3.14’te TİEM’in elektriksel karşılığı verilmektedir. TİEM’in faz indüktansları ve iç dirençleri eşit kabul edilmektedir. TİEM matematiksel denklemleri Eşitlik 3.2’de matris şeklinde gösterilmektedir [1–5, 14].

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2’de verilen V_{an} , V_{bn} ve V_{cn} motor uçlarına uygulanan gerilimin V_n noktası farkını göstermektedir. V_n , V_{an} , V_{bn} ve V_{cn} Eşitlik 3.3 – 3.6 ile bulunmaktadır. Eşitlik 3.2’de verilen R_s faz iç dirençlerini, i_a , i_b , i_c faz akımlarını, L_{aa} , L_{bb} , L_{cc} faz indükaslarını, L_{ab} , L_{ac} , L_{ba} , L_{bc} , L_{ca} , L_{cb} karşılık indüktanslarını, E_a , E_b ve E_c fazların ZEMK’larını göstermektedir.

$$V_n = (V_a + V_b + V_c - E_a - E_b - E_c)/3 \quad (3.3)$$

$$V_{an} = V_a - V_n \quad (3.4)$$

$$V_{bn} = V_b - V_n \quad (3.5)$$

$$V_{cn} = V_c - V_n \quad (3.6)$$

Karşılık indüktansı, bir nüveye sarılmış bobinden akım geçerken nüveye sarılmış diğer bobinlerin etkilenmesi şeklinde açıklanabilir. Eşitlik 3.7’de faz indüktansları verilmektedir. Eşitlik 3.8’de karşılık indüktansı M gösterilmektedir.

$$L = L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} \quad (3.7)$$

$$M = L_{ab} = L_{bc} = L_{ac} = L_{ba} = L_{cb} = L_{ca} = L_{cb} \quad (3.8)$$

Eşitlik 3.7 ve Eşitlik 3.8, Eşitlik 3.2’de yazılırsa Eşitlik 3.9 elde edilir.

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Şekil 3.14’te gösterildiği üzere bir düğüme giren akımların matematiksel toplamı sıfıra eşittir. Eşitlik 3.10’da ve Eşitlik 3.11’de matematiksel denklemleri verilmektedir. Eşitlik 3.11’de elde edilen denklem Eşitlik 3.9’da yerine yazılırsa, Eşitlik 3.12 elde edilir.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (3.10)$$

$$MI_a = -MI_b - MI_c \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Eşitlik 3.12’de verilen ZEMK için Eşitlik 3.13 yazılır.

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \omega_m \cdot \delta_m \cdot \begin{bmatrix} \varphi_a(\theta) \\ \varphi_b(\theta) \\ \varphi_c(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Eşitlik 3.13’te verilen ω_m rotor dönüş hızı (rad/sn), δ_m akı değeri (Wb veya V.sn), θ rotor açısı, $\varphi_a(\theta)$, $\varphi_b(\theta)$ ve $\varphi_c(\theta)$ ZEMK’nın rotor açısına göre fonksiyonunu vermektedir. TIEM’in ürettiği elektromanyetik tork T_e Eşitlik 3.14’te verilmektedir.

$$T_e = [E_a \cdot i_a + E_b \cdot i_b + E_c \cdot i_c] / \omega_m \quad (3.14)$$

Eylemsizlik, sürtünme, üretilen elektromanyetik tork ve yük arasındaki ilişki Eşitlik 3.15’te gösterilmektedir.

$$J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + B \cdot \omega_m = T_e - T_l \quad (3.15)$$

Eşitlik 3.15’te ifade edilen J rotorun eylemsizlik katsayısı (kg.m^2), B sürtünme katsayısı (N.m/rad/sn), T_l rotora uygulanan yükü (N.m) temsil etmektedir. Eşitlik 3.16 rotor açısı, rotor dönüş hızı ve stator kutup çifti sayısı arasındaki ilişkiyi vermektedir.

$$\frac{d\theta_r}{dt} = P \cdot \omega_m \quad (3.16)$$

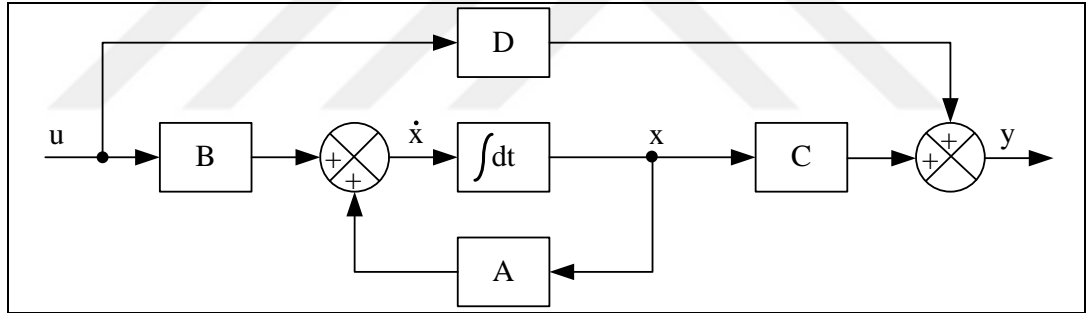
Eşitlik 3.16’da P stator kutup çifti sayısını temsil etmektedir.

3.5.2. TİEM Uzak Durum Denklemlerinin Çıkarılması

Mühendislikte matematiksel ifadelerin karmaşık olması, çoklu giriş, çoklu çıkış denklemlerinin oluşması, zamanla değişen değişkenlerin olması uzak durum denklemlerinin kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir. Uzak durum denklemini yazabilmek için matematiksel denklemlerin Eşitlik 3.17'ye benzetilmesi gerekmektedir. Eşitlik 3.17'de x durum vektörü, \dot{x} durum vektörünün türevi, u giriş vektörünü ifade etmektedir. A durum matrisi, B ise giriş matrisidir. Eşitlik 3.18'de y çıkış vektörü, C çıkış matrisi, D ileri besleme matrisini temsil etmektedir. Uzak durum denklemleri blok diyagramı Şekil 3.15'te gösterilmektedir.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.17)$$

$$y = Cx + Du \quad (3.18)$$



Şekil 3.15. Uzak durum denklemleri blok diyagramı.

Eşitlik 3.13, Eşitlik 3.12'de yerine yazılır, Eşitlik 3.14, Eşitlik 3.15'te yerine yazılır ve Eşitlik 3.16'da dahil edilip, Eşitlik 3.17'ye benzetilirse sonuç Eşitlik 3.19- 3.22'deki gibi olur. TİEM için C matrisi Eşitlik 3.23'teki gibi birim matris olarak kullanılmaktadır. D matrisi ise Eşitlik 3.24'te gösterilen sıfır matrisi olarak seçilerek $y = x$ elde edilmektedir.

$$x = [i_a \quad i_b \quad i_c \quad \omega_m \quad \theta_r]^T \quad (3.19)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L-M} & 0 & 0 & -\frac{\delta_m}{L-M} \cdot \varphi_a(\theta) & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L-M} & 0 & -\frac{\delta_m}{L-M} \cdot \varphi_b(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_s}{L-M} & -\frac{\delta_m}{L-M} \cdot \varphi_c(\theta) & 0 \\ \frac{\delta_m}{J} \cdot \varphi_a(\theta) & \frac{\delta_m}{J} \cdot \varphi_b(\theta) & \frac{\delta_m}{J} \cdot \varphi_c(\theta) & -\frac{B}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{P}{2} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$u = [V_{an} \quad V_{bn} \quad V_{cn} \quad T_l]^T \quad (3.21)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L-M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L-M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L-M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

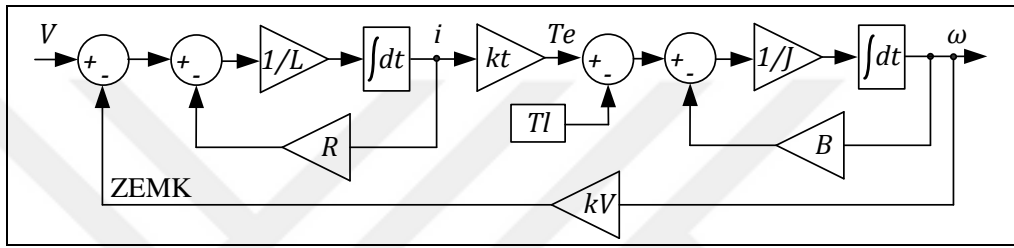
$$D = [0] \quad (3.24)$$

3.5.3. MATLAB/Simulink ile TİEM Modellemesi

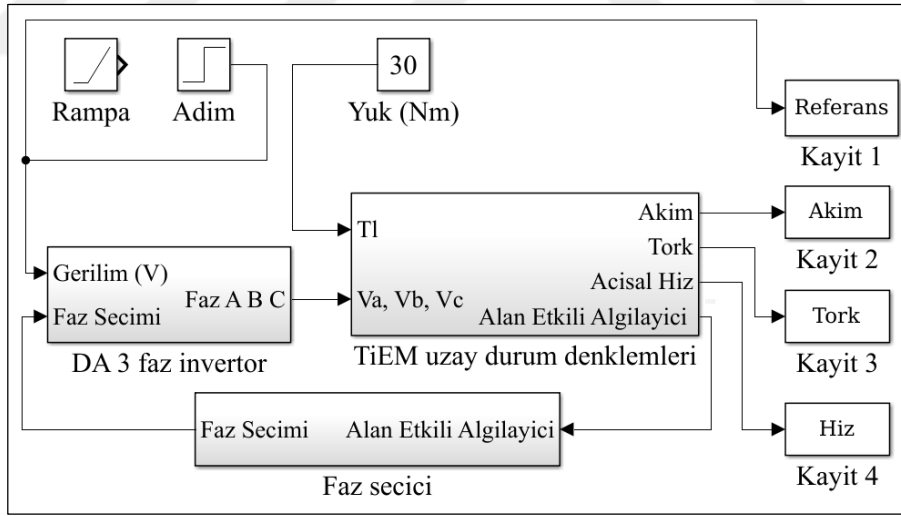
TİEM matematiksel modelinin oluşturulması için MATLAB/Simulink programı kullanılmaktadır. TİEM matematiksel model doğruluğunun tespit edilebilmesi için MATLAB/Simulink Simpower araç kutusu içerisindeki hazır model olan sabit mıknatıslı senkron makine ile karşılaştırılmaktadır. TİEM blok diyagramı Şekil 3.16'da verilmektedir. TİEM blok diyagramı içerisinde akımı elektromanyetik torka çeviren kt çarpanı bulunmaktadır. Bu çarpan Eşitlik 3.13, Eşitlik 3.14'te yerine yazılarak elde edilir. Açısal hız değerini ZEMK'ya çeviren kV çarpanı Eşitlik 3.13'te verilmektedir.

Modellenen TİEM, DA 3 faz invertör ile birlikte Şekil 3.17'de gösterilmektedir. DA

3 faz invertör bloğu içerisinde Şekil 3.5'te verilen 3 yarım H köprü bulunmaktadır. Giriş gerilimine sırasıyla adım ve rampa fonksiyonları uygulanarak çıkış akımı, tork, ve açısal hız değerleri kayıt edilmektedir. Açısal hız değeri TİEM tekerlek çapı hesaba katılarak km/sa olarak düzenlenmektedir. TİEM uzay durum denklemleri içerisinde Eşitlik 3.19-3.22' den türetilmiş matematiksel denklemler bulunmaktadır. TİEM uzay durum denklemleri bloğu yapı itibariyle Şekil 3.16'da verilen TİEM blok diyagramına benzemektedir. TİEM 30 N.m sabit giriş yükü ile yüklenmektedir. Faz seçici blok, TİEM rotor konumu ile hangi fazların tetikleneceği seçmektedir.



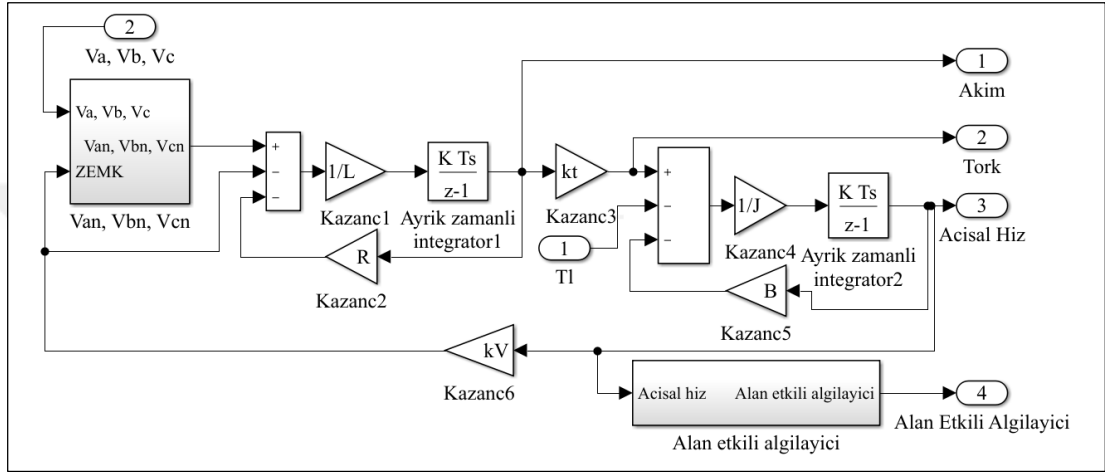
Şekil 3.16. TİEM blok diyagramı.



Şekil 3.17. TİEM matematiksel modeli.

Giriş gerilimine sırayla adım ve rampa fonksiyonları uygulanarak çıkışlar incelenmektedir. Adım fonksiyonu beşinci saniyeye kadar 0 V, beşinci saniyeden sonra 48 V olmaktadır. Rampa fonksiyonu üçüncü saniyeye kadar 0 V üçüncü saniyeden altıncı saniyeye kadar sabit eğimle 48 V'a kadar çıkmakta ve 48 V'ta sabit kalmaktadır. Giriş fonksiyonları DA 3 faz invertör bloğuna uygulanmaktadır.

TİEM uzay durum denklemleri bloğu Şekil 3.18’de verilmektedir. DA 3 faz invertör çıkışından gelen giriş gerilimi Eşitlik 3.3-3.6’da gösterildiği gibi ZEMK ile işleme sokularak faz bağlantı ucuyla yıldız bağlı olan TİEM fazlarının orta bağlantı noktası (V_n) arasındaki gerilim elde edilmektedir. TİEM faz çıkış akımları Eşitlik 3.17–3.22 denklemlerinden yararlanılarak Şekil 3.18’de olduğu gibi oluşturulmaktadır. Faz çıkış akımları kt sabiti ile çarpılarak TİEM elektromanyetik tork bulunmaktadır.

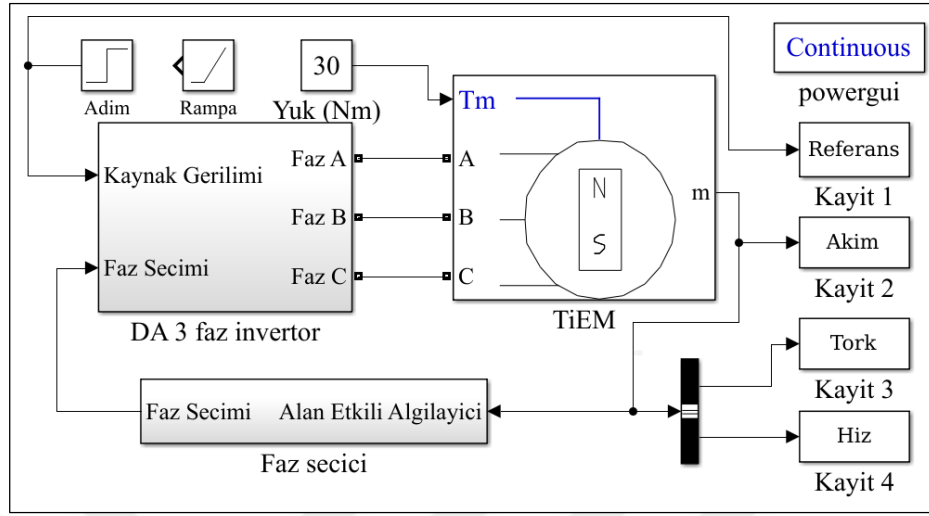


Şekil 3.18. TİEM uzay durum denklemleri bloğu.

TİEM açısız hızı elde edilirken Eşitlik 3.17–3.22 uzay durum denklemlerinden yararlanılmaktadır. Açısız hız ile kV sabiti çarpılarak ZEMK bulunmaktadır. Açısız hız değeri alan etkili algılayıcıyı bloğuna girilmektedir. Bu blok içerisinde açısız hız bilgisi ile rotor açısı bulunmakta ve alan etki algılayıcıların çıkış sinyalleri elde edilmektedir.

Modellenen TİEM’in doğrulaması için MATLAB/Simulink Simpower araç kutusundan alınan hazır sabit mıknatıslı senkron makine Şekil 3.19’deki gibi kullanılmaktadır. Giriş gerilim fonksiyonları ve faz seçici blok TİEM matematiksel modelinde kullanılanlar ile aynıdır. DA 3 faz invertör çıkışının Simpower araç kutusundan alınan hazır modelde kullanılabilmesi için kontrollü gerilim kaynağı ile hazır modele uygulanması gerekmektedir. Yapılan bu uygunlaştırmanın dışında DA 3 faz invertör bloğu TİEM matematiksel modelde kullanılanın aynıdır. TİEM matematiksel modeli ve TİEM MATLAB/Simulink hazır modeli için kullanılan parametreler Çizelge 3.3’te verilmektedir. Bu parametreler aynı zamanda deneysel

çalışmada kullanılan TİEM parametreleridir.



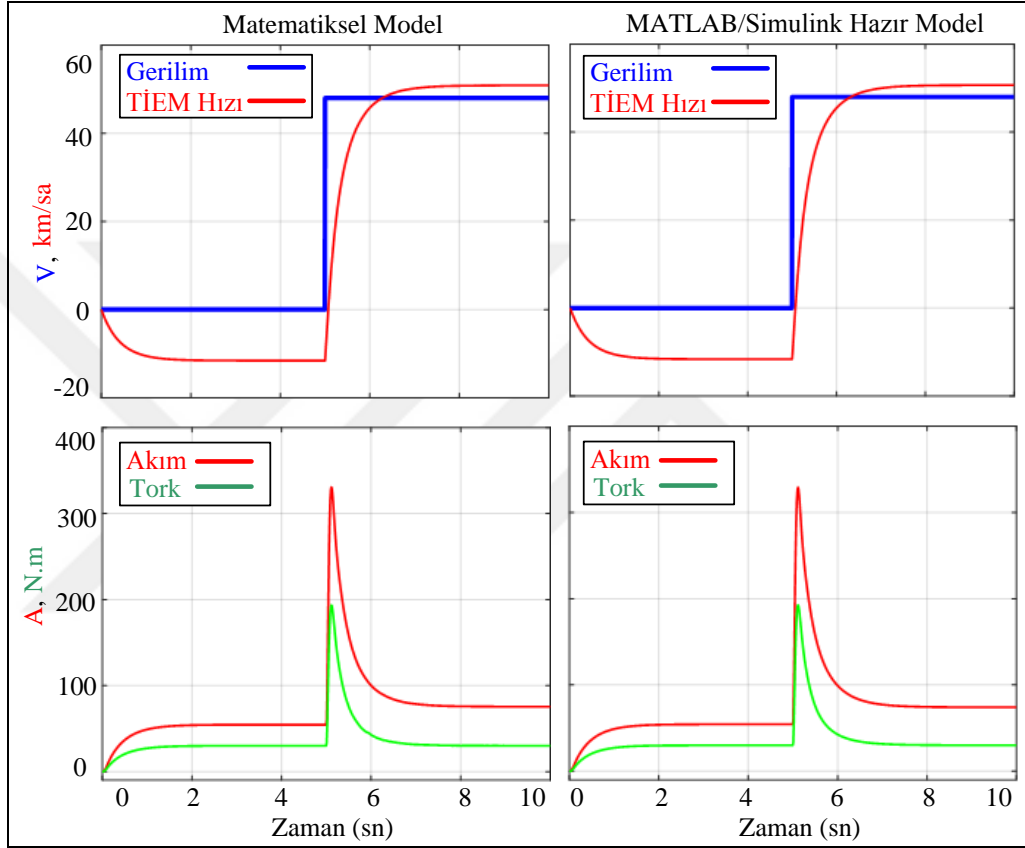
Şekil 3.19. MATLAB/Simulink kullanılarak gerçekleştirilen model.

Çizelge 3.3. Matematiksel ve hazır model için kullanılan TİEM parametreleri.

TİEM Parametreleri	Parametre Değerleri	Parametre Birimleri
Faz İç Direnci (R)	75,7	mΩ
Faz İndüktans (L)	44	μH
Elektromanyetik Tork Sabiti (kt)	0,59	N.m/A
ZEMK Sabiti (kV)	0,59	V/(rad/sn)
Rotor Eylemsizlik Katsayısı (J)	1	kg.m ²
Sürtünme Katsayısı (B)	0,001	N.m/(rad/sn)
Kutup Çifti (p)	28	-
ZEMK Derecesi ve Şekli	120° yamuk	-
Uygulanan Yük (Tl)	30	N.m

TİEM matematiksel model ve TİEM MATLAB/Simulink hazır model girişlerine adım ve rampa fonksiyonu uygulanarak TİEM hızı, akım ve tork çıkışları elde edilmektedir. Adım fonksiyonu için TİEM matematiksel model ve TİEM MATLAB/Simulink hazır model giriş gerilimi, TİEM rotor hızı, kaynaktan çekilen akım ve TİEM elektromanyetik tork cevabı Şekil 3.20’de verilmektedir. TİEM 30 N.m tork ile yüklendiği ve giriş gerilimi sıfır olduğu için beşinci saniyeye kadar TİEM ters yöne dönmektedir. Akım ile tork arasında katsayı ilişkisi olduğu için beşinci saniyeye kadar akım 53 A değerine ulaşmaktadır. Beşinci saniyede 48 V gerilim uygulanmakta ve

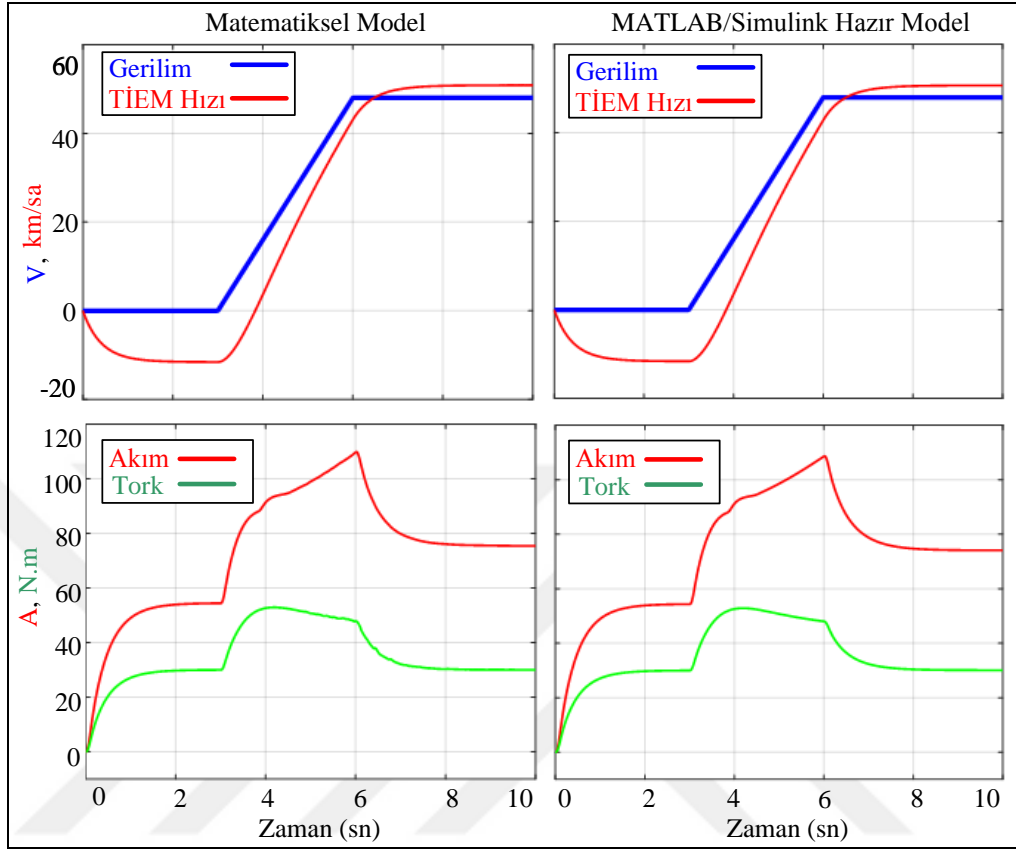
TİEM çıkış hızının 50,7 km/sa hıza ulaştığı görülmektedir. Akım ise adım fonksiyonunun ani gerilim artışına paralel 317 A değerine çıktığı, elektromanyetik tork 190 N.m değerine ulaştığı görülmektedir. İvmelenmenin sona erdiği motor hızının sabitlendiği sekizinci saniyede akım 78 A ve elektromanyetik tork 30 N.m değerlerine sabitlenmektedir.



Şekil 3.20. TİEM matematiksel model ve TİEM MATLAB/Simulink hazır model adım fonksiyonu cevap grafikleri.

Rampa fonksiyonu için TİEM matematiksel model ve TİEM MATLAB/Simulink hazır model giriş gerilimi, TİEM rotor hızı, kaynaktan çekilen akım ve TİEM elektromanyetik tork cevabı Şekil 3.21’de verilmektedir. TİEM 30 N.m tork ile yüklendiği ve giriş gerilimi sıfır olduğu için üçüncü saniyeye kadar TİEM ters yöne dönmektedir. Akım ile tork arasında katsayı ilişkisi olduğu için üçüncü saniyeye kadar akım 53 A değerine ulaşmaktadır. Üçüncü saniyeden altıncı saniyeye kadar TİEM çıkış hızının 50,7 km/sa hıza ulaştığı görülmektedir. Akım 110 A değerine çıkarken, elektromanyetik tork 52 N.m değerine ulaştığı görülmektedir. İvmelenmenin sona erdiği motor hızının sabitlendiği sekizinci saniyede akım 78 A ve elektromanyetik tork

30 N.m değerlerine sabitlenmektedir.



Şekil 3.21. TIEM matematiksel model ve TIEM MATLAB/Simulink hazır model rampa fonksiyonu cevap grafikleri.

Giriş gerilimine adım ve rampa fonksiyonları uygulanan TIEM matematiksel modeli ve TIEM MATLAB/Simulink hazır modeli çıkış grafikleri hız, akım ve tork olarak birbirlerinin aynısı olduğu görülmektedir. Aynı eksenli grafiklerin farkları alındığında sonucun sıfır çıktığı görülmektedir. Sonucun sıfır çıkması TIEM matematiksel model ile TIEM MATLAB/Simulink hazır modelin aynı olduğu ve TIEM matematiksel modelin doğru modellendiği sonucu çıkarılmaktadır.

BÖLÜM 4

DENETİM YÖNTEMLERİ

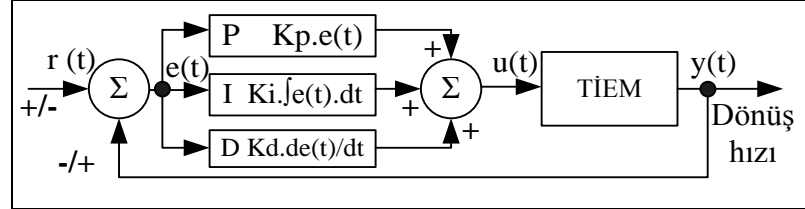
TİEM normal sürülürken ve rejeneratif frenleme sırasında hız kontrolü yapılarak TİEM hızının istenilen referans hıza sabitlenmesi istenmektedir. Hız kontrolünün yapılabilmesi için kapalı çevrim, geri beslemeli bir sistemin kullanılması gerekmektedir. TİEM normal sürülürken veya rejeneratif frenleme yapılırken referans hız TİEM dönüş hızından az ya da fazla olabilir. TİEM normal sürülürken, referans hız değerinden $(r(t))$ TİEM hızı $(y(t))$ çıkarılarak hata $(e(t))$ elde edilmektedir. TİEM rejeneratif frenleme yaparken, TİEM hızından $(y(t))$ referans hız $(r(t))$ değeri çıkarılarak hata $(e(t))$ değeri bulunmaktadır. Çıkışın referansa olan uzaklığını hata göstermektedir. Bu hata değeri bir denetim yönteminin girişine uygulanır. Denetim yönteminin çıkışı TİEM hızını istenilen referans değere getirmesi beklenmektedir. TİEM normal sürülürken PID ve BM denetleyici yöntemleri ile hız kontrolü yapılabilmektedir. TİEM rejeneratif frenleme yaparken hız kontrolünün yapılabilmesi için PID ve BM denetleyici yöntemleri kullanılmaktadır.

4.1. PID DENETLEYİCİ

PID denetleyici endüstride çok sık kullanılan denetleme yöntemlerinden biridir. TİEM hız kontrolü için PID denetleyici kullanılabilir ve uygulanabilir bir yöntemdir [3, 9–11, 34]. PID denetleyici kapalı döngü bir denetim sistemidir. Referans ile geri besleme değerinin farkı alınarak elde edilen hata sonucunu matematiksel işlemlerden geçirilerek sonuç üretmektedir.

PID denetleyicinin içerisinde oransal, integral ve türev olmak üzere üç adet matematiksel işlem yapılmaktadır. Bu işlemlerin sonuçları toplanarak çıkış elde edilmektedir. İstenilirse P, PI, PD veya PID denetleyici olarak konfigürasyonlar yapılabilmektedir. Bu bölümde TİEM hız kontrolünün yapıldığı düşünülerek, en fazla

işlemin olduğu PID denetleyici ele alınmaktadır. P, I ve D işlemlerinin çıkışa aynı oranda etki etmesi istenmediği için K_p , K_i ve K_d katsayıları ile çarpılarak işleme dahil edilirler. PID blok şeması Şekil 4.1’de verilmektedir. PID matematiksel ifadesi Eşitlik 4.1’de verilmektedir [3, 9–11, 34].



Şekil 4.1. PID denetleyici blok şeması.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) \cdot dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (4.1)$$

K_p katsayısının artırılması oransal etkiyi arttırmaktadır. Tek başına kullanılması halinde TIEM hızı, referans değere yaklaşır fakat tam olarak ulaşamaz ve kalıcı durum hatası meydana gelir. Çünkü hata çıkışı sıfır olduğu anda oransal denetleyici çıkış üretmeyecektir. Bir başka ifadeyle çıkış, hatanın varlığına göre çalışmaktadır.

K_i katsayısının artırılması integral etkiyi arttırmaktadır ve geçmişteki hata değerlerini toplayarak çalışmaktadır. İntegral zaman içerisinde kalıcı durum hatasını sıfıra indirerek referans hıza ulaşmayı sağlamaktadır. Hata değeri sıfıra inene kadar referans değerini aşabilir ve sönümlenen salınımlar görülebilir. Eğer sistemde referans değer üzerine sönümlenen bir salınım varsa K_i katsayısının artmasıyla salınım daha da büyür ancak sistemin oturma zamanı azalır. Hatanın sıfıra inmesi oransal etkiyi azaltır ancak integralin artması çıkışı referans değerinde sabit tutmaktadır.

K_d katsayısının artması türevsel etkiyi arttırmaktadır ve gelecek hata eğimleri hesaplanarak çıkış üretmektedir. Sistem çıkışının hızlı değişimi türevsel etkiyi arttırmaktadır. K_d değerinin artırılması salınımı ve taşmayı azaltmaktadır. PID parametrelerinin sisteme etkileri Çizelge 4.1’de verilmektedir. K_p , K_i ve K_d katsayı değerleri deneysel yöntemlerle tespit edilebilir. Sistemde oluşan bozucu etki ya da şartların değiştirilmesi durumunda daha önceden bulunan katsayıların etkisi

azalabilmektedir. Bu tip bir durumda yeniden katsayı bulunması gerekebilir. Bu katsayıların bulunması için çok sayıda yöntem geliştirilmiştir.

Çizelge 4.1. PID parametrelerinin sisteme etkileri.

Artan Parametre	Yükselme Zamanı	Taşma	Oturma Zamanı	Kalıcı Durum Hatası
Kp	Azalır	Artar	Değişim az olur	Azalır
Ki	Azalır	Artar	Artar	Sıfıra indirir
Kd	Değişim az olur	Azalır	Azalır	Etkisi yoktur

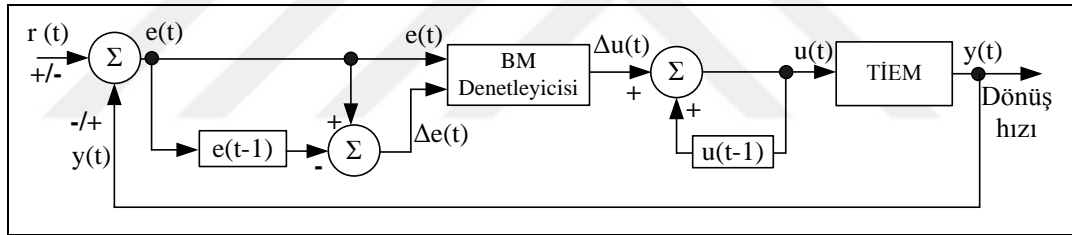
Ziegler Nichols yönteminde olduğu gibi sistem girişine belirli girişler uygulayarak çıkıştan elde edilen bilginin işlenmesiyle hesaplanabilmektedir [95]. BM ya da yapay zeka algoritmalarıyla katsayılar bulunabilmektedir [96]. Sistemin çalışma süresi boyunca katsayıların sürekli güncellendiği algoritmalar da kullanılmaktadır [97].

4.2. BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ

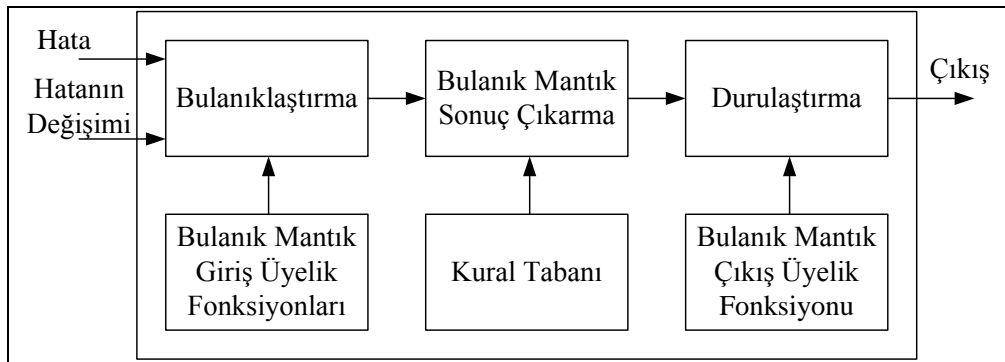
BM denetleyicinin kullanım alanı oldukça geniştir. Metro işleyişi, kamera görüntü odaklaması, klima, çamaşır makinesi, asansör, trafik lambaları, karakter tanıma, nesne tanıma gibi alanlarda kullanılmaktadır. BM denetleyici motor ve TİEM kontrolü için de doğru ve kullanışlı bir yöntemdir [16, 18, 32–36].

BM fikri ilk olarak 1965 yılında Prof. Lotfi A. Zadeh'in yayınladığı ilk makale ile ortaya çıkmıştır [98]. Japonya, Kore, Singapur ve Malezya gibi ülkelerde hızla yayılmıştır. Mamdani ve Assilian tarafından bir buhar makinesi BM denetleyici ile 1975 yılında kontrol edilmiştir [99]. BM ticari olarak ilk defa Danimarka'da bir çimento fabrikasında 1980 yılında kullanılmıştır [100]. BM belirsizliklerin tanımlanması ve belirsizliklerle çalışabilen matematiksel işlemler olarak tanımlanabilir. Dilsel değişkenler olan çok kötü, kötü, normal, iyi, çok iyi gibi tanımlamalar BM içerisinde kümeler şeklinde ifade edilmektedir. Klasik mantık içerisinde doğru ve yanlışın arasında bir geçiş yoktur. Sonuç 1 ve 0 ile ifade edilmektedir. BM ise 0 ile 1 arasında çalışabilmektedir ve ara değerlerle çalışmaktadır.

TİEM'in BM denetleyici ile kontrol edilebildiği yapılan çalışmalarla ortaya konulmaktadır [10–14, 34, 36, 39, 48]. Şekil 4.2'de TİEM kontrolü için BM denetleyici blok şeması verilmektedir. TİEM için hazırlanan BM denetleyici hata ve hatanın değişimi ile sonuç üretmektedir. TİEM normal sürülürken referansın $r(t)$ TİEM dönüş hızından $y(t)$ çıkarılmasıyla hata elde edilmektedir. TİEM rejeneratif frenlenirken TİEM dönüş hızından $y(t)$ referansın $r(t)$ çıkarılmasıyla hata elde edilmektedir. Hatanın türevinin alınmasıyla hatanın değişimi ($\Delta e(t)$) elde edilmektedir. Hatanın türevinin alınması için hata ($e(t)$), bir önceki hata ($e(t-1)$) değerinden çıkarılmaktadır. BM denetleyici Şekil 4.3'te gösterildiği gibi çıkış değişimi ($\Delta u(t)$) ile sonuç üretmektedir. Hata ve hatanın değişimi BM giriş üyelik fonksiyonları ile bulanıklaştırılır. BM kural tabanı ile sonuç çıkarılır ve BM çıkış üyelik fonksiyonları ile durulaştırma yapılarak çıkış değişimi ($\Delta u(t)$) üretilir. Çıkış değişimi ($\Delta u(t)$) bir önceki çıkış ($u(t-1)$) ile toplatılarak çıkış ($u(t)$) değeri elde edilir ve TİEM kontrol edilir.



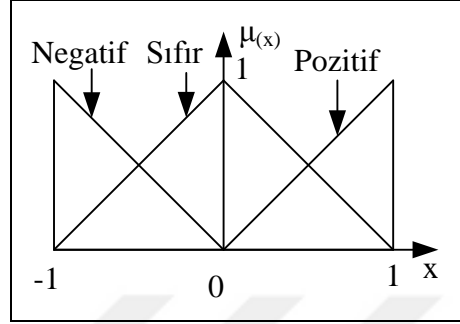
Şekil 4.2. TİEM kontrolü için BM denetleyici blok şeması.



Şekil 4.3. BM denetleyici çalışma şeması.

TİEM kontrolünün kolay anlaşılabilmesi için üç adet üyelik fonksiyonlu girişler ve çıkış için örnek BM denetleyici kural tabanı hazırlanmaktadır. Hata, hatanın değişimi

ve çıkış değişimi için üyelik fonksiyonları oluşturulur. BM girişler ve çıkış için kullanılan örnek üyelik fonksiyonu Şekil 4.4'te verilmektedir. Üyelik fonksiyonları negatif (N), sıfır (S) ve pozitif (P) olarak belirlenmektedir. BM girişine gelen hata ve hatanın değişimi önce üyelik fonksiyonları kullanılarak bulanıklaştırılır.



Şekil 4.4. BM girişler ve çıkış için örnek üyelik fonksiyonları.

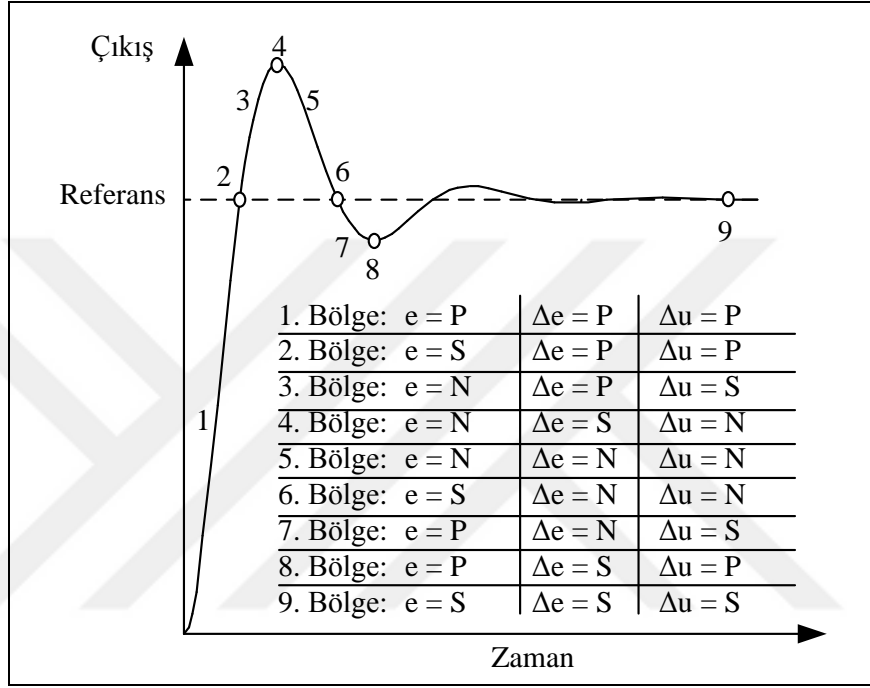
Daha sonra BM, kural tabanını kullanarak sonuç çıkarır. Üçer adet giriş üyelik fonksiyonu olduğu için Çizelge 4.2'de gösterildiği gibi $3 \times 3 = 9$ adet örnek kural yazılması gerekmektedir. TİEM ikinci dereceden denklem karakteristiğine sahiptir. TİEM kural tabanının çıkarılması için Şekil 4.5'teki ikinci dereceden sistem çıkışı kullanılır. Sistem çıkışı dokuz adet bölgeye ayrılır. Hata ve hatanın değişimine göre çıkış değişimi belirlenir. Kurallar bu şekilde belirlendiğinde TİEM çıkışı referans için belirlenen değere ulaşmaktadır.

Çizelge 4.2. TİEM kontrol için örnek BM örnek kural tabanı.

$e(t)$ / $\Delta e(t)$	N	S	P
N	N	N	S
S	N	S	P
P	S	P	P

BM'da geleneksel mantıkta olduğu gibi bazı mantık işlemleri yer almaktadır. Ancak bu işlemin komutları AND, OR, NOT ve IF, THEN (VE, VEYA, DEĞİL, EĞER, ÖYLEYSE) ile sınırlı çok basit ve aynı zamanda da kullanışlıdır. Bu kurallar bütününe kurallar ya da BM denetleyici üzerinde kural tabanı denir. Eğer değişkenler arasında

VE (AND) kullanılmış ise buna bağlı olarak ortaya çıkacak fonksiyon minimum değer olacaktır. Yani, $\mu((N) \text{ VE } (S)) = \min(\mu(N), \mu(S))$ 'dir. Değişkenler arasında kullanılan bağlaç VEYA (OR) ise fonksiyonu, $\mu((N) \text{ VEYA } (S)) = \max(\mu(N), \mu(S))$ olacaktır. Fonksiyonda kullanılan DEĞİL (NOT) işlemi ise $\mu(\text{DEĞİL } (N)) = 1 - \mu(N)$ anlamına gelmektedir. Buradaki tüm μ değerleri, $0 \leq f \leq 1$ şeklinde olacaktır.



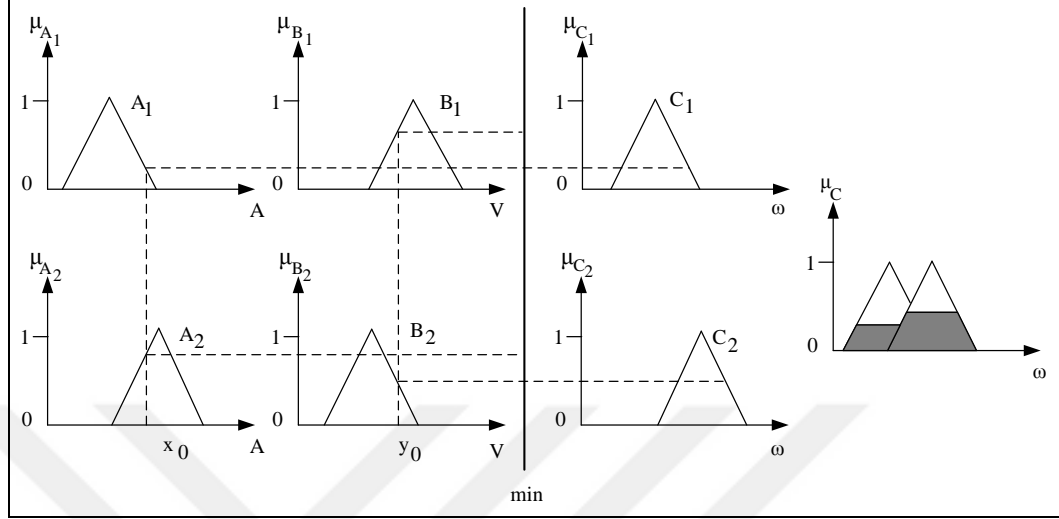
Şekil 4.5. TİEM kontrol için örnek BM örnek kural tabanı çıkarılması.

Şekil 4.6'da kesin giriş x_0 ve y_0 değerleri için max-min yöntemi ile yapılan bulanık çıkarım görülmektedir. Burada A ve B girişi C ise çıkışı temsil etmektedir. μ_A , μ_B ve μ_C üyelik derecelerini temsil etmektedir.

BM ile yaygın olarak kullanılan başlıca modellemeler; Mamdani ve Sugeno tipi bulanık modellemelerdir. Mamdani tipi bulanık model çok kolay oluşturulur, insan davranışlarına çok uygundur [99]. Bu nedenle çok yaygın bir kullanıma sahiptir ve diğer BM modellerin temelini oluşturur.

Sugeno BM ilk kez 1985 yılında kullanılmaya başlanmıştır [101]. Mamdani BM yönteminin bir uyarlamasıdır. Girdi değişkenlerinin bulanıklaştırılması ve BM

işlemleri Mamdani bulanık modelleme ile tamamen aynıdır. İki yöntem arasındaki fark çıktı üyelik fonksiyonlarıdır.



Şekil 4.6. Max-min yöntemi ile bulanık çıkarım.

Sugeno tipi bulanık modellemede çıktı üyelik fonksiyonları sadece lineer ya da sabittir. Çıktı üyelik fonksiyonları sabit olduğu zaman, sıfıncı derece, birinci derece doğru denklemi şeklinde olduğu zaman ise birinci derece Sugeno bulanık model olarak adlandırılırlar. Böylece Sugeno tipi bulanık model, Mamdani tipi bulanık modelden daha karmaşık ve gösterim açısından daha elverişlidir. Bu nedenle Sugeno tipi bulanık model uyarlanabilir tekniklerle birlikte kullanılabilir. Sugeno tipi bulanık model hesaplama için çok uygundur, optimizasyon ve uyarlanabilir tekniklerle birlikte iyi çalışır ve çıktı parametrelerini optimize ederek sonuçları iyileştirir, çıktı uzayında sürekliliği garantiler, matematiksel analiz için uygundur.

Sugeno tipi bulanık modelin dezavantajları da vardır. Yüksek derecedeki Sugeno bulanık modelleme kullanıldığında oldukça karmaşık bir yapıya sahip olur, girdi ve alt küme sayılarının artması verilerin eğitilmesini zorlaştırır, sonuçların elde edilmesi için belirlenmesi gereken soncul parametrelerin sayısı artar, insan sezgilerine çok uygun değildir.

Bulanık küme çıkarımlarının, sistem üzerinde uygulanabilmesi için yeniden fiziksel ve kesin sayılara dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu işleme durulaştırma adı verilir.

Bunun için çeşitli durumlara göre durulama yöntemleri geliştirilmiştir. Bulanık işlemciden elde edilen mantıksal çıkarımların üyelik işlevleri, bir ya da birden fazla olabilir. Bulanık çıkarım bu kümelerin bileşkesi olacaktır.

PID denetleyici parametreleri doğru ayarlanırsa çok iyi performans göstermektedir. Ancak değişen yük miktarı veya farklı referans olduğunda PID'nin sınırlılıkları ortaya çıkmaktadır. BM denetleyici çıkışı hiçbir zaman parametreleri mükemmel ayarlanmış PID denetleyici gibi sonuç vermeyecektir. PID denetleyiciye yaklaşmak için üyelik fonksiyonları arttırılabilir ya da PID parametrelerinin BM ile sürekli güncellendiği denetleyiciler kullanılabilir.



BÖLÜM 5

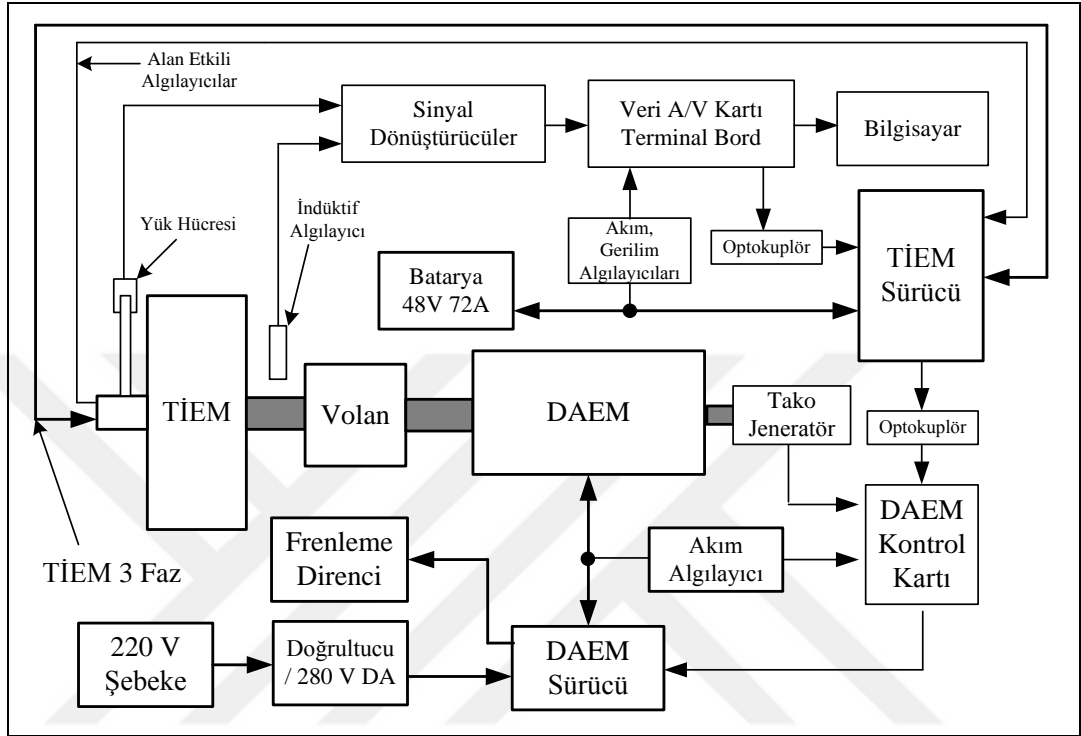
TEST DÜZENEĞİ TASARIMI

TİEM ile sürüş çevrim hız denemeleri yapabilmek için bir test düzeneği tasarlanmaktadır [102]. Tasarlanan test düzeneği TİEM normal sürme ve rejeneratif frenlemeye imkan vermektedir. Test düzeneği ile farklı sürüş çevrim hız referansları, PID ve BM denetleyiciler ile deneyler yapılabilmektedir. Test düzeneğinde kullanılan materyaller ile MATLAB/Simulink'te oluşturulan model gömülü sistem olarak çalışabilmektedir. Bu sayede sürüş çevrim hız referansları, PID, BM denetleyici gibi bloklar MATLAB/Simulink ile oluşturulup gömülü sistem olarak kullanılmaktadır.

TİEM normal sürülürken yüklenmeli, TİEM rejeneratif frenleme yaparken tahrik edilmelidir. Bu olayın gerçekleşebilmesi için TİEM ile DAEM bir test düzeneği oluşturularak kuplajlanmaktadır. TİEM ve DAEM arasında başlangıç vurunusunun azaltılması için bir volan yerleştirilmektedir. TİEM, volan ve DAEM her iki tarafından yataklı rulmanlar ile test düzeneğine sabitlenmektedir. TİEM, volan ve DAEM arasındaki bağlantılar kaplinler ile gerçekleştirilmektedir. Test düzeneğinin blok diyagramı Şekil 5.1'de verilmektedir.

TİEM normal sürülürken DAEM jeneratör olarak çalışmaktadır ve DAEM'in ürettiği enerji frenleme direnci üzerinden harcanmaktadır. Frenleme direnci üzerinde harcanan enerji tork referanslı olarak kontrol edilmektedir. Bu sayede TİEM sabit tork altında yüklenebilmektedir. TİEM rejeneratif frenleme yaparken DAEM motor olarak çalışmaktadır. DAEM motor olarak çalışırken 280 V DA gerilimi ile beslenmekte ve tork referanslı kontrol edilmektedir. DAEM tork referanslı olarak kontrol edildiği için TİEM sabit tork ile rejeneratif frenleme yapabilmektedir. Tork kontrolü yapabilmek için DAEM üzerinden geçen akım, DAEM dönüş hızı, bir akım algılayıcısı ve bir tako jeneratör ile DAEM kontrol kartına aktarılmaktadır.

TİEM normal sürülürken enerji TİEM sürücü üzerinden bataryadan çekilmektedir. TİEM rejeneratif frenleme yaparken enerjiyi TİEM sürücü üzerinden bataryada depolamaktadır.



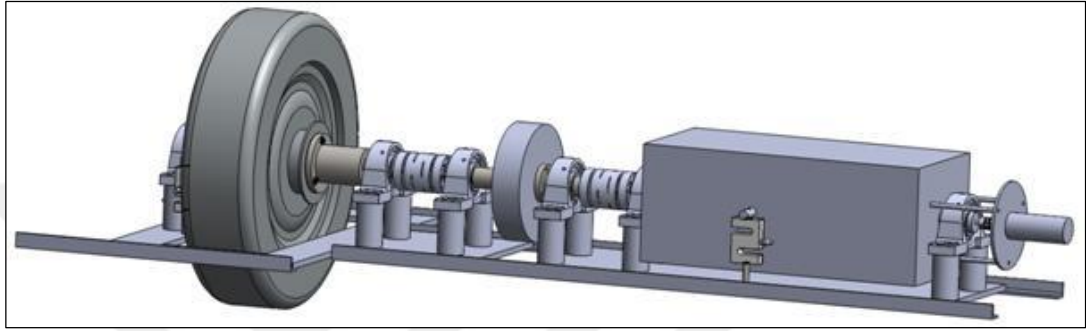
Şekil 5.1. Test düzeneği blok diyagramı.

TİEM ile deney yaparken batarya akımı, batarya gerilimi, sistem dönüş hızı ve TİEM torku ölçülerek bir veri alış verişi kartı vasıtasıyla bilgisayar ortamına gerçek zamanlı olarak gönderilmektedir. Batarya akımı ve batarya gerilimi, bir akım algılayıcısı ve bir gerilim algılayıcısı ile ölçülmektedir. Sistem dönüş hızının ölçülmesi için bir indüktif algılayıcı ve frekans gerilim dönüştürücü, TİEM torkunun ölçülmesi için bir yük hücresi ve yük hücresi gerilim dönüştürücü kullanılmaktadır. Veri alış verişi kartından gelen bilgiler bilgisayar ortamında MATLAB/Simulink vasıtasıyla Workspace ekranına kayıt edilmektedir.

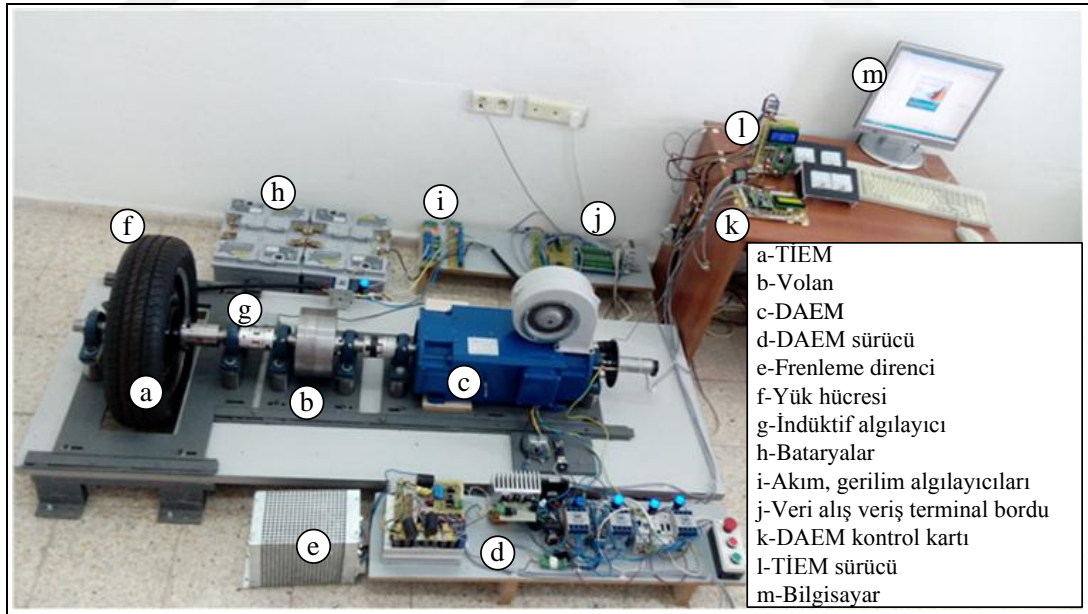
Yapılan kayıtların karşılaştırılabilmesi için deneylerin aynı anda başlaması gerekmektedir. Bunun için MATLAB/Simulink'ten veri alış verişi kartı ile gönderilen başlangıç sinyali TİEM sürücüyü aktarılmaktadır. Başlangıç sinyalini alan TİEM sürücü DAEM kontrol kartına başlangıç sinyalini göndermektedir. Veri alış verişi kartı

ile TİEM sürücü arasında ve TİEM sürücü ile DAEM kontrol kartı arasındaki başlangıç sinyalleri optokuplör vasıtası ile gönderilmektedir. Böylelikle bilgisayar, TİEM sürücü ve DAEM kontrol kartı birbirinden elektriksel olarak yalıtılmaktadır.

Test düzeneğinin bilgisayar ortamında hazırlanan tasarımı Şekil 5.2’de ve gerçek test düzeneği Şekil 5.3’te verilmektedir.



Şekil 5.2. Bilgisayar ortamında hazırlanan test düzeneği tasarımı.



Şekil 5.3. Test düzeneği görünümü.

TİEM için belirlenen ön test sürüş çevrim hız referansları ve standart sürüş çevrim hız referansları mevcuttur. Ön test sürüş çevrim hız referansları, sabit hız fonksiyonu, rampa fonksiyonu, merdiven fonksiyonudur. Standart sürüş hız referansları UDC ve

NEDC hız fonksiyonlarıdır. Hız referanslarının içerisinde TİEM'in ne zaman normal sürme ve ne zaman rejeneratif frenleme olarak çalışacağı bilgileri mevcuttur.

Sabit hız fonksiyonu ile TİEM normal sürme olarak çalışırken belirli bir süre sonunda rejeneratif frenlemeye geçiş sağlanmaktadır. Rampa fonksiyonu yükselirken TİEM normal sürme olarak çalışmaktadır, rampa fonksiyonu alçalırken TİEM rejeneratif frenleme yapmaktadır. Merdiven fonksiyonu artarken TİEM normal sürme olarak çalışmaktayken, merdiven fonksiyonu azalırken TİEM rejeneratif frenleme olarak çalışmaktadır. UDC ve NEDC sürüş çevrim hız referansları, hızlanma ve sabit hızda TİEM normal sürülürken yavaşlamalarda rejeneratif frenleme kullanılmaktadır.

5.1. KULLANILAN MATERYALLER

TİEM deney düzeneğinin kurulabilmesi için seçilen materyallerin birbirlerine ve amacına uygun olarak seçilmesi gerekmektedir. Materyal seçimi TİEM ile başlamaktadır. TİEM gücü, dönüş hızı ve torku hesaba katılarak diğer materyallerin özellikleri belirlenmektedir.

Test düzeneğinde kullanılan materyaller TİEM, TİEM sürücü, batarya, DAEM, DAEM kontrol kartı, frenleme direnci, DAEM sürücü, tako jeneratör, özel yapım malzemeler, veri alış veriş kartı, akım ve gerilim algılayıcıları, indüktif algılayıcı ve frekans gerilim çevirici, yük hücresi ve yük hücresi gerilim çeviricidir.

5.1.1. Tekerlek İçi Elektrik Makinesi

Tercih edilen TİEM Kelly Controller marka, 3000 W gücünde, 45 N.m torca sahiptir. TİEM 48 V gerilimle 800 dev/dk hızda dönebilmekte, 13 inç jant çapına, 26,54 cm tekerlek yarıçapına ve 110 mm jant genişliğine sahiptir.

Eşitlik 5.1-5.4'teki dinamik araç denklemlerinden, dört adet Kelly Controller TİEM ile yapılmış, toplam ağırlığı 370 kg olan bir elektrikli aracın düz yolda maksimum 70 km/sa hızla gidebildiği (Bir TİEM torku 14,12 N.m, TİEM hızı 700 dev/dk), yokuş

eğimi % 10 olan bir yolda ise 25 km/sa hıza çıkabildiği (Bir TİEM torku 43,7 N.m, TİEM hızı 250 dev/dk) hesaplanmaktadır.

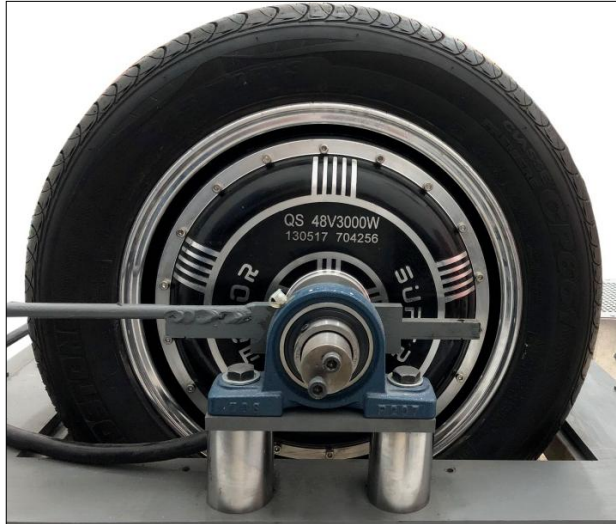
$$F_r = m \cdot f_r \quad (5.1)$$

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot U^2 \quad (5.2)$$

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (5.3)$$

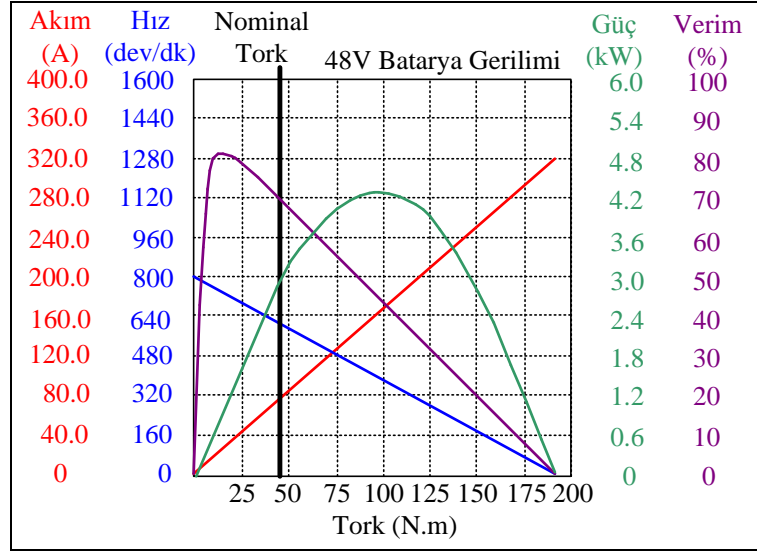
$$\text{TİEM Torku (N.m)} = (F_r + F_w + F_g) \cdot r \quad (5.4)$$

F_r (N) yuvarlanma direnci, m araç ağırlığı (370 kg), f_r yuvarlanma direnci katsayısı (0,2 N/kg), F_w araca etki eden aerodinamik sürtünme (N), ρ hava yoğunluğu (1,225.10⁻³ g/cm³), A_f araç n alanı (2 m²), C_D aerodinamik sürtünme katsayısı (0,3), U araç hızı (km/sa), F_g eğim direnci (N), g yer çekimi ivmesi (9,81 m/sn²), α eğim açısı, r TİEM tekerlek yarı çapını (0,2654 m) temsil etmektedir.



Şekil 5.4. Kelly Controller TİEM.

Şekil 5.4'te Test düzeneği üzerinde Kelly Controller TİEM gösterilmektedir. Şekil 5.5'te Kelly Controller TİEM performans grafiği verilmektedir. Kelly Controller TİEM parametreleri izelge 5.1'de verilmektedir.



Şekil 5.5. TIEM hız, giriş gücü, mekanik çıkış gücü grafiği.

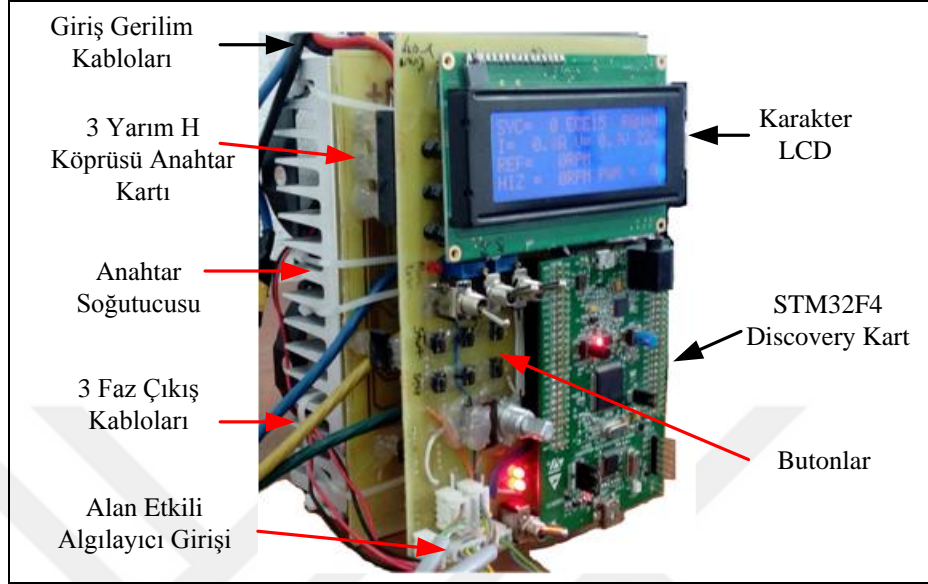
Çizelge 5.1. Kelly Controller TIEM parametreleri.

TIEM Parametreleri	Parametre Değerleri	Parametre Birimleri
Faz İç Direnci (R)	75,7	mΩ
Faz İndüktans (L)	44	μH
Tork Sabiti	0,59	N.m/A
Rotor Eylemsizlik Katsayısı (J)	1	kg.m ²
Sürtünme Katsayısı (B)	0,001	N.m/(rad/sn)
Kutup Çifti (p)	28	-

5.1.2. TIEM Sürücü

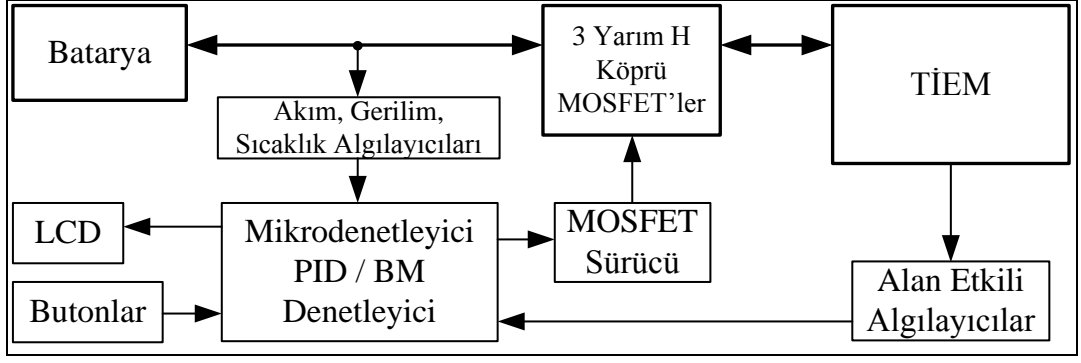
Test düzeneğinde kullanılan TIEM sürücü referans hızı değiştirebilmek, PID ve BM denetleyicileri deneyebilmek için özel olarak üretilmiştir. Özel olarak üretilen TIEM sürücü Şekil 5.6'da verilmektedir. Üzerinde MATLAB/Simulink üzerinden gömülü sistem çalışabilen STM32F4 Discovery kart bulunmaktadır. STM32F4 Discovery kart ile gömülü sistemin çalıştırılabilmesi için MATLAB/Simulink'e entegre edilebilen ve internette ücretsiz temin edilebilen Waijung araç kutusu yüklenmektedir. Gömülü sistem ile MATLAB/Simulink kullanarak kod kullanmaya gerek kalmadan bloklar ile sistem hazır olmaktadır. Blokların kullanım kolaylığının yanında BM, PID gibi denetleyicileri Simulink kütüphanesinden seçip kullanabilme olanağı sunulmaktadır.

Hazır kullanılan kütüphane ile hata yapma riski minimum seviyeye indirilmektedir. Eğer istenirse hazırlanan gömülü sistem benzetim ortamına aktarılabilir.



Şekil 5.6. TIEM sürücü.

TIEM sürücünün blok diyagramı ve TIEM ile bağlantı şeması Şekil 5.7’de verilmektedir. TIEM sürücü üzerinde 3 adet yarım H köprü bulunmaktadır. Her anahtarlama elemanı için paralel bağlı iki adet IRFP2907 MOSFET bulunmaktadır. IR2104 MOSFET sürücü entegreleri ile MOSFET’ler sürülmektedir. TIEM’den alınan alan etkili algılayıcı bilgisine göre doğru MOSFET’i tetikleyerek TIEM’e hareket kazandırmaktadır. TIEM sürücünün çalışma gerilimi 60 V, üzerinden geçebilecek maksimum akım 80 A’dır ve 4800 W gücünde TIEM sürebilmektedir. Deney düzeneğinde kullanılan TIEM’e uygun olarak imal edilmiştir. TIEM sürücü bataryadan çekilen akımı, batarya gerilimini, TIEM sürücü sıcaklığını ve TIEM dönüş hızını ölçebilmektedir. TIEM sürücü, kullanıcının belirlediği akım, gerilim ve sıcaklık değerlerinin üzerine çıkmamaktadır. Üzerinde bulunan karakter LCD ekran ile TIEM ile ilgili akım, gerilim, anlık güç, referans hız, TIEM hızı bilgileri görülebilmektedir. TIEM sürücü üzerindeki butonlar ile referans hızın elle kontrolü, başlatma, durdurma, normal sürme ve rejeneratif frenleme seçimleri yapılabilmektedir. TIEM normal sürme ve rejeneratif frenlemede DGM frekansı 16,6 kHz seçilmektedir. DGM frekansının belirlenmesinde orijinal TIEM sürücünün 16,6 kHz’de çalışması belirleyici olmaktadır.



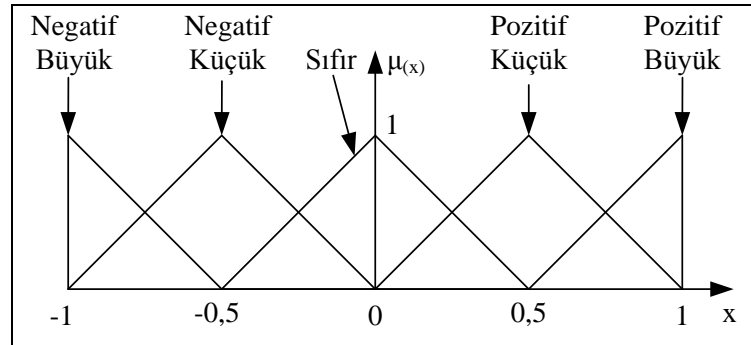
Şekil 5.7. TİEM sürücü ile TİEM bağlantı şeması.

Normal sürme ve rejeneratif frenleme deneylerinin yapılabilmesi için MATLAB/Simulink kütüphaneleri ile PID ve BM mantık denetleyicileri oluşturulmaktadır. PID denetleyici için seçilen K_p , K_i ve K_d parametreleri Çizelge 5.2'de verilmektedir.

Çizelge 5.2. TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme için kullanılan PID denetleyici parametreleri

PID	K_p	K_i	K_d
Parametre	0,15	1,4	0,05

TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme için Mamdani tipi BM denetleyicileri MATLAB/Fis editörü ile oluşturulmaktadır. Oluşturulan BM denetleyicilerinin girişleri hata (e), hatanın değişimi (Δe) ve çıkış değişimi (Δu) için Şekil 5.8'de verilen üyelik fonksiyonu kullanılmaktadır.



Şekil 5.8. TİEM normal sürme, TİEM rejeneratif frenleme, DAEM jeneratör ve DAEM motor için kullanılan BM denetleyici girişler ve çıkış üyelik fonksiyonu.

Üyelik fonksiyonları negatif büyük (NB), negatif küçük (NK), sıfır (S), pozitif küçük (PK) ve pozitif büyük (PB) olmak üzere 5 adettir. Girişler ve çıkış için belirlenen üyelik fonksiyonları için $5 \times 5 = 25$ kurallı bir kural tabanı oluşturulmalıdır. TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme için kullanılan BM denetleyici kural tabanı Çizelge 5.3'te verilmektedir.

Çizelge 5.3. TİEM normal sürme, TİEM rejeneratif frenleme, DAEM jeneratör ve DAEM motor için kullanılan BM denetleyici kural tabanı.

Δe \ e	NB	NK	S	PK	PB
NB	NB	NB	NB	NK	S
NK	NB	NB	NK	S	PK
S	NB	NK	S	PK	PB
PK	NK	S	PK	PB	PB
PB	S	PK	PB	PB	PB

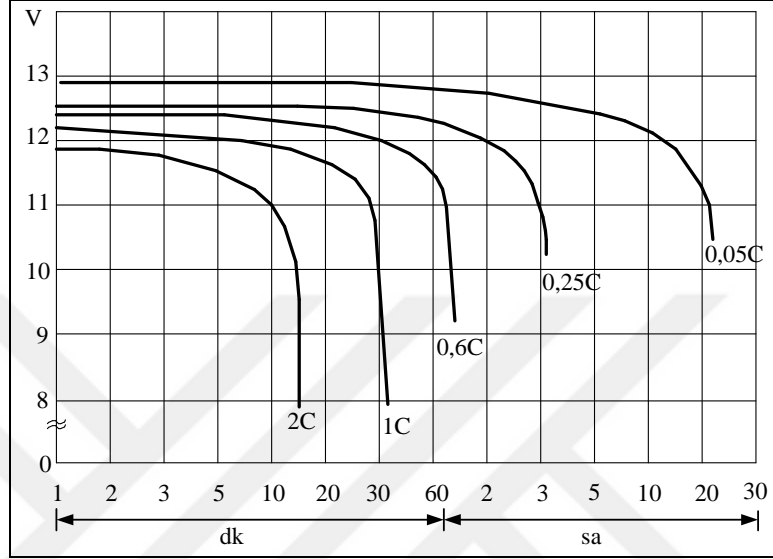
5.1.3. Batarya

Test düzeneğinde TİEM normal sürülürken enerjisini bataryadan almaktadır ve TİEM rejeneratif frenleme yaparken kazanılan enerji bataryada depolanmaktadır. Test düzeneğinde Şekil 5.9'da gösterilen Çelik marka, 12 V gerilim ve 72 A akım değerlerine sahip batarya kullanılmaktadır. Test düzeneğinde bu bataryadan dört adet seri bağlanarak kullanılmaktadır ve toplam 48 V gerilim ile TİEM sürücüyeye bağlantısı yapılmaktadır.



Şekil 5.9. Test düzeneğinde kullanılan batarya.

Kullanılan bataryanın çeşidi kurşun asittir ve deşarj grafiği Şekil 5.10'da verilmektedir. Grafikte belirtilen "C" değeri bataryanın üreticisinin üzerinde belirttiği kapasite değeridir. Kurşun asit batarya deşarj grafiğinde görüldüğü üzere bataryadan sürekli 72 A (1C) akım çekilmek istenirse batarya 35 dk içerisinde bitmektedir.



Şekil 5.10. Kurşun asit batarya deşarj grafiği.

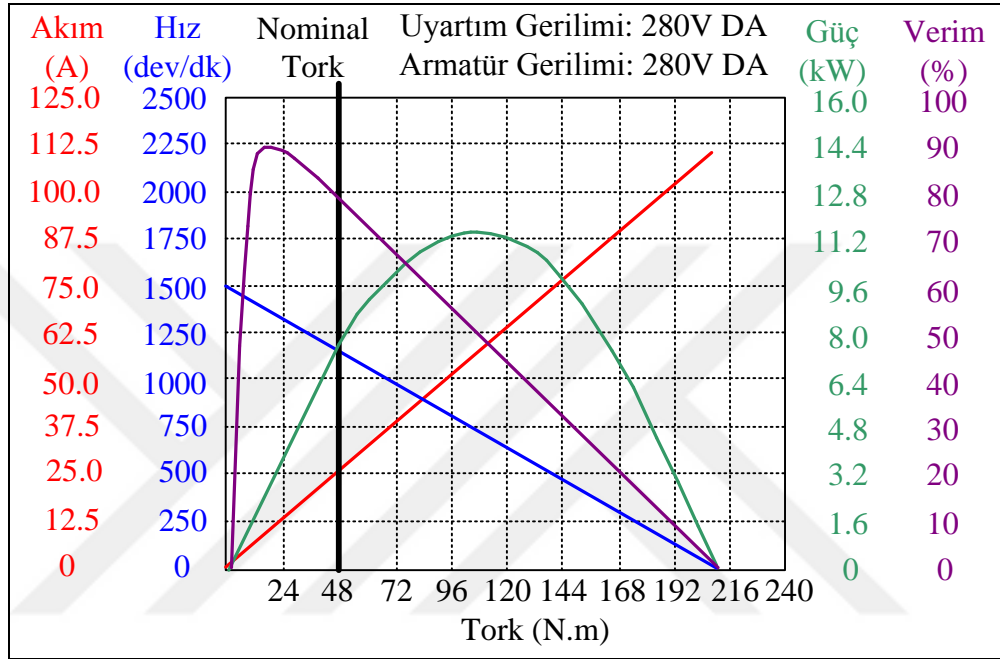
5.1.4. Doğru Akım Elektrik Makinesi

Test düzeneğinde kullanılan uyarım sargılı DAEM GEMS marka GMKG 100M modelidir. Tercih edilen DAEM Şekil 5.11'de gösterilmektedir.



Şekil 5.11. Test düzeneğinde kullanılan DAEM.

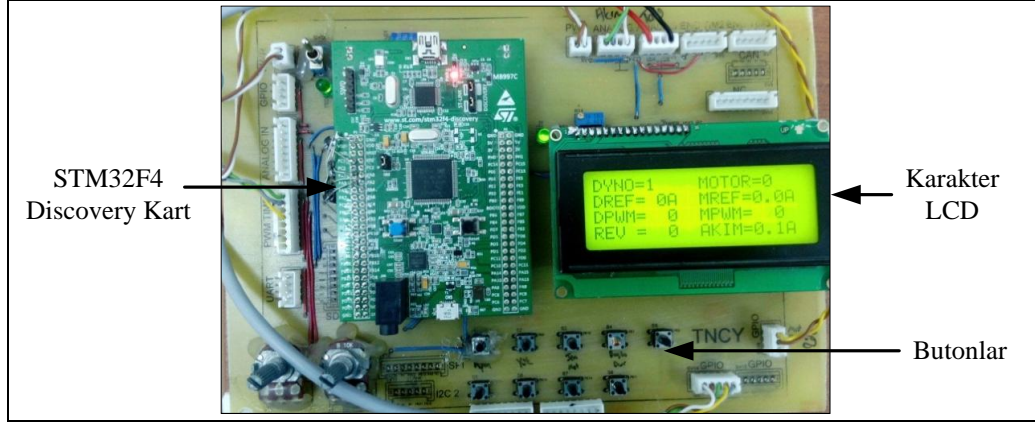
Uyartım gerilimi 280 V DA, uyartım sargı akımı 2,4 A'dır. Rotor gerilimi 280 V, rotor akımı 27 A, DAEM gücü 7,5 kW, verimi % 89, nominal torku 47,49 N.m, maksimum dönüş hızı 1500 dev/dk'dır. DAEM tork ve dönüş hızı, TIEM tork ve dönüş hızına uygun olduğunu için tercih edilmektedir. DAEM performans grafiği Şekil 5.12'de verilmektedir.



Şekil 5.12. DAEM performans grafiği.

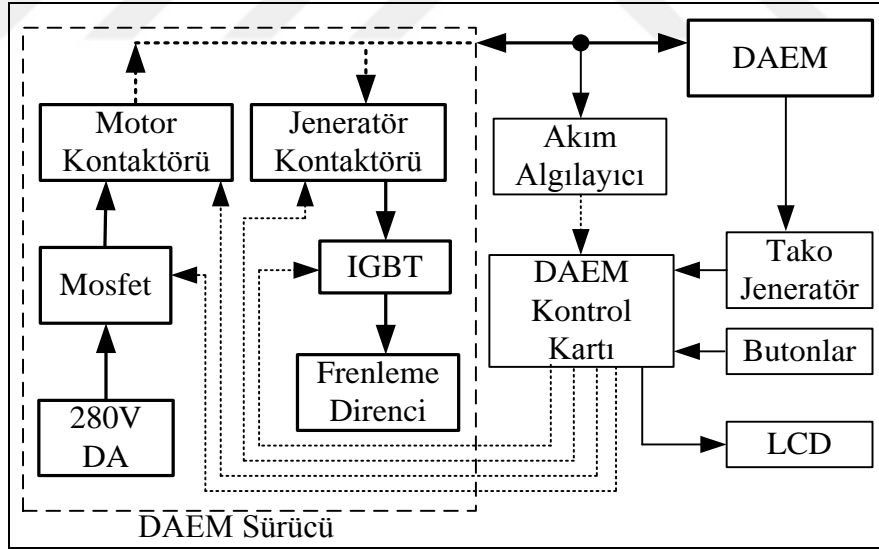
5.1.5. DAEM Kontrol Kartı ve DAEM sürücü

DAEM, tork kontrollü BM denetleyici ile jeneratör ve motor olarak çalıştırılmaktadır. TIEM sürücünde olduğu gibi DAEM kontrolü de STM32F4 Discovery kart ile gerçekleştirilmektedir. DAEM kontrol kartı Şekil 5.13'te gösterilmektedir. DAEM kontrol kartı ile kullanıcı jeneratör ve motor için tork değerlerini butonlar vasıtasıyla belirlemektedir. Girilen tork değerlerine göre BM denetleyici kullanarak frenleme direnç IGBT'sinin anahtarlanması, BM denetleyici kullanarak motor MOSFET'inin anahtarlanması, jeneratör ya da motor kontaktörlerinin aktif edilmesi, sistem dönüş hızının okunması, rotor akımının okunması icra edilmektedir. DAEM jeneratör ve motor BM denetleyici üyelik fonksiyonları Şekil 5.8'de ve kural tabanı Çizelge 5.3'te verilmektedir.



Şekil 5.13. DAEM kontrol kartı.

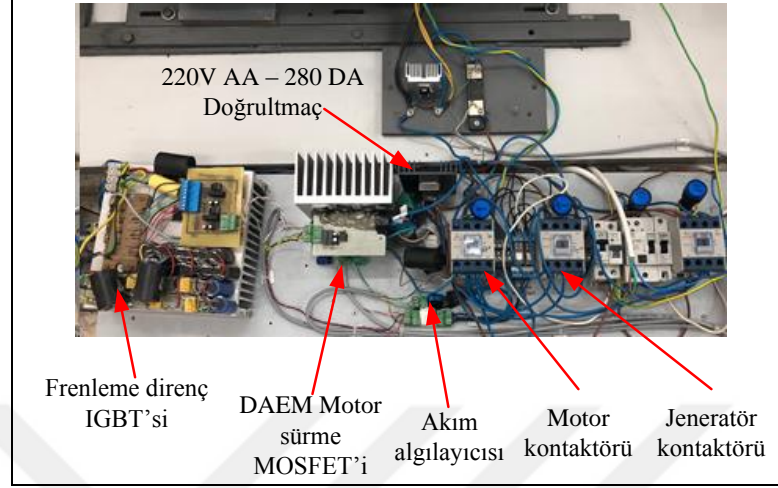
DAEM, DAEM kontrol kartı ve DAEM sürücünün bağlantı şeması Şekil 5.14'te gösterilmektedir. DAEM sürücünün görünümü Şekil 5.15'te verilmektedir. Deney başlamadan önce TIEM normal sürme için tork değeri belirlenir. DAEM jeneratör olarak çalışırken jeneratör kontaktörü ile DAEM terminal uçları IGBT ve frenleme direncine bağlanmaktadır.



Şekil 5.14. DAEM, DAEM kontrol kartı ve DAEM sürücü bağlantı şeması.

DAEM jeneratör olarak çalışırken dönüş hızına göre terminal uçlarında gerilim oluşmaktadır. DAEM terminal uçlarındaki gerilim ile frenleme direnci, IGBT ile sürülmektedir. DAEM jeneratör olarak çalışırken hız kontrolü yapılmadığı için üzerinden geçen akım sadece DAEM torkunun bir değişkeni olur. DAEM'den geçen

akımın kontrolü DAEM tork kontrolü olmaktadır. DAEM jeneratör olarak çalışırken DGM frekansı 500 Hz, motor olarak çalışırken DGM frekansı 2 kHz seçilmektedir.



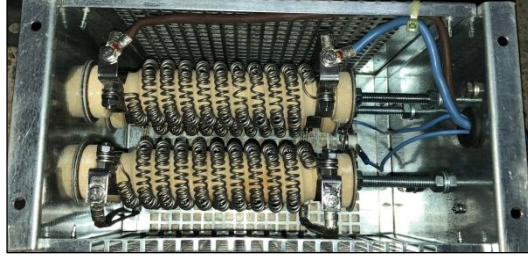
Şekil 5.15. DAEM sürücü.

TİEM rejeneratif frenleme için DAEM'in yükleyeceği tork değeri seçilir. DAEM motor kontaktörünün aktif olması ile DAEM terminal uçları 280 V DA hattına MOSFET ile bağlanır. Şebeke gerilimi olan 220 V AA bir doğrultmaç ile 280 V DA çevrilmektedir. DAEM motor olarak çalışırken gerilim sabit olduğu için akım değerinin içerisinde DAEM dönüş hızı ve DAEM torku olmaktadır. Sadece akımı kontrol etmek DAEM torkunu kontrol etmeye yetmez ve DAEM dönüş hızının da işleme dahil edilmesi gerekmektedir. DAEM dönüş hızı bir tako jeneratör vasıtasıyla DAEM kontrol kartına aktarılmaktadır. Eşitlik 5.5'te verilen denklem ile tork değeri hesaplatılır ve tork referans değerlerine göre DAEM motor olarak kontrol edilir.

$$Güç(V. i) = \frac{Dönüş\ hızı(dev/dk).Tork(N.m)}{9,549} \quad (5.5)$$

5.1.6.Frenleme Direnci

TİEM normal sürülürken DAEM jeneratör olarak çalışmakta ve ürettiği enerjiyi Şekil 5.16'da gösterilen frenleme direnci üzerinden harcamaktadır. Frenleme direnci 2000 W gücünde ve 1 Ω değerindedir. Frenleme direnci bir IGBT ile sürülerek üzerinden geçen akım kontrol edilmektedir.



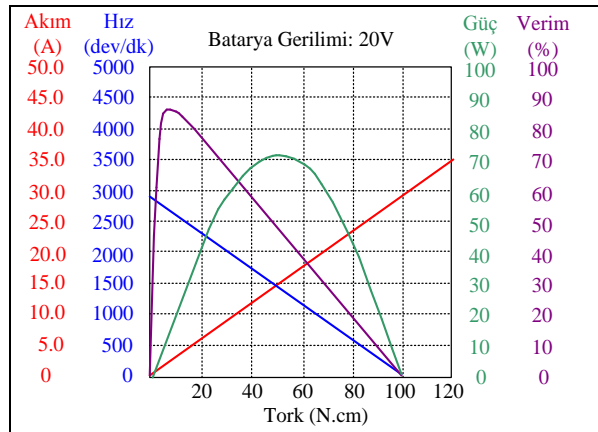
Şekil 5.16. Frenleme direnci.

5.1.7. Tako Jeneratör

DAEM kontrol kartının sistem dönüş hızını ölçebilmesi için Şekil 5.17’de gösterilen KAG Hannover M48 SMFDAM tako jeneratör kullanılmaktadır. Şekil 5.18’de gösterildiği gibi lineer çıkış vermesi ve 13 rotor sargısına sahip olması sebebiyle tercih edilmektedir. 2800 dev/dk hızda 20 V çıkış vermektedir. DAEM’in arkasına kaplin ile bağlanarak ölçüm yapılmaktadır.



Şekil 5.17. KAG Hannover tako jeneratör.



Şekil 5.18. Tako Jeneratör Çıkış Karakteristiği.

5.1.8. Özel Yapım Malzemeler

TİEM ve DAEM'in test düzeneğine bağlanabilmesi için gerekli bağlantı materyalleri, volan, volan bağlantı materyali, yataklı rulmanların altında bulunan destek milleri CNC (Computer Numerical Control) ile işlenerek imal edilmektedir. İmal edilen parçalardan TİEM ve volan bağlantı materyali Şekil 5.19'da verilmektedir.



Şekil 5.19. TİEM ve volan bağlantı materyali.

TİEM, DAEM, volan altında bulunan tablalar ve yataklı rulmanların altında bulunan kirişler su jeti ile kesilerek hazırlanmaktadır. Su jeti ile kesilen parçalar Şekil 5.20'de gösterilmektedir.

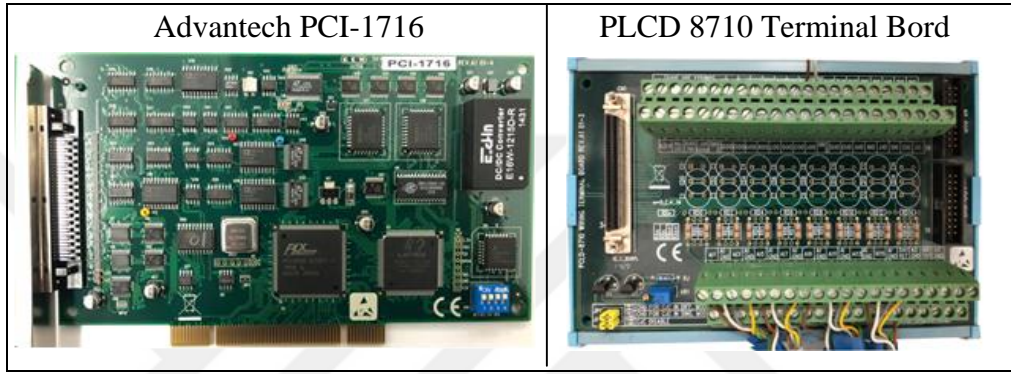


Şekil 5.20. TİEM, DAEM, volan tablaları ve yataklı rulman kirişleri.

5.1.9. Veri Alış Veriş Kartı

Test düzeneğinde yapılan deneylerin bilgisayar ortamına gerçek zamanlı kaydedilmesi için veri alış verişi kartı kullanılmaktadır. Kullanılan veri alış verişi kartı ve terminal bordu Şekil 5.21'de gösterilen Advantech PCI-1716 ve PLCD 8710'dur. Advantech

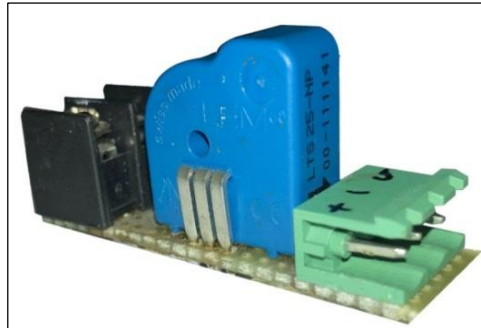
PCI-1716 16 bit çözünürlüğe sahiptir ve bir kanal için saniyede 250 bin örnek alabilmektedir. Advantech PCI-1716'nın 16 adet analog girişi, 2 adet analog çıkışı, 16 adet dijital girişi ve 16 adet dijital çıkışı bulunmaktadır. ± 10 V analog giriş gerilim ölçümü yapabilmektedir. MATLAB/Simulink tarafından desteklenmektedir. Bu sayede elde edilen deney verileri MATLAB/Simulink üzerinden Workspace ekranına alınabilmektedir. Deney sırasında batarya akımı, batarya gerilimi, sistemin dönüş hızı ve TİEM tork bilgileri 1 msn örnekleme ile gerçek zamanlı kaydedilmektedir.



Şekil 5.21. Advantech PCI-1716 ve PLCD 8710 terminal bordu.

5.1.10. Akım ve Gerilim Algılayıcıları

TİEM sürücü akımının izlenmesi, sınırlandırılması ve DAEM akım kontrolünün yapılabilmesi için Şekil 5.22'de gösterilen LEM LTS-25-NP akım algılayıcısı kullanılmaktadır.



Şekil 5.22. LEM LTS 25-NP akım algılayıcısı.

Simetrik beslemeye ihtiyaç duymadan çalışması, 400 nsn tepki süresi, ± 80 A maksimum akım ölçüm aralığı, % 0,2 hata ile çalışabilmesi, elektriksel yalıtımlı olması LEM LTS-25-NP'nin tercih sebebidir. LEM LTS-25-NP akım algılayıcısı +80 A akım değerinde 4,5 V çıkış gerilimi, -80 A akım değerinde 0,5 V çıkış gerilimi vermektedir. TIEM, DAEM akım izlenmesi ve DAEM akım kontrolü için uygun bir akım algılayıcısıdır.

TIEM batarya akımının bilgisayar ortamına aktarılması için Şekil 5.23'te gösterilen LEM LA 55-P akım algılayıcısı kullanılmaktadır. Simetrik beslemeye ihtiyaç duymaktadır, ± 100 A maksimum akım ölçebilmektedir, tepki süresi 1 μ sn, % 0,65 hata ile elektriksel yalıtımlı çalışabilmektedir. LEM LA 55-P akım algılayıcı ile +100 A değerinde 10 V, -100 A değerinde -10 V gerilim vermektedir. LEM LA 55-P'nin çıkış gerilimi veri alışı veri kartı girişine uygundur.



Şekil 5.23. LEM LA 55-P akım algılayıcı.

TIEM batarya gerilimi Şekil 5.24'te gösterilen LEM LV 25-P gerilim algılayıcısı ile bilgisayar ortamına aktarılmaktadır.



Şekil 5.24. LEM LV25-P gerilim algılayıcı.

Simetrik besleme ile çalışmaktadır. Tepki süresi 40 μ sn, % 0,9 hata ile elektriksel yalıtımlı çalışmaktadır. Gerilim algılayıcı +100 V giriş gerilim değerinde +10 V çıkış gerilimi ve -100 V giriş gerilim değerinde -10V çıkış gerilimi vermektedir. LEM LV 25-P'nin çıkış gerilimi veri alış veriş kartı girişine uygundur.

5.1.11.İndüktif Algılayıcı ve Frekans Gerilim Çevirici

Sistemin dönüş hızını ölçebilmek için bir adet Şekil 5.25'te gösterilen MEFA ME4-S12-NA indüktif algılayıcı kullanılmaktadır. İndüktif algılayıcı metal algılaması yapmaktadır ve dönüş hız ölçümü için hız ölçülecek milin üzerine algılama mesafesinde metal yerleştirilmelidir. TIEM ile volan kaplin vasıtası ile kuplajlanmaktadır. Kaplin üç parçadan meydana gelmektedir. Bu parçalar birbiri içine geçebilen kuplajlanacak iki mile bağlı alüminyum ve iki alüminyum arasında kalan kauçuk parçadır. İndüktif algılayıcı ile kaplinin alüminyum parçaları tespit edilmektedir. İndüktif algılayıcı bir turda 8 kez metal algılaması yaparak kare sinyal çıkışı vermektedir. Sistemin dönüş hızı arttıkça kare sinyalin frekansı artmaktadır. İndüktif algılayıcı 4 mm mesafeden metal algılaması yapabilmektedir. İndüktif algılayıcının tepki süresi 1 msn'dir.



Şekil 5.25. MEFA ME4-S12-NA indüktif algılayıcı.

İndüktif algılayıcı çıkışına Şekil 5.26'da gösterilen Klemsan FT-NAM-I-CFG frekans gerilim çevirici bağlanarak analog gerilim çıkışı elde edilmektedir. Üzerindeki anahtarlar vasıtasıyla farklı girişler ve çıkış yapılandırılabilir. Giriş frekans aralığı 0-50 kHz'dir. 0-5 V aralığında 16 bit çözünürlüğe sahip analog çıkış verebilmektedir. Dönüş hızı okumak için hazırlanan indüktif algılayıcı ve frekans gerilim çevirici veri alış veriş kartı girişine uygundur.



Şekil 5.26. Klemsan FT-NAM-I-CFG frekans gerilim çevirici.

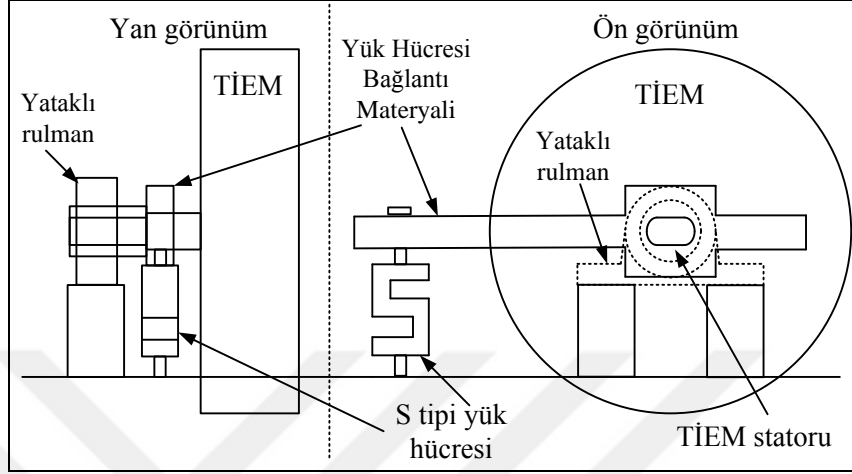
5.1.12. Yük Hücresi ve Yük Hücresi Gerilim Çevirici

TİEM tork ölçümü yapılabilmesi için Şekil 5.27’de gösterilen Baykon BT604 yük hücresi TİEM’in statoruna özel üretilen bir bağlantı materyali ile Şekil 5.28’de gösterildiği bağlanmaktadır. TİEM tork ürettiğinde TİEM’in statoruna bağlı olan bağlantı materyaline kuvvet uygulamaktadır. Tork = kuvvet x kuvvet kolu olarak hesaplanmaktadır. Yük hücresi ile TİEM statoru arasındaki mesafe 31,5 cm’dir. TİEM maksimum kalkınma torku Şekil 5.5’te görüldüğü gibi 185 N.m değerindedir. Yük hücresinde oluşacak baskı kuvveti $185 \text{ N.m} / 0,315 \text{ m} = 587,3 \text{ N} = 59,86 \text{ kg}$ olmaktadır. Seçilen yük hücresi üreticinin belirttiği üzere %120 kapasiteye kadar ölçüm yapabilmektedir. TİEM tork ölçümü için seçilmesi gereken yük hücresi $59,86 / 1,2 = 49,88 \text{ kg}$ ’dan daha fazla olmalıdır. Bu değerden fazla olmak şartı ile minimum ölçüm yapan yük hücresi seçimi ölçüm çözünürlüğünü arttırmaktadır.



Şekil 5.27. Baykon S tipi yük hücresi.

Baykon BT604 yük hücresi 50 kg kapasiteli ve hassasiyeti 2 mV/V'tur. S tipi yük hücresi olmasıyla baskı kuvvetini itme ve çekme şeklinde ölçülebilmektedir. Bu sayede normal sürme ve rejeneratif frenleme ölçümleri yapılabilmektedir.



Şekil 5.28. Yük hücresinin TIEM ile bağlantısı.

Yük hücresi çıkışına Şekil 5.29'da gösterilen Baykon TX 12 yük hücresi gerilim çevirici bağlanarak analog gerilim elde edilmektedir. Çıkış gerilimi, kazanç, sıfırlama gibi parametreler üzerindeki dönel butonlar ile ayarlanabilmektedir. Analog gerilim çıkışı, 16 bit çözünürlük ve % 0,01 hata ile çalışabilmektedir. Baykon TX 12 yük hücresi üzerinde +50 kg yük bulunduğunda analog çıkış +2,5 V, -50kg yük bulunduğunda -2,5 V çıkışı verebilmektedir. Baykon TX 12 veri alışı veri kartı girişi ile uyumludur.



Şekil 5.29. Baykon TX 12 yük hücresi gerilim çevirici.

5.2. SÜRÜŞ ÇEVİRİM HIZ REFERANSLARI

Sürüş çevrim hız referansları ile TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme deneyleri yapılmaktadır. Sürüş çevrim hız referansları, ön test sürüş çevrim hız referansları ve standart sürüş çevrim hız referansları olarak ayrılmaktadır. Standart sürüş çevrim hız referanslarının gerçekleştirilebilmesi için ön test sürüş çevrim hız referansları elde edilmektedir. Ön test sürüş çevrim hız referansları ile farklı hız ve eğimlerde, TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme deneylerinin yapılabilmesi hedeflenmektedir. Ön test sürüş çevrim hız referanslarını kullanılarak PID ve BM denetleyiciler ile benzetim çalışması ve deneysel çalışma yapılmakta, PID ve BM denetleyicileri karşılaştırılmaktadır. Standart sürüş çevrim hız referansları kullanılarak BM denetleyici ile deneysel çalışmalar yapılmaktadır.

Rejeneratif frenleme hız sınırı 18 km/sa'dir. Bu hızın altında kalan hızlarda rejeneratif frenleme yapılmamaktadır. Öncesinde rejeneratif frenleme yapıyorsa da belirtilen hızın altında TİEM normal sürmeye geçmektedir.

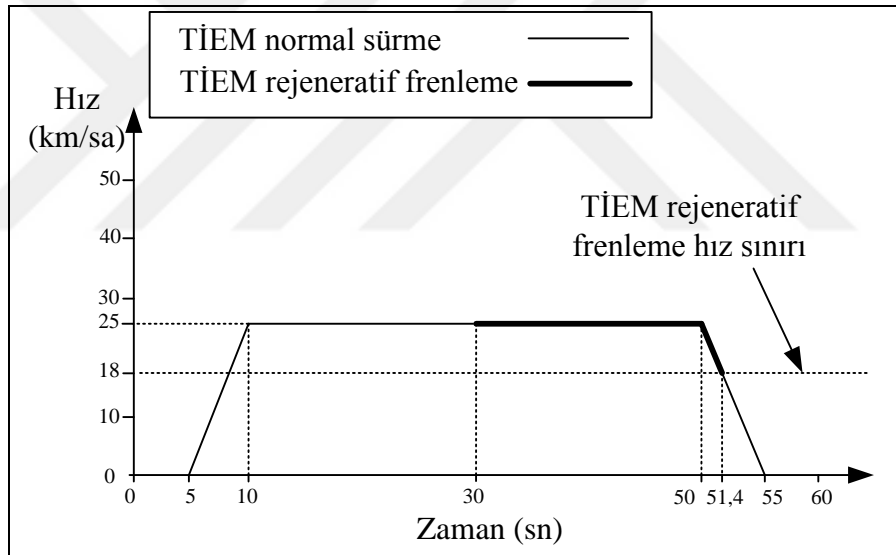
5.2.1. Ön Test Sürüş Çevrim Hız Referansları

Ön test sürüş çevrim hız referansları yamuk fonksiyonu, rampa fonksiyonu ve merdiven fonksiyonudur. Standart sürüş çevrim hız referansları UDC ve NEDC hız referanslarıdır. Yamuk fonksiyonu hız referansı ile TİEM hızlanması, sabit hızda gitmesi ve normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçişi denetlenmektedir. Rampa fonksiyonu hız referansı ile TİEM normal sürülürken referans hız sabit açıyla rampa şeklinde artmaktadır ve TİEM rejeneratif frenleme yaparken referans hız sabit açıyla rampa şeklinde azalmaktadır. Merdiven fonksiyonu hız referansı ile TİEM normal sürülürken referans hız merdiven şeklinde artmaktadır ve TİEM rejeneratif frenleme yaparken referansı hız merdiven şeklinde azalmaktadır.

5.2.1.1. Yamuk Fonksiyonu Hız Referansı

Yamuk fonksiyonu hız referansı Şekil 5.30'da gösterilmektedir. TİEM normal sürme ile beş saniyede 25 km/sa hıza ulaşması, 25 km/sa sabit hızda girerken TİEM normal

sürmeden rejeneratif frenlemeye geçmesi ve beş saniye içinde 25 km/sa hızdan 0 km/sa hıza inmesi hedeflenmektedir. Yamuk fonksiyonu hız referansı ile TİEM normal sürme enerji harcaması ve TİEM rejeneratif frenleme enerji kazanımı izlenebilmektedir. Sistem ilk beş saniye hareketsiz kalmaktadır ve beşinci saniyede referans hız artmaktadır. Onuncu saniyede TİEM hızı 25 km/sa hıza çıkmaktadır. Sabit hızda çıktıktan sonraki yirmi saniye boyunca TİEM sabit hızda normal sürme ile çalışmaktadır ve enerji harcamaktadır. Otuzuncu saniyeden sonra TİEM rejeneratif frenleme yapmaktadır ve enerji kazanımı olmaktadır. Sabit hızda rejeneratif frenleme yirmi saniye sürmektedir. Ellinci saniyeden itibaren TİEM yavaşlamaya başlamaktadır ve rejeneratif frenleme hız sınırı olan 18 km/sa hıza ulaştığı anda TİEM rejeneratif frenlemeden normal sürmeye geçmektedir. TİEM elli beşinci saniyede tamamen durmaktadır ve sabit hız deneyi sona ermektedir.

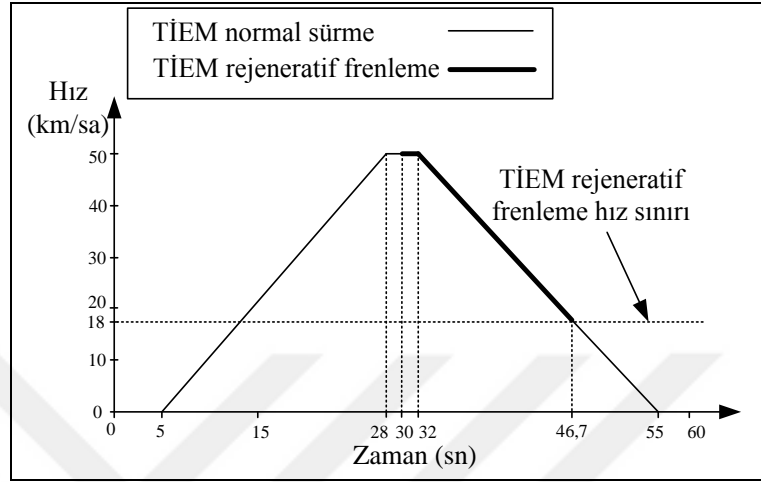


Şekil 5.30. Yamuk fonksiyonu hız referansı.

5.2.1.2. Rampa Fonksiyonu Hız Referansı

Rampa fonksiyonu hız referansı Şekil 5.31'de gösterilmektedir. TİEM normal sürme ile yirmi üç saniyede 50 km/sa hıza ulaşması, 50 km/sa sabit hızda girerken TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçmesi ve yirmi üç saniye içinde 50 km/sa hızdan 0 km/sa hıza inmesi hedeflenmektedir. Rampa fonksiyonu hız referansı artarken TİEM normal sürme enerji harcaması ve azalırken TİEM rejeneratif frenleme

enerji kazanımı izlenebilmektedir. Enerji harcamasının yanında TİEM normal sürülürken hızlanma sırasında referans değere ulaşması, rejeneratif frenleme ile yavaşlarken referans değere ulaşması gözlemlenebilmektedir.

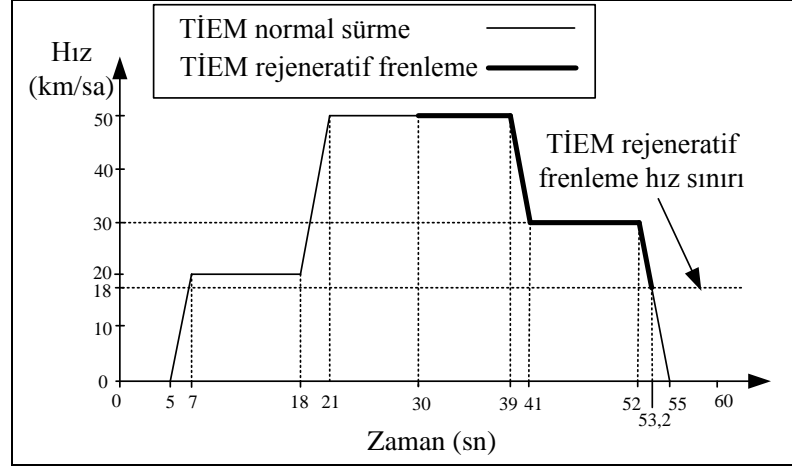


Şekil 5.31. Rampa fonksiyonu hız referansı.

Rampa fonksiyonu hız referansı beşinci saniyeden yirmi sekizinci saniyeye kadar 0 km/sa hızdan 50 km/sa hıza çıkmaktadır. Yirmi sekizinci saniyeden otuzuncu saniyeye kadar sabit hızda kalarak TİEM'in referans hıza oturması beklenmektedir. Otuzuncu saniyeye kadar TİEM normal sürülmektedir. Otuzuncu saniyede TİEM rejeneratif frenlemeye geçmektedir. Otuzuncu saniyeden otuz ikinci saniyeye kadar TİEM'in rejeneratif frenleme ile referans hıza oturması beklenmektedir. Otuz ikinci saniyeden elli beşinci saniyeye kadar 50 km/sa hızdan 0 km/sa hıza inmektedir. Rejeneratif frenlemenin hız sınırı olan 18 km/sa hıza kadar TİEM rejeneratif frenleme yaparak inmektedir. 18 km/sa hızın altında TİEM normal sürülmektedir.

5.2.1.3. Merdiven Fonksiyonu Hız Referansı

Merdiven fonksiyonu hız referansı Şekil 5.32'de verilmektedir. Merdiven fonksiyonu hız referansı ile bir saniyede 10 km/sa hız değişimi ile TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme yapması hedeflenmektedir. Merdiven fonksiyonu hız referansı artarken TİEM normal sürülmesi ile artışa verdiği cevap ve enerji harcaması incelenmektedir. Merdiven fonksiyonu hız referansı azalırken TİEM'in rejeneratif frenleme sırasında azalmaya verdiği tepki ve enerji geri kazanımı görülmektedir.



Şekil 5.32. Merdiven fonksiyonu hız referansı.

Merdiven fonksiyonu hız referansı artışları ve azalmaları saniyede 10 km/sa ivme ile gerçekleşmektedir. Merdiven fonksiyonu hız referansı beşinci saniyede başlamaktadır ve beşinci saniyeden yedinci saniyeye kadar 20 km/sa hıza ulaşmaktadır. Yedinci saniyeden on sekizinci saniyeye kadar 20 km/sa hız korunmaktadır. On sekizinci saniyeden yirmi birinci saniyeye kadar 20 km/sa hızdan 50 km/sa hıza ulaşmaktadır. Otuzuncu saniyeye kadar 50 km/sa hızda TİEM normal sürülmektedir. Otuzuncu saniyede TİEM rejeneratif frenlemeye geçmektedir. Otuzuncu saniyeden otuz dokuzuncu saniyeye kadar 50 km/sa sabit hızda TİEM rejeneratif frenleme yapmaya devam etmektedir. Otuz dokuzuncu saniyeden kırk birinci saniyeye kadar 50 km/sa hızdan 30 km/sa hıza inilmektedir. Kırk birinci saniyeden elli ikinci saniyeye kadar TİEM 30 km/sa sabit hızda rejeneratif frenleme yapmaya devam etmektedir. Elli ikinci saniyeden elli beşinci saniyeye kadar 30 km/sa hızdan 0 km/sa hıza inilmektedir. Rejeneratif frenlemenin hız sınırı olan 18 km/sa hıza kadar TİEM rejeneratif frenleme yaparak inmektedir. 18 km/sa hızın altında TİEM normal sürülmektedir.

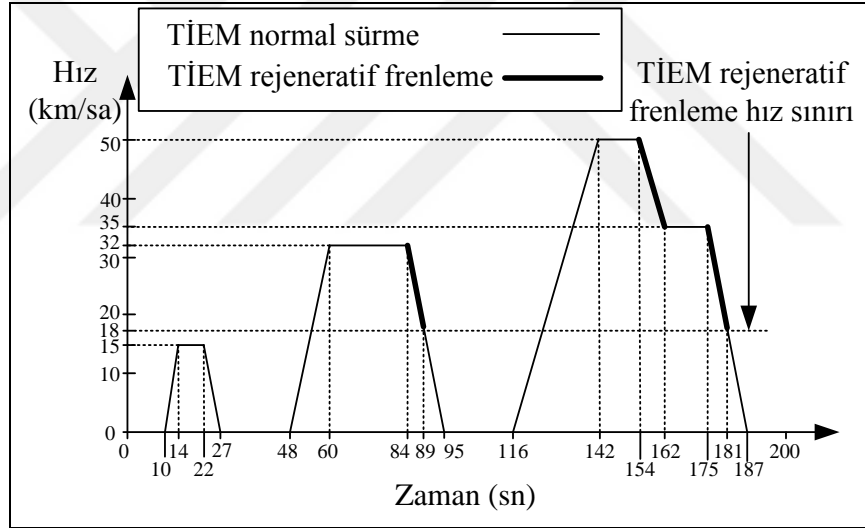
5.2.2. Standart Sürüş Çevrim Hız Referansları

UDC ve NEDC hız referansları, İYM'li araçların egzoz emisyonlarının ölçülmesi için geliştirilmiş referans hız standartlarıdır. UDC hız referansı 1969 yılında ortaya çıkmıştır. 1998 yılında UDC hız referansının da içinde bulunduğu NEDC hız referansı geliştirilmiştir [103]. Standart sürüş çevrim hız referansları ile hız artışlarında ve sabit

hızda TİEM normal sürülmektedir. Azalan hızlarda ise TİEM rejeneratif frenleme yapılmaktadır.

5.2.2.1. UDC Hız Referansı

UDC hız referansı Şekil 5.33'te verilmektedir. Hız döngüsü toplam 190 saniye sürmektedir. Toplam üç hız artışı, dört sabit hız ve dört yavaşlama gerçekleşmektedir. UDC hız referansının maksimum hızı 50 km/sa'tir ve TİEM maksimum hızından az olduğu için test düzeneğinde kullanılabilir. Hız artışı ve sabit hızlarda TİEM normal sürülmektedir, yavaşlama anlarında ise TİEM rejeneratif frenleme yapmaktadır. Rejeneratif frenlemenin hız sınırı olan 18 km/sa hıza kadar TİEM rejeneratif frenleme yapmaktadır. 18 km/sa hızın altında TİEM normal sürülmektedir.



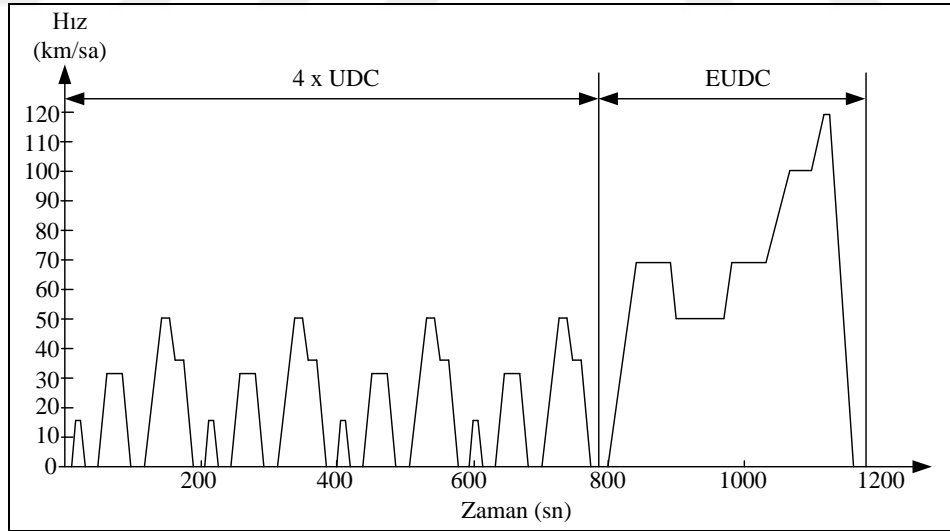
Şekil 5.33. UDC hız referansı.

UDC hız referansı onuncu saniyeden on dördüncü saniyeye kadar 0 km/sa hızdan 15 km/sa hıza çıkmaktadır. On dördüncü saniyeden yirmi ikinci saniyeye kadar 15 km/sa hız korunmaktadır. Yirmi ikinci saniyeden yirmi yedinci saniyeye kadar 15 km/sa hızdan 0 km/sa hıza inmektedir. Rejeneratif frenleme hız sınırı olan 18 km/sa hız aşılmadığından dolayı bu bölgede rejeneratif frenleme yapılmamaktadır. Kırk sekizinci saniyeden altmışıncı saniyeye kadar 0 km/sa hızdan 32 km/sa hıza çıkmaktadır. Altmışıncı saniyeden seksen dördüncü saniyeye kadar 32 km/sa hız korunmaktadır. Seksen dördüncü saniyeden doksan beşinci saniyeye kadar 32 km/sa

hızdan 0 km/sa hızına inilmektedir. Bu bölgede TİEM rejeneratif frenleme hız sınırı olan 18 km/sa hızına kadar rejeneratif frenleme yapılmaktadır. Yüz on altıncı saniyeden yüz kırk ikinci saniyeye kadar 0 km/sa hızdan elli km/sa hızına çıkmaktadır. Yüz kırk ikinci saniyeden yüz elli dördüncü saniyeye kadar 50 km/sa hız korunmaktadır. Yüz elli dördüncü saniyeden yüz altmış ikinci saniyeye kadar 50 km/sa hızdan 35 km/sa hızına rejeneratif frenleme ile inmektedir. Yüz altmış ikinci saniyeden yüz yetmiş beşinci saniyeye kadar TİEM normal sürmeye geçilerek 35 km/sa sabit hızda kalmaktadır. Yüz yetmiş beşinci saniyeden yüz seksen yedinci saniyeye kadar 35 km/sa hızdan 0 km/sa hızına inmektedir. Bu bölgede TİEM rejeneratif frenleme hız sınırı olan 18 km/sa hızına kadar rejeneratif frenleme yapılmaktadır.

5.2.2.2. NEDC Hız Referansı

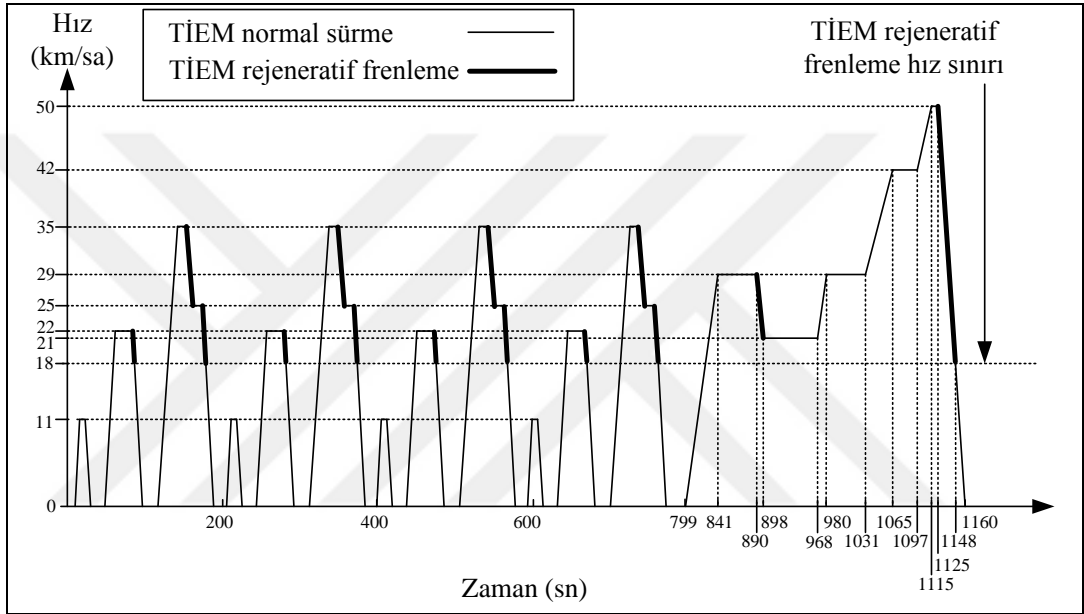
NEDC hız referansı Şekil 5.34'te verilmektedir. Hız döngüsü toplam 1178 saniye sürmektedir. NEDC hız referansı içerisinde 4 adet UDC hız referansı ve bir adet EUDC (ekstra kentsel sürüş çevrimi) hız referansı vardır [103].



Şekil 5.34. NEDC hız referansı.

Toplam on altı hız artışı, yirmi bir sabit hız ve yirmi bir yavaşlama gerçekleşmektedir. UDC hız referansının maksimum hızı 120 km/sa'tir ve TİEM'in maksimum hızından fazla olduğu için test düzeneğinde kullanılabilmesi mümkün değildir. Test düzeneğinde NEDC hız döngüsünün kullanılabilmesi için Şekil 5.35'te gösterildiği

gibi ölçeklendirilmesi gerekmektedir. NEDC içerisinde bulunan UDC hız referansları maksimum hızı 35 km/sa olacak şekilde ölçeklendirilmektedir. EUDC hız referansı ise maksimum hızı 50 km/sa olacak şekilde ölçeklendirilmektedir. Hız artışı ve sabit hızlarda TİEM normal sürülmektedir, yavaşlama anlarında ise TİEM rejeneratif frenleme yapmaktadır. Rejeneratif frenlemenin hız sınırı olan 18 km/sa hıza kadar TİEM rejeneratif frenleme yapmaktadır. 18 km/sa hızın altında TİEM normal sürülmektedir.



Şekil 5.35. Ölçeklendirilmiş NEDC hız referansı.

Ölçeklendirilmiş NEDC hız referansı içerisindeki UDC hız referanslarından daha önce bahsedilmişti. Bu nedenle ölçeklendirilmiş NEDC hız referansı içerisindeki EUDC hız referansından bahsedilecektir.

Ölçeklendirilmiş NEDC hız referansı yedi yüz doksan dokuzuncu saniyeden sekiz yüz kırk birinci saniyeye kadar 0 km/sa hızdan 29 km/sa hıza çıkmaktadır. Sekiz yüz kırk birinci saniyeden sekiz yüz doksanıncı saniyeye kadar 29 km/sa hızda sabit kalmaktadır. Sekiz yüz doksanıncı saniyeden sekiz yüz doksan sekizinci saniyeye kadar rejeneratif frenleme ile 29 km/sa hızdan 21 km/sa hıza inmektedir. Sekiz yüz doksan sekizinci saniyeden dokuz yüz altmış sekizinci saniyeye kadar 21 km/sa hızda sabit kalmaktadır. Dokuz yüz altmış sekizinci saniyeden dokuz yüz sekseninci

saniyeye kadar 21 km/sa hızdan 29 km/sa hıza çıkmaktadır. Dokuz yüz sekseninci saniyeden bin otuz birinci saniyeye kadar 29 km/sa hızda sabit kalmaktadır. Bin otuz birinci saniyeden bin altmış beşinci saniyeye kadar 29 km/sa hızdan 42 km/sa hıza çıkmaktadır. Bin altmış beşinci saniyeden bin doksan yedinci saniyeye kadar 42 km/sa hızda sabit kalmaktadır. Bin doksan yedinci saniyeden bin yüz on beşinci saniyeye kadar 42 km/sa hızdan 50 km/sa hıza çıkmaktadır. Bin yüz on beşinci saniyeden bin yüz yirmi beşinci saniyeye kadar 50 km/sa hızda sabit kalmaktadır. Bin yüz yirmi beşinci saniyeden bin yüz altmışıncı saniyeye kadar 50 km/sa hızdan 0 km/sa hıza inmektedir. Bu bölgede TIEM rejeneratif frenleme hız sınırı olan 18 km/sa hıza kadar rejeneratif frenleme yapılmaktadır.



BÖLÜM 6

BENZETİM VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme için Matlab/Simulink'te PID ve BM denetleyicileri kullanılarak, farklı yüklerde, farklı referans hızlarda benzetim çalışması yapılmaktadır. Benzetim çalışmasının sonunda PID ve BM denetleyici sonuçları karşılaştırılmaktadır. Kurulan test düzeneği üzerinde TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme deneysel çalışması gerçekleştirilmektedir. Gömülü sistem olarak oluşturulan model ile PID ve BM denetleyicileri, farklı yüklerde, ön test sürüş çevrim hız referansları kullanılarak deneysel çalışma gerçekleştirilmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan PID ve BM denetleyicileri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmaktadır. Standart test sürüş çevrim hız referansları kullanılarak farklı yüklerde BM denetleyici ile deneysel çalışmalar yapılmaktadır.

Benzetim ve deneysel çalışmada TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme için kullanılan PID denetleyici blok diyagramı Şekil 4.1'de, PID parametreleri Çizelge 5.2'de verilmektedir. Benzetim ve deneysel çalışmada kullanılan BM denetleyicinin blok diyagramı Şekil 4.2'de verilmektedir. BM denetleyici girişleri ve çıkış için kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 5.8'de, BM denetleyici kural tabanı Çizelge 5.3'te gösterilmektedir. TİEM rejeneratif frenleme için benzetim ve deneysel çalışmada kullanılan rejeneratif frenleme algoritması Şekil 3.12'de verilmektedir.

Elde edilen grafikler referans hız, TİEM hızı, batarya akımı, batarya gerilimi, TİEM torku, elektriksel güç ve mekanik güçtür. Elektriksel güç batarya akımı ve geriliminin çarpımı olarak hesaplanmaktadır. Mekanik güç ise TİEM hızı ve torku ile Eşitlik 5.5'teki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır. Bataryadan çıkan akım "+", bataryaya giren akım "-" olarak alınmaktadır. Bu durumda TİEM normal sürme için akım pozitif, TİEM rejeneratif frenleme için akım negatif yönde gösterilmektedir.

6.1. BENZETİM ÇALIŞMALARI

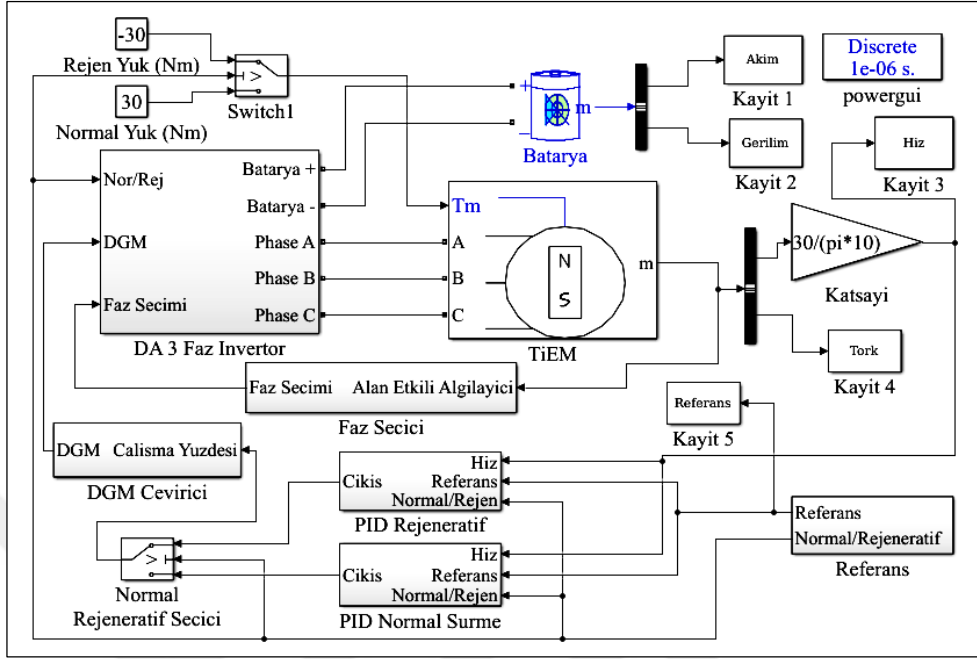
TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme için MATLAB/Simulink'te PID ve BM denetleyiciler kullanarak benzetim modelleri hazırlanmaktadır. TİEM benzetimi için MATLAB/Simulink hazır TİEM modeli kullanılmaktadır. Benzetim çalışmasında ön test sürüş çevrim referans hızlarından düz fonksiyon ve rampa fonksiyonu kullanılmaktadır. Benzetim çalışmasında TİEM normal sürme ve TİEM rejeneratif frenleme için aynı yükler kullanılmaktadır. TİEM 15 N.m ve 30 N.m yükler ile yüklenerek benzetim çalışması yapılmaktadır. Benzetim çalışmasıyla referans hız, TİEM hızı, batarya gerilimi, batarya akımı, TİEM torku, elektriksel güç ve mekanik güç grafikleri elde edilmektedir. Benzetim çalışmasında kullanılan PID ve BM denetleyicileri karşılaştırılmaktadır. Benzetim çalışması için oluşturulan TİEM model parametreleri Çizelge 5.1'de verilmektedir.

6.1.1. MATLAB/Simulink Benzetim Modeli

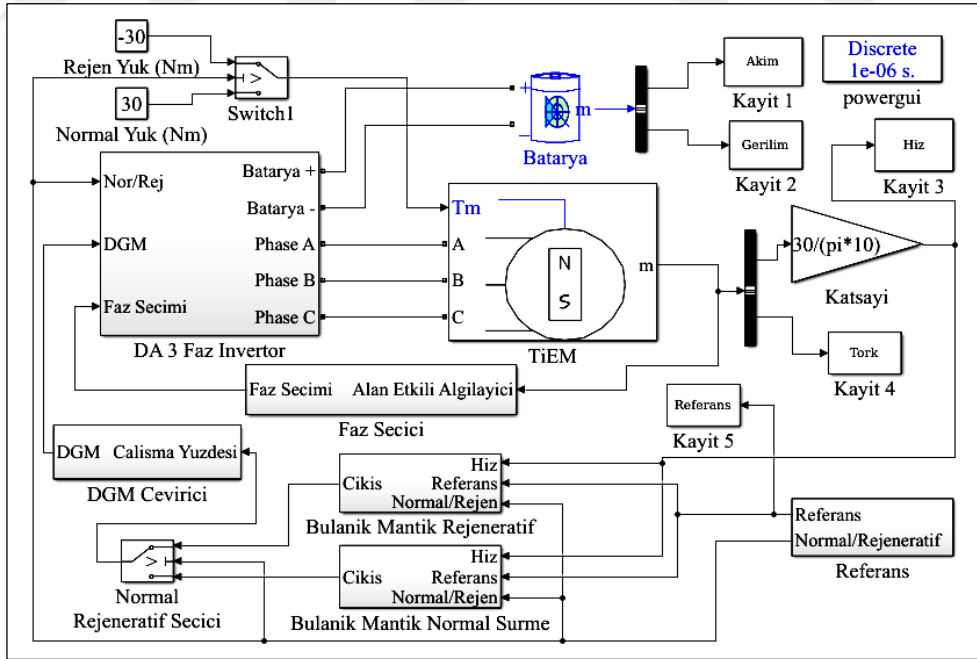
TİEM normal sürülürken bataryadan enerji alır ve bataryanın geriliminin düştüğü gözlemlenir. TİEM rejeneratif frenleme yaparken kazanılan enerji bataryaya depolanır. Benzetim modeli için TİEM matematiksel modeli hazırlanmasına rağmen batarya kullanımının gerçekleştirilebilmesi için MATLAB/Simulink hazır TİEM modeli kullanılmaktadır.

PID denetleyici ile oluşturulan benzetim modeli Şekil 6.1'de, BM denetleyici ile oluşturulan benzetim modeli Şekil 6.2'de verilmektedir. TİEM modelinin giriş yükü TİEM normal sürmede +15 N.m, +30 N.m, TİEM rejeneratif frenlemede -15 Nm, -30 N.m olarak seçilmektedir. TİEM DA 3 faz invertör ile sürülmektedir. DA 3 faz invertör girişinde normal sürme, rejeneratif frenleme seçim girişi, DGM ve alan etkili algılayıcılardan gelen faz seçme bilgileri mevcuttur. Batarya gerilimi de DA 3 faz invertör bloğuna girilmektedir. Normal sürme ve rejeneratif frenleme için iki farklı Şekil 6.1'de PID denetleyici bloğu, Şekil 6.2'de iki farklı BM denetleyici bloğu kullanılmaktadır. Denetleyici bloklarının girişi TİEM hızı, referans hız, normal sürme ve rejeneratif frenleme seçim uçlarıdır. BM denetleyici MATLAB/Fis editörü ile oluşturulmaktadır. Modellerin örnekleme zamanı 1 μ sn, PID ve BM denetleyicileri

örnekleme zamanı 10 msn'dir.



Şekil 6.1. PID denetleyici ile TIEM benzetim modeli.



Şekil 6.2. BM denetleyici ile TIEM benzetim modeli.

PID denetleyici için TIEM hızı ve referans hız ile hata değeri bulunmaktadır. BM denetleyici için hata ve hatanın değışimi hesaplanmaktadır. Referans hız bloğunun

içerisinde benzetimde kullanılan sürüş çevrim hız referansı mevcuttur. Hız referans bloğu içerisinde TİEM normal sürme ve TİEM rejeneratif frenleme arasındaki seçim bilgisi vardır. TİEM normal sürmeden TİEM rejeneratif frenlemeye veya TİEM rejeneratif frenlemeden TİEM normal sürmeye geçerken denetleyici çıkışları sıfırdan başlamaktadır.

Denetleyici çıkışlarının sıfırdan başlaması TİEM normal sürmeden TİEM rejeneratif frenlemeye geçiş sırasında veya TİEM rejeneratif frenlemeden TİEM normal sürmeye geçiş sırasında TİEM hızının referans hızdan uzaklaşmasına sebep olmaktadır. Belirlen bir ön DGM değeri ile geçişler sağlanırsa TİEM hızı referanstan çok fazla uzaklaşmadan çalışması sağlanabilmektedir. Bu geçişlerin sağlanması için denetleyici girişlerine TİEM normal sürme, TİEM rejeneratif frenleme seçim uçları uygulanmaktadır. TİEM normal sürme ve TİEM rejeneratif frenleme için belirlenen ön değerler TİEM hızına bağlı fonksiyon şeklinde olmaktadır. TİEM normal sürmeden TİEM rejeneratif frenlemeye geçerken ön DGM değeri için Eşitlik 6.1'deki denklem kullanılmaktadır. TİEM rejeneratif frenlemeden normal sürmeye geçerken ön DGM değeri için Eşitlik 6.2'deki denklem kullanılmaktadır.

$$DGM(\%) = 1,25. (50 (km/sa) - TiEM Hızı (km/sa)) + 30 \quad (6.1)$$

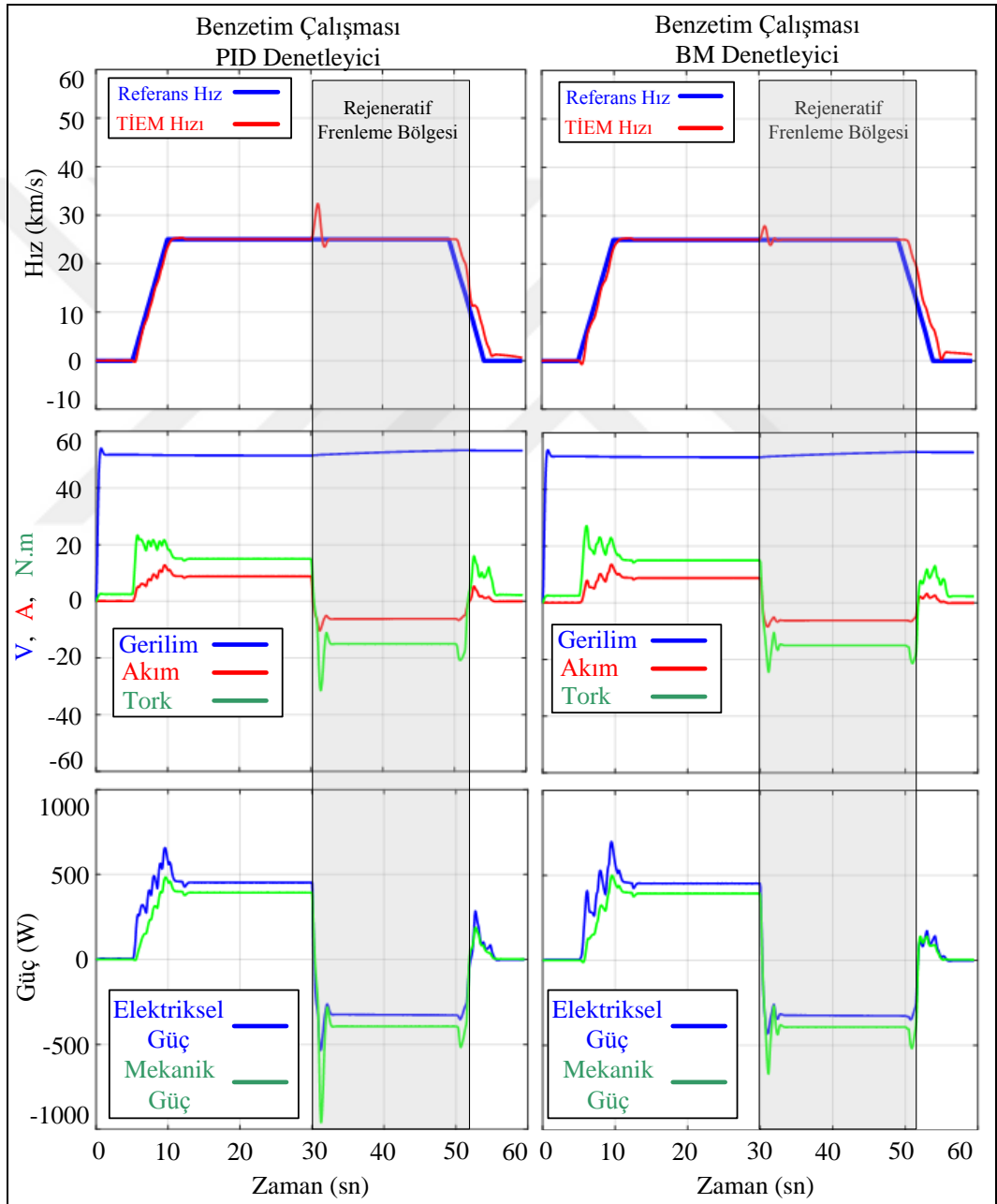
$$DGM(\%) = TiEM Hızı (km/sa) + 0,2. TiEM Hızı (km/sa) \quad (6.2)$$

Benzetim çalışması örnekleme zamanı 1 µsn seçilmektedir. Benzetim çalışması sırasında batarya akımı, batarya gerilimi, referans hız, TİEM hızı ve tork bilgisi MATLAB/Workspace ekranına kayıt edilmektedir.

6.1.2. Ön Test Sürüş Çevrim Hız Referansları ile Benzetim Çalışmaları

Normal sürme ve rejeneratif frenleme torku 15 N.m olarak ayarlanmış, PID ve BM denetleyicileri ve yamuk fonksiyonu hız referansı ile benzetim çalışması sonuç grafikleri Şekil 6.3'te verilmektedir. TİEM beşinci saniyeden onuncu saniyeye kadar hızlanmaktadır. Batarya gerilimi çekilen akıma bağlı olarak belirli bir miktar düşmektedir. TİEM referans hızı PID ve BM denetleyicileri ile takip etmektedir, TİEM

akımı kontrol edildiği için TİEM akımı artan hız ile birlikte artmaktadır. TİEM torku 15 N.m referans değerini ivme kaynaklı biraz aşmakta ancak daha sonra istenilen referansa gelmektedir. BM denetleyici akım ve tork dalgalanmasının PID denetleyiciden daha fazla olduğu görülmektedir. Elektriksel güç ve mekanik güçte artış olmaktadır. Onuncu saniyeden otuzuncu saniyeye kadar TİEM normal sürme devam etmektedir.



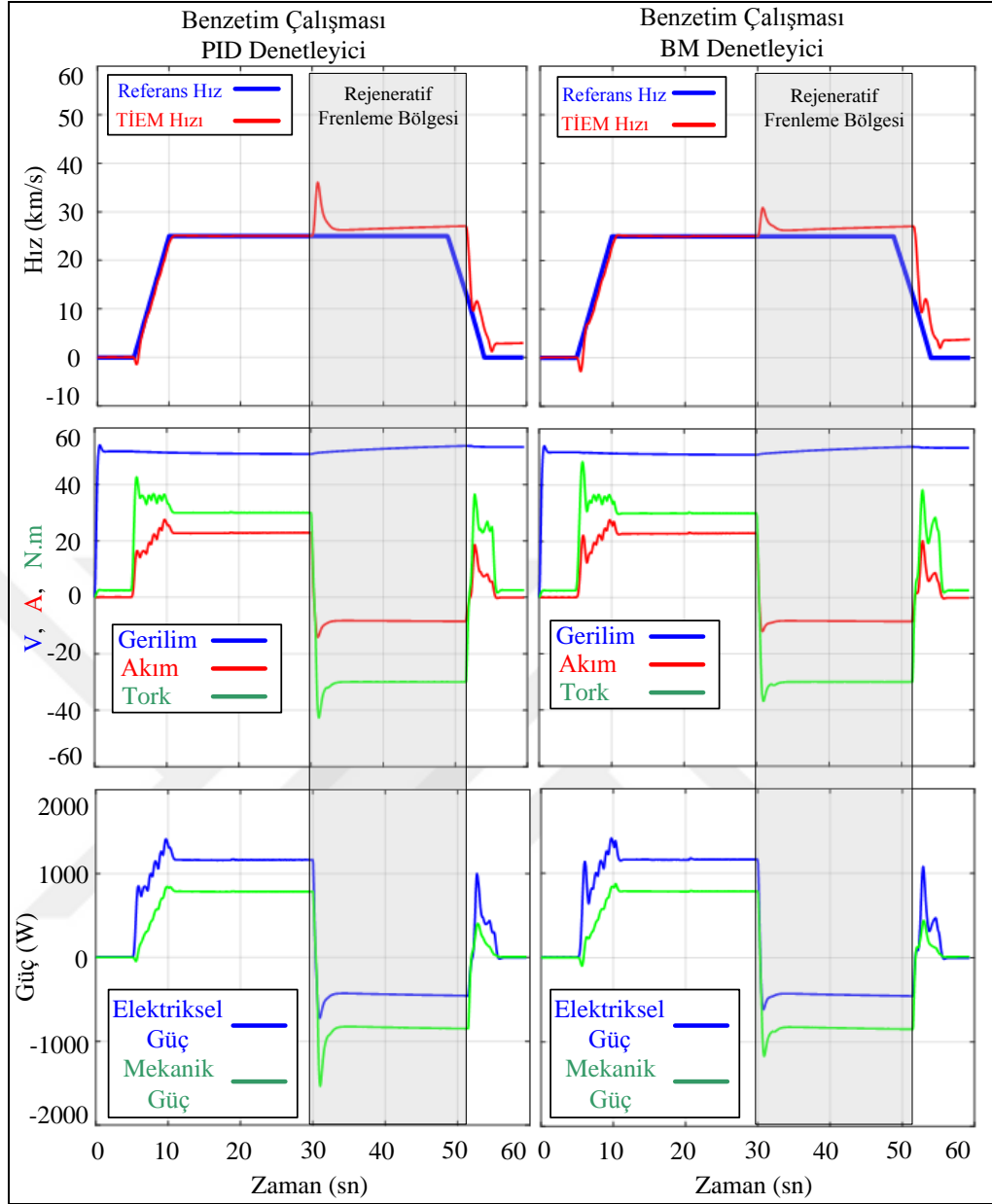
Şekil 6.3. PID ve BM denetleyicilerinin 15 N.m yük altında, yamuk fonksiyonu hız referansı ile benzetim çalışması.

TİEM hızı, akımı, torku, gerilimi, elektriksel güç ve mekanik güç sabit kalmaktadır. TİEM 25 km/sa sabit hız, 15 N.m yük altında iken 10 A akım çekmektedir. TİEM elektriksel gücü 480 W olmaktadır ve 440 W mekanik güç elde edebilmektedir.

Otuzuncu saniyede TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş yapmaktadır. Normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş sırasında denetleyici değiştirildiği için iki saniye hızda dalgalanma görülmektedir. Geçiş sırasında PID denetleyici 31 km/sa hıza kadar çıkarken BM denetleyici 28 km/sa hıza çıkmaktadır. Otuz ikinci saniye ile ellinci saniye arasında TİEM sabit hızda rejeneratif frenleme yaparken batarya gerilimi şarj olduğu için yükselmektedir, TİEM akımı negatif yönde bataryayı şarj etmektedir. TİEM 15 N.m negatif yük, 7,5 A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır. TİEM'e uygulanan güç 400 W iken TİEM'in elektriksel gücü negatif yönde 360 W'tır. Ellinci saniyeden itibaren referans hız düşmektedir. Rejeneratif frenleme hız sınırı olan 18 km/sa referans hıza kadar devam etmektedir. TİEM 18 km/sa hızın altında rejeneratif frenlemeden normal sürmeye geçmektedir.

Normal sürme ve rejeneratif frenleme torku 30 N.m olarak ayarlanmış, PID ve BM denetleyicileri ve yamuk fonksiyonu hız referansı ile benzetim çalışması sonuç grafikleri Şekil 6.4'te verilmektedir. TİEM beşinci saniyeden onuncu saniyeye kadar hızlanmaktadır. Batarya gerilimi çekilen akıma bağlı olarak belirli bir miktar düşmektedir. TİEM referans hızı PID ve BM denetleyicileri ile takip etmektedir, TİEM akımı kontrol edildiği için TİEM akımı artan hız ile birlikte artmaktadır. TİEM torku 15 N.m referans değerini ivme kaynaklı biraz aşmakta ancak daha sonra istenilen referansa gelmektedir. Onuncu saniyeden otuzuncu saniyeye kadar TİEM normal sürme devam etmektedir, TİEM hızı, akımı, torku, gerilimi, elektriksel güç ve mekanik güç sabit kalmaktadır. TİEM 25 km/sa sabit hız, 30 N.m yük altında iken 23 A akım çekmektedir. TİEM elektriksel gücü 1100 W olmaktadır ve 780 W mekanik güç elde edebilmektedir.

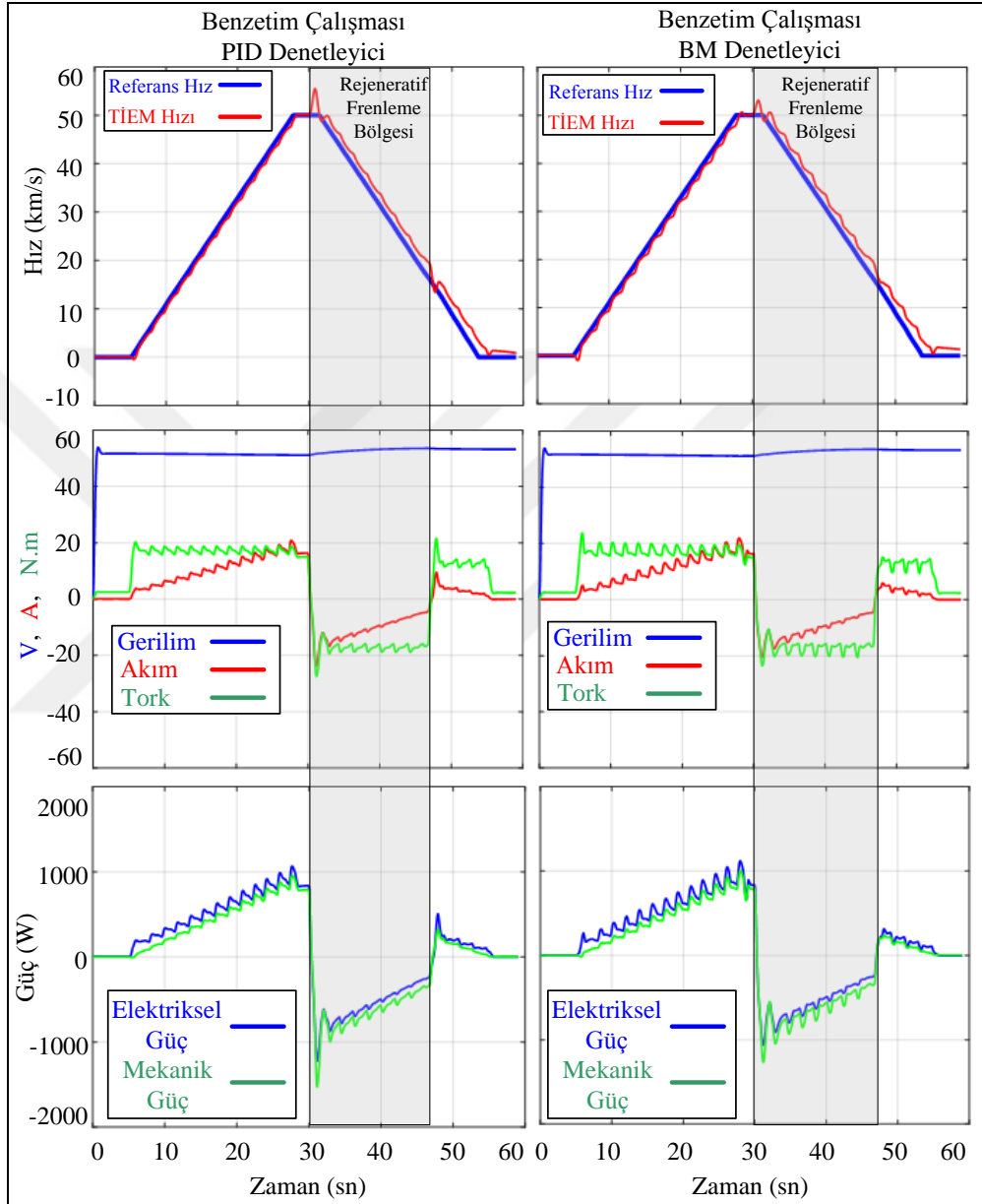
Otuzuncu saniyede TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş yapmaktadır. Normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş sırasında denetleyici değiştirildiği için iki saniye hızda dalgalanma görülmektedir. Geçiş sırasında PID denetleyici 36 km/sa hıza kadar çıkarken BM denetleyici 31 km/sa hıza çıkmaktadır.



Şekil 6.4. PID ve BM denetleyicilerinin 30 N.m yük altında, yamuk fonksiyonu hız referansı ile benzetim çalışması.

Otuz ikinci saniye ile ellinci saniye arasında TİEM rejeneratif frenleme yaparken PID ve BM denetleyiciler ile hızın sabitlenemediği, 27 km/sa hıza kadar çıktığı görülmektedir. Rejeneratif frenleme yaparken batarya gerilimi şarj olduğu için yükselmektedir. TİEM akımı negatif yönde bataryayı şarj etmektedir. TİEM 30 N.m negatif yük, 9 A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır. TİEM'e uygulanan güç 780 W iken TİEM'in elektriksel gücü negatif yönde 430 W'tır. Ellinci saniyeden itibaren referans hız düşmektedir fakat PID ve BM denetleyicileri TİEM rejeneratif

frenleme yaparken referans hıza ulaşamadığı görülmektedir. TİEM rejeneratif frenleme yaparken PID ve BM denetleyicilerinin 30 N.m yük altında 25 km/sa referans hıza sabitleyememeleri TİEM model parametreleri ile açıklanabilir.



Şekil 6.5. PID ve BM denetleyicilerinin 15 N.m yük altında, rampa fonksiyonu hız referansı ile benzetim çalışması.

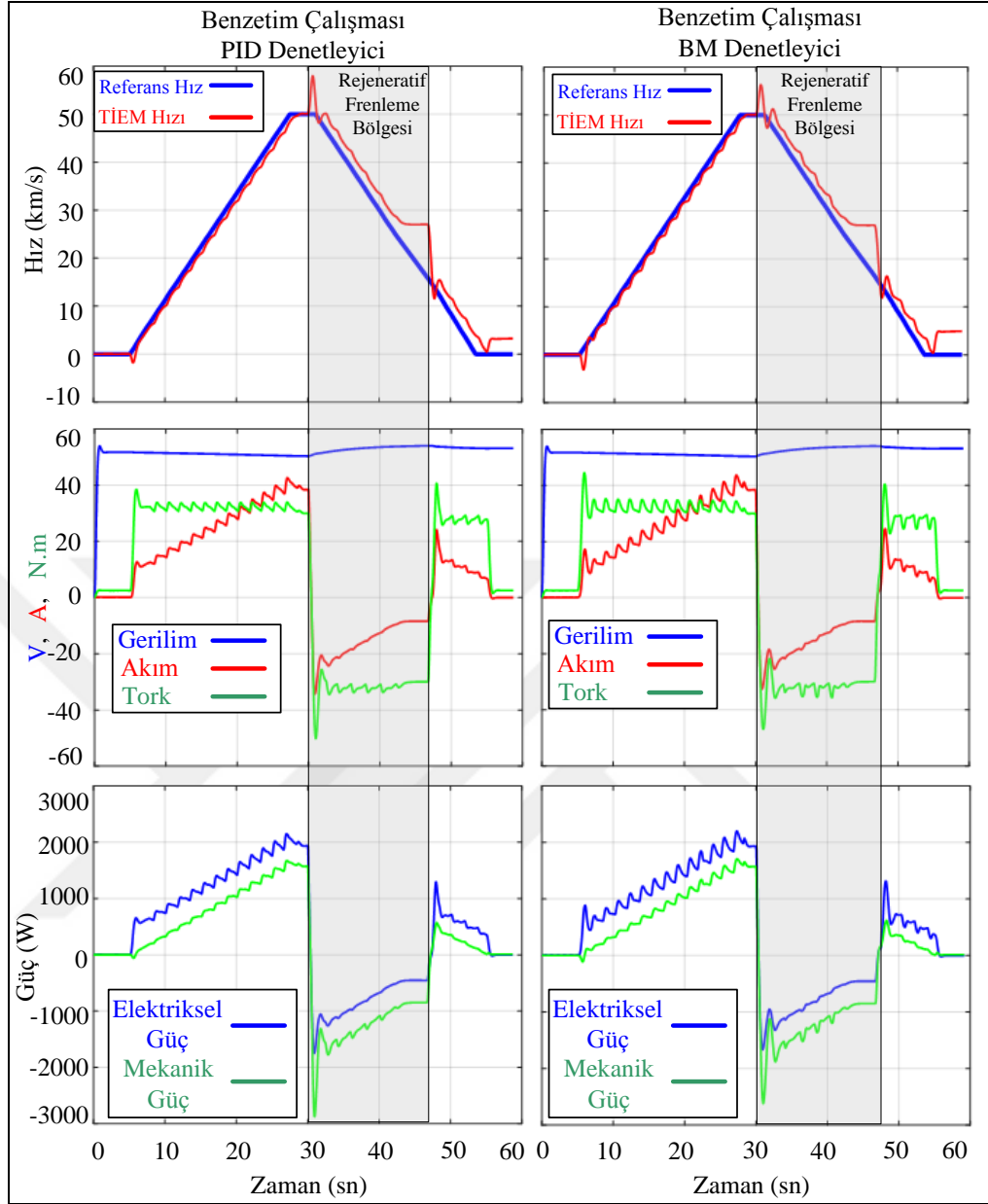
Normal sürme ve rejeneratif frenleme torku 15 N.m olarak ayarlanmış, PID ve BM denetleyicileri ve rampa fonksiyonu hız referansı ile benzetim çalışması sonuç grafikleri Şekil 6.5'te verilmektedir. TİEM beşinci saniyeden yirmi sekizinci saniyeye kadar hızlanmaktadır. TİEM referans hızı PID ve BM denetleyicileri ile takip

etmektedir, TİEM akımı kontrol edildiği için TİEM akımı artan hız ile birlikte artmaktadır. Batarya gerilimi çekilen akıma bağlı olarak belirli bir miktar düşmektedir. BM denetleyici akım ve tork dalgalanmasının PID denetleyiciden daha fazla olduğu görülmektedir. Elektriksel güç ve mekanik güçte artış olmaktadır. TİEM 50 km/sa hıza ulaştığında, 15 N.m yük altında iken 18 A akım çekmektedir. TİEM elektriksel gücü 860 W olmaktadır ve 800 W mekanik güç elde edebilmektedir.

Otuzuncu saniyede TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş yapmaktadır. Normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş sırasında denetleyici değiştirildiği için iki saniye hızda dalgalanma görülmektedir. Geçiş sırasında PID denetleyici 56 km/sa hıza kadar çıkarken BM denetleyici 53 km/sa hıza çıkmaktadır. Otuz ikinci saniyeden elli beşinci saniyeye kadar referans hız düşmekte ve TİEM rejeneratif frenleme ile referans hızı takip etmektedir. Rejeneratif frenleme hız sınırı olan 18 km/sa referans hıza kadar devam etmektedir. TİEM rejeneratif frenleme yaparken batarya gerilimi şarj olduğu için yükselmektedir,

TİEM akımı negatif yönde bataryayı şarj etmektedir. TİEM 15 N.m negatif yük, PID denetleyicide maksimum 25 A, BM denetleyicide maksimum 21 A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır. TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş anında TİEM'e uygulanan güç PID denetleyicide 1500 W, BM denetleyicide 1200 W olmaktadır. TİEM'in elektriksel gücü PID denetleyicide negatif yönde 1200 W, BM denetleyicide 1000 W'tır.

Normal sürme ve rejeneratif frenleme torku 30 N.m olarak ayarlanmış, PID ve BM denetleyicileri ve rampa fonksiyonu hız referansı ile benzetim çalışması sonuç grafikleri Şekil 6.6'da verilmektedir. TİEM beşinci saniyeden yirmi sekizinci saniyeye kadar hızlanmaktadır. TİEM referans hızı PID ve BM denetleyicileri ile takip etmektedir, TİEM akımı kontrol edildiği için TİEM akımı artan hız ile birlikte artmaktadır. Batarya gerilimi çekilen akıma bağlı olarak belirli bir miktar düşmektedir. BM denetleyici akım ve tork dalgalanmasının PID denetleyiciden daha fazla olduğu görülmektedir. Elektriksel güç ve mekanik güçte artış olmaktadır. TİEM 50 km/sa hıza ulaştığında, 30 N.m yük altında iken 40 A akım çekmektedir. TİEM elektriksel gücü 1920 W olmaktadır ve 1570 W mekanik güç elde edebilmektedir.



Şekil 6.6. PID ve BM denetleyicilerinin 30 N.m yük altında, rampa fonksiyon hız referansı ile benzetim çalışması.

Otuzuncu saniyede TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş yapmaktadır. Normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş sırasında denetleyici değiştirildiği için iki saniye hızda dalgalanma görülmektedir. Geçiş sırasında PID denetleyici 58 km/sa hıza kadar çıkarken BM denetleyici 56 km/sa hıza çıkmaktadır. TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş anında TİEM'e uygulanan güç PID denetleyicide 2900 W, BM denetleyicide 2500 W olmaktadır. TİEM'in elektriksel gücü PID denetleyicide negatif yönde 1800 W, BM denetleyicide

1500 W'tır. TİEM PID denetleyicide maksimum 37 A, BM denetleyicide maksimum 31 A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır. Otuz ikinci saniyeden elli beşinci saniyeye kadar referans hız düşmekte ve TİEM rejeneratif frenleme ile referans hız 28 km/sa hıza kadar takip etmektedir. TİEM 28 km/sa hızın altında 30 N.m tork üretmemekte ve referans hız azalmasına rağmen TİEM hızı sabit kalmaktadır. TİEM rejeneratif frenleme yaparken batarya gerilimi şarj olduğu için yükselmektedir, TİEM akımı negatif yönde bataryayı şarj etmektedir.

6.1.3. Benzetim Çalışmasında PID ve BM Denetleyici Karşılaştırması

PID ve BM denetleyicileri kullanılarak yamuk fonksiyonu ve rampa fonksiyonu referans hızları ile benzetim çalışması yapılmaktadır. TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme sırasında elde edilen PID ve BM denetleyici grafikleri birbirine çok yakın çıkmaktadır. Gözlem ile PID ve BM denetleyici arasındaki farklar anlaşılmamaktadır. Benzetim çalışması PID ve BM denetleyici sonuçları Çizelge 6.1'de verilmektedir. TİEM normal sürme mesafesi ve enerji harcaması, TİEM rejeneratif frenleme mesafesi ve enerji kazanımı, TİEM toplam mesafe ve toplam enerji harcaması görülmektedir. Elde edilen bu veriler ile 15 N.m ve 30 N.m yük altında PID, BM denetleyiciler kullanılarak yamuk fonksiyonu, rampa fonksiyonu referans hızlarında TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme sonuçları incelenebilmektedir. Sonuçlar ile kıyaslama yapabilmek için aynı referanslara sahip olmaları gerekir ancak sonuçlardan görüleceği üzere PID ve BM denetleyici sonuçları aynı referansa sahip değil. BM ve PID sonuçlarının kıyaslanabilmesi için Çizelge 6.2 verilmektedir.

Çizelge 6.2 ile benzetim çalışmasında elde edilen TİEM normal sürme mesafesi ve normal sürme referans mesafesi, rejeneratif frenleme mesafesi ve rejeneratif frenleme referans mesafesi, toplam TİEM mesafesi ve toplam referans mesafelerinin oranı verilmektedir. Elde edilen oranlar ile TİEM normal sürme, rejeneratif frenleme ve toplam mesafedeki sapmalar yüzde olarak verilmektedir. PID ve BM denetleyicileri ile 15 N.m ve 30 N.m için yamuk fonksiyonu ve rampa fonksiyonu referans hızlarındaki sapmalar Çizelge 6.2'de görülmektedir. Düşük sapma oranına sahip olan hücre koyu olarak işaretlenmektedir.

Çizelge 6.1. Benzetim çalışması PID ve BM denetleyici sonuçları.

PID ve BM Denetleyici Benzetim Sonuçları	Yamuk Fonksiyonu				Rampa Fonksiyonu			
	15 N.m		30 N.m		15 N.m		30 N.m	
Denetleyici	PID	BM	PID	BM	PID	BM	PID	BM
TİEM Normal Sürme Mesafesi (m)	170,54	171,58	174,96	176,56	210,29	210,14	212,28	214,09
TİEM Rejeneratif Frenleme Mesafesi (m)	150,21	149,16	159,53	157,97	176,36	175,94	182,67	181,15
TİEM Toplam Mesafe (m)	320,75	320,74	334,49	334,53	386,65	386,08	394,94	395,24
TİEM Normal Sürmede Harcanan Enerji (kJ)	11,65	11,60	32,87	32,96	16,12	16,00	39,85	39,57
TİEM Rejeneratif Frenlemede Kazanılan Enerji (kJ)	7,13	7,11	8,85	8,75	9,37	9,30	13,47	13,34
Toplam Harcanan Enerji (kJ)	4,52	4,49	24,02	24,21	6,75	6,70	26,38	26,23

Çizelge 6.2. Benzetim çalışması PID ve BM denetleyici karşılaştırması.

PID ve BM Denetleyici Karşılaştırması	Yamuk Fonksiyonu				Rampa Fonksiyonu			
	15 N.m		30 N.m		15 N.m		30 N.m	
Denetleyici	PID	BM	PID	BM	PID	BM	PID	BM
TİEM Normal Sürme Referans Mesafe (m)	165,251				208,2071			
TİEM Rejeneratif Frenleme Referans Mesafe (m)	147,249				166,7201			
TİEM Toplam Referans Mesafe (m)	312,500				374,9272			
Yük	15 N.m		30 N.m		15 N.m		30 N.m	
TİEM Normal Sürme Mesafe Sapması (%)	3,20	3,83	5,87	6,84	1,00	0,93	1,96	2,83
TİEM Rejeneratif Frenleme Mesafe Sapması (%)	2,01	1,30	8,34	7,28	5,78	5,53	9,56	8,66
Toplam Mesafe Sapması (%)	2,64	2,64	7,04	7,05	3,13	2,97	5,34	5,42
Harcanan Enerji (J) / Normal Sürme Mesafesi (m)	68,29	67,59	187,87	186,68	76,64	76,13	187,71	184,84
Kazanılan Enerji (J) / Rejeneratif Frenleme Mesafesi (m)	47,47	47,64	55,49	55,38	53,11	52,87	73,72	73,64
Toplam Enerji (J) / Gidilen Mesafe (m)	14,08	14,00	71,80	72,37	17,46	17,34	66,80	66,37

TİEM normal sürme ile harcanan enerjinin, normal sürme ile gidilen mesafeye oranı, TİEM rejeneratif frenleme ile toplanan enerjinin, rejeneratif frenlemeyle gidilen mesafeye oranı, toplam harcanan enerjinin toplam gidilen mesafeye oranı Çizelge 6.2’de verilmektedir. TİEM normal sürme ile harcanan enerjinin TİEM normal sürme ile gidilen mesafe oranı düşük olan hücre koyu olarak işaretlenmektedir. TİEM rejeneratif frenleme ile kazanılan enerjinin TİEM rejeneratif frenleme ile gidilen mesafe oranı yüksek olan hücre koyu olarak işaretlenmektedir. Deney boyunca harcanan toplam enerjinin toplam gidilen mesafeye oranı düşük olan hücre koyu olarak işaretlenmektedir.

Benzetim çalışması ile PID ve BM denetleyici karşılaştırılması yamuk fonksiyonu ve rampa fonksiyonu hız referansları ile 15 ve 30 N.m yükler için yapılmaktadır. Benzetim sonuçları ile BM denetleyicinin daha fazla koyu hücresi bulunmaktadır.

Çizelge 6.2 incelendiğinde PID ve BM denetleyici arasında kesin üstünlük olmadığını görülmektedir. Benzetim sonuçları PID ve BM denetleyici ile TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme deneylerinin yapılabildiği, BM denetleyicinin TİEM kontrolü için kullanılabilir olduğu görülmektedir.

6.2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

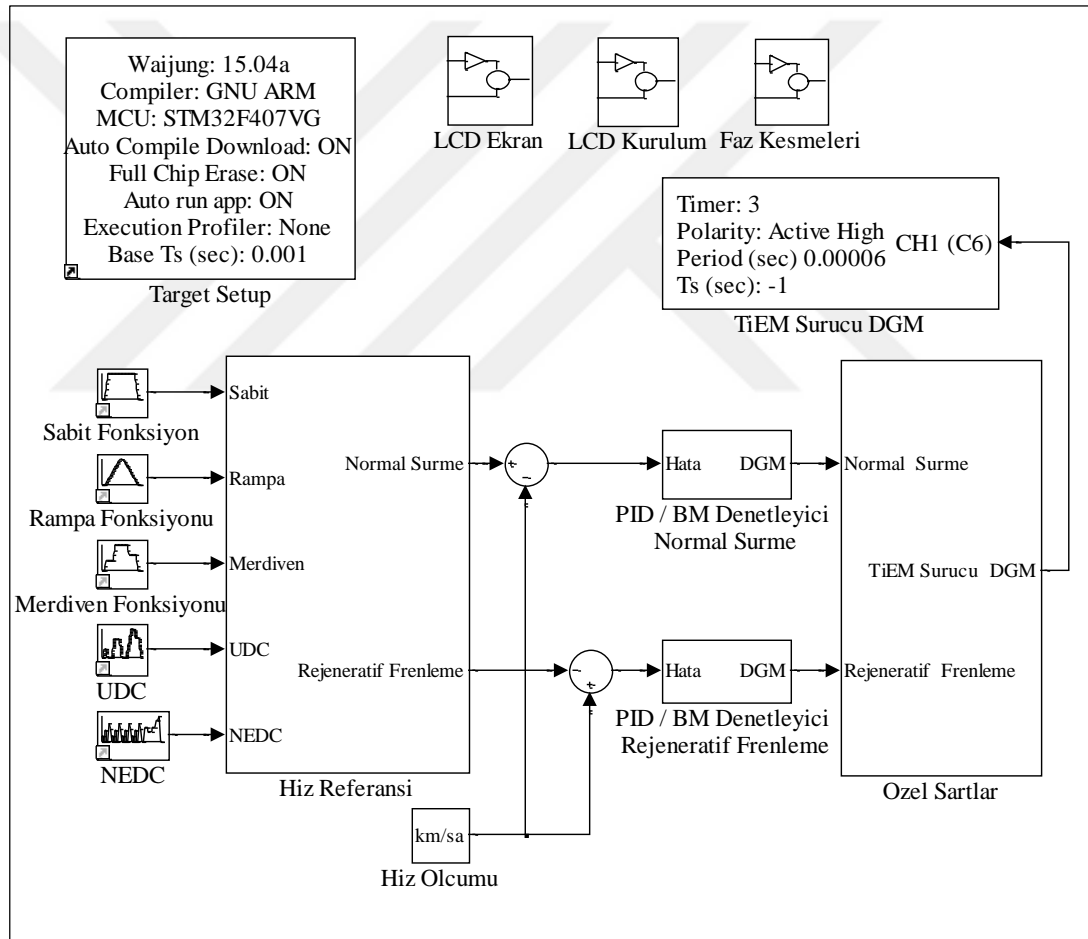
TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme deneysel çalışma için MATLAB/Simulink’te PID ve BM denetleyici kullanarak oluşturulan model gömülü sistem olarak STM32F4 Discovery karta yüklenmektedir. Oluşturulan modelin içerisinde yamuk fonksiyonu hız referansı, rampa fonksiyon hız referansı, merdiven fonksiyon hız referansı, UDC hız referansı ve ölçeklendirilmiş NEDC hız referansı bulunmaktadır. Yapılacak deneyin hız referansı ve denetleyici seçilerek deneysel çalışma yapılmaktadır.

Deneysel çalışmada TİEM normal sürme ve TİEM rejeneratif frenleme için aynı yükler kullanılmaktadır. TİEM 15 N.m ve 30 N.m yükler ile yüklenerek deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Deneysel çalışma içinde PID ve BM denetleyicileri ön sürüş çevrim hız referansları ile karşılaştırılmaktadır. BM denetleyici kullanarak standart

sürüş çevrim hız referansları deneysel çalışması yapılmaktadır. Deneysel çalışma ile referans hız, TİEM hızı, batarya gerilimi, batarya akımı, TİEM torku, elektriksel güç ve mekanik güç grafikleri elde edilmektedir.

6.2.1. Gömülü Sistem Modelleri

Deneysel çalışmada kullanılan TİEM sürücünün üzerinde STM32F4 Discovery kart bulunmaktadır. Bu kart MATLAB/Simulink ile gömülü sistem çalışmayı desteklemektedir. Şekil 6.7’de TİEM sürücüyü gömülen model görülmektedir.



Şekil 6.7. TİEM sürücü gömülü sistem modeli.

Gömülü sistemi çalıştırmak için MATLAB/Simulink’e bir Waijung isimli araç kutusunun yüklenmesi gerekmektedir. Waijung araç kutusu internetten ücretsiz temin edilebilmektedir. Sürüş çevrim referans hız fonksiyonları, normal sürme ve rejeneratif

frenleme için PID ve BM denetleyici, TİEM akım, gerilim, sıcaklık ölçümlerinin rejeneratif frenleme için özel şartları, TİEM sürücünün DGM ile kontrol edilmesi, LCD ekran ayarları, TİEM faz seçimi için kesme kullanımı gömülü sistem modeli ile gerçekleştirilmektedir. Gömülü sistem örnekleme zamanı 1 msn, PID ve BM denetleyicileri örnekleme zamanı 10 msn'dir.

TİEM normal sürme için referans hız değerinden TİEM hızı çıkarılarak hata değeri üretilir. TİEM rejeneratif frenleme için TİEM hızından referans hız değeri çıkarılarak hata değeri üretilmektedir. PID ve BM denetleyicilerin çıkışlarında DGM etkin değeri elde edilir. Rejeneratif frenleme algoritması için gerekli olan akım, gerilim ve sıcaklık şartları kontrol edilerek TİEM'in çalışması sağlanmaktadır. TİEM'in faz seçimleri faz kesmeleri ile belirlenmektedir.

Deneysel çalışmalarda TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş sırasında TİEM sürücü ve DAEM sürücünün koruması amaçlı 100 msn gecikme yapılmaktadır. Geçiş anında TİEM normal sürme çıkışı ve jeneratör çıkışı sıfırlanmakta, DAEM sürücü kontaktörleri yer değiştirerek jeneratör konumundan motoru konumuna geçmekte, 100 msn sonra TİEM rejeneratif frenleme yaparken, DAEM motor olarak TİEM'e tahrik vermeye başlamaktadır. Bu işlem olurken TİEM devri bir miktar düşmektedir ve rejeneratif frenleme istenilen referansın altında bir değerle başlamaktadır. Bu durum çok kısa süreliğine osilasyona sebep olmaktadır ve TİEM rejeneratif frenleme yaparken hız çıkışı istenilen referans seviyesine bir ya da iki saniye içerisinde gelmektedir.

TİEM rejeneratif frenlemeden normal sürmeye geçiş sırasında TİEM sürücü ve DAEM sürücünün korunması için 100 msn gecikme yapılmaktadır. Geçiş anında TİEM rejeneratif çıkışı ve DAEM çıkışı sıfırlanmakta, DAEM sürücü kontaktörleri yer değiştirerek motor konumundan jeneratör konumuna geçmekte, 100 msn sonra TİEM normal sürülürken, DAEM jeneratör çalışmaktadır. Bu geçiş anı çok kısa süreliğine osilasyona sebep olmaktadır ve TİEM normal sürülürken hız çıkışı istenilen referans seviyesine bir ya da iki saniye içerisinde gelmektedir.

Benzetim çalışmasında olduğu gibi TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye

geçerken denetleyici değiştirildiği için ön DGM değeri ile denetleyicinin referansa daha hızlı gelmesi sağlanmaktadır. TIEM normal sürmeden TIEM rejeneratif frenlemeye geçerken ön DGM değeri için Eşitlik 6.1'deki denklem kullanılmaktadır. TIEM rejeneratif frenlemeden normal sürmeye geçerken ön DGM değeri için Eşitlik 6.2'deki denklem kullanılmaktadır.

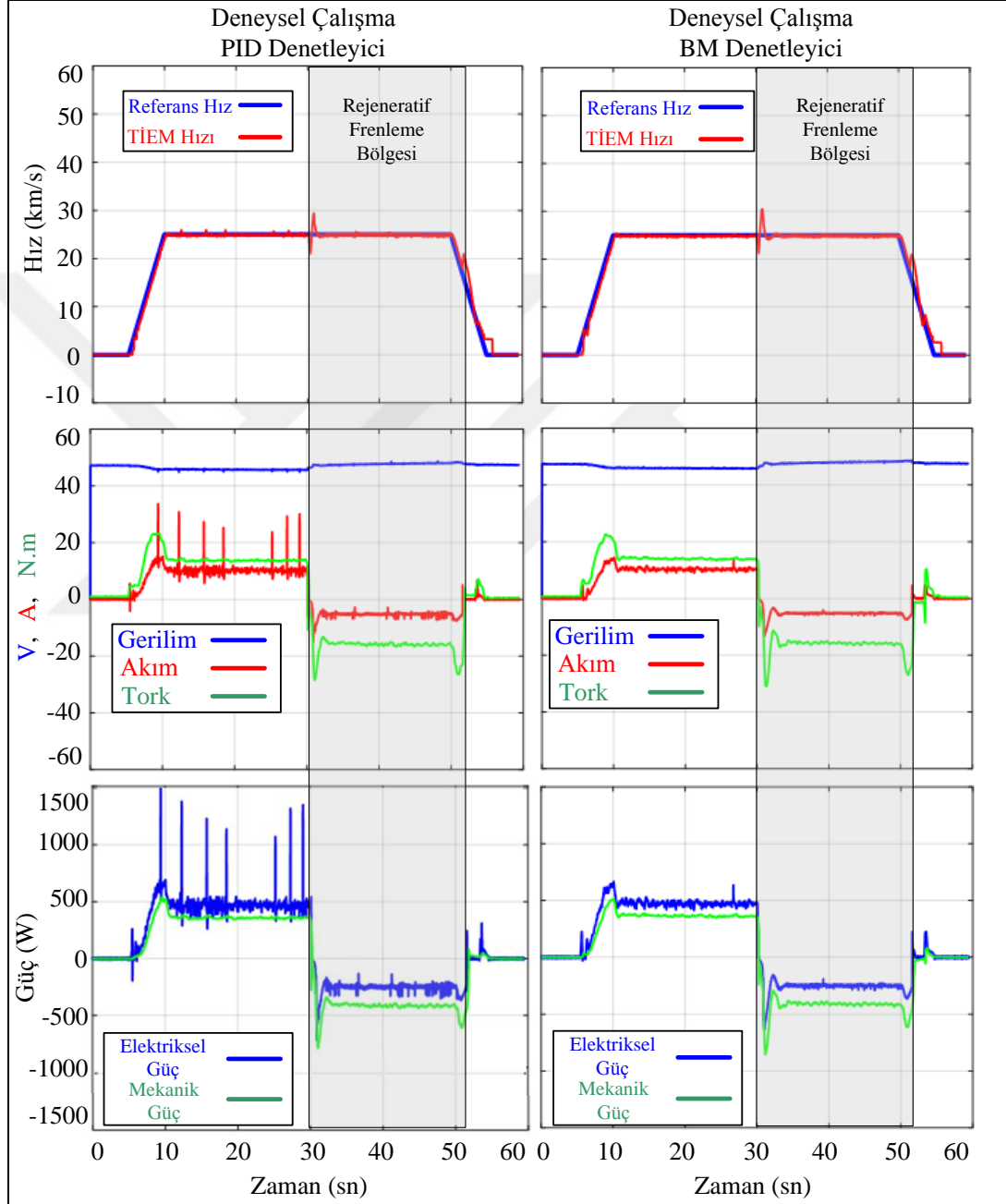
6.2.2. Ön Test Sürüş Çevrim Hız Referansları ile Deneysel Çalışmalar

Normal sürme ve rejeneratif frenleme torku 15 N.m olarak ayarlanmış, PID ve BM denetleyicileri ve yamuk fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışma sonuç grafikleri Şekil 6.8'de verilmektedir. TIEM beşinci saniyeden onuncu saniyeye kadar hızlanmaktadır. Batarya gerilimi çekilen akıma bağlı olarak belirli bir miktar düşmektedir. TIEM referans hızı PID ve BM denetleyicileri ile takip etmektedir, TIEM akımı kontrol edildiği için TIEM akımı artan hız ile birlikte artmaktadır. TIEM torku 15 N.m referans değerini ivme ve DAEM'in de kontrol edilmesinden dolayı aşmakta ancak daha sonra istenilen referansa gelmektedir. Elektriksel güç ve mekanik güçte akım ve torkun artması ile artış olmaktadır.

Onuncu saniyeden otuzuncu saniyeye kadar TIEM normal sürme devam etmektedir, TIEM hızı, akımı, torku, gerilimi, elektriksel güç ve mekanik güç sabit kalmaktadır. TIEM 25 km/sa sabit hız, 15 N.m yük altında iken 10,5 A akım çekmektedir. TIEM elektriksel gücü 510 W olmaktadır ve 390 W mekanik güç elde edebilmektedir. PID denetleyici akım, tork dalgalanmasının ve ani akım sıçramalarının BM denetleyiciden daha fazla olduğu görülmektedir.

Otuzuncu saniyede TIEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş yapmaktadır. Normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş sırasındaki gecikme ve denetleyici değiştirildiği için iki saniye hızda dalgalanma görülmektedir. Geçiş sırasında PID denetleyici 30 km/sa hıza kadar çıkarken BM denetleyici 31 km/sa hıza çıkmaktadır. Otuz ikinci saniye ile ellinci saniye arasında TIEM sabit hızda rejeneratif frenleme yaparken batarya gerilimi şarj olduğu için yükselmektedir, TIEM akımı negatif yönde bataryayı şarj etmektedir. TIEM 15 N.m negatif yük, 5 A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır. PID denetleyici akım ve tork dalgalanmasının BM denetleyiciden daha

fazla olduğu görülmektedir. TİEM'e uygulanan güç 400 W iken TİEM'in elektriksel gücü negatif yönde 250 W'tır. Ellinci saniyeden itibaren referans hız düşmektedir. Rejeneratif frenleme hız sınırı olan 18 km/sa referans hıza kadar devam etmektedir. TİEM 18 km/sa hızın altında rejeneratif frenlemeden normal sürmeye geçmektedir.



Şekil 6.8. PID ve BM denetleyicilerinin 15 N.m yük altında, yamuk fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışması.

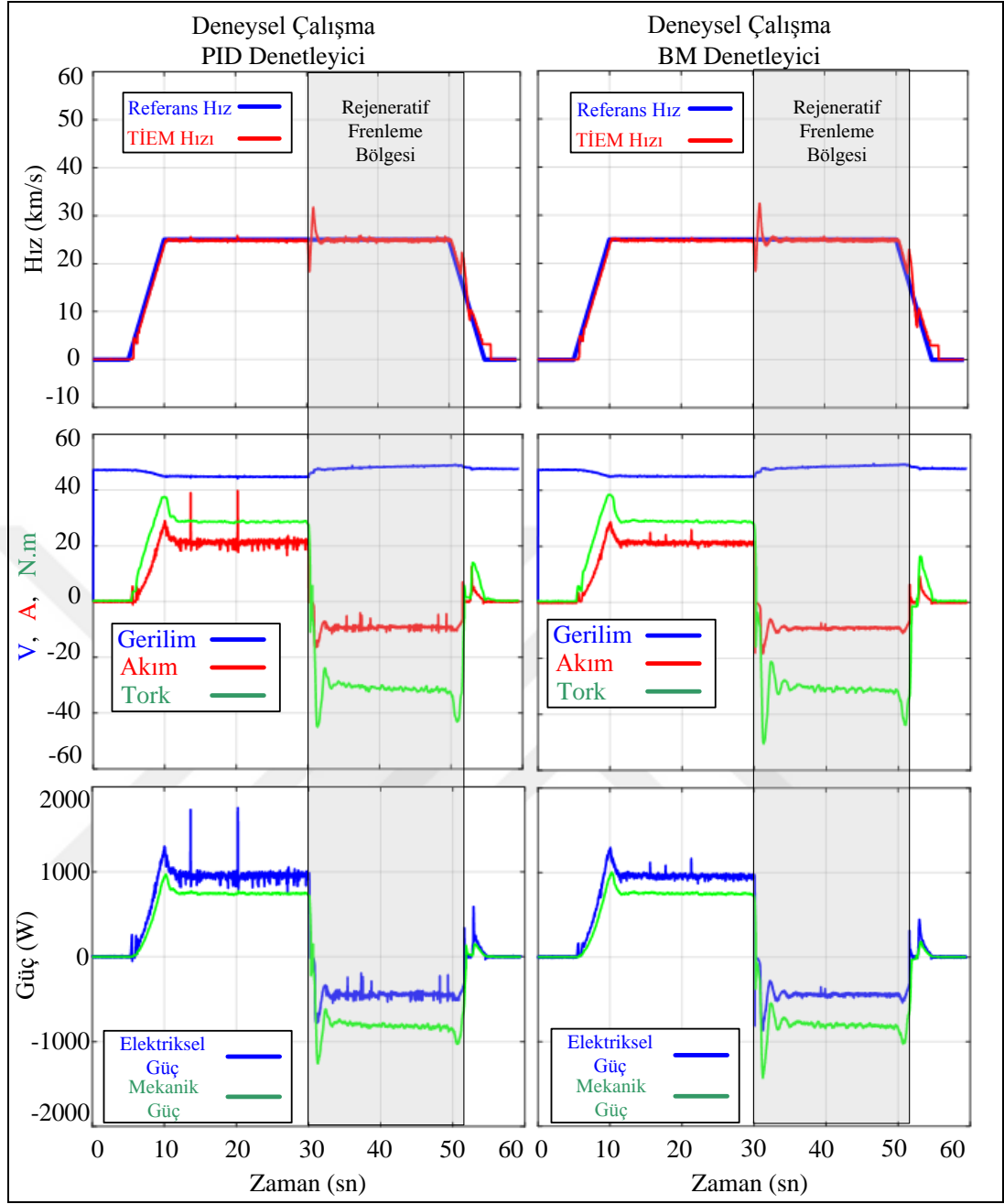
Normal sürme ve rejeneratif frenleme torku 30 N.m olarak ayarlanmış, PID ve BM denetleyicileri ve yamuk fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışma sonuç grafikleri Şekil 6.9'da verilmektedir. TIEM beşinci saniyeden onuncu saniyeye kadar hızlanmaktadır. Batarya gerilimi çekilen akıma bağlı olarak belirli bir miktar düşmektedir. TIEM referans hızı PID ve BM denetleyicileri ile takip etmektedir, TIEM akımı kontrol edildiği için TIEM akımı artan hız ile birlikte artmaktadır. TIEM torku 30 N.m referans değerini ivme ve DAEM'in de kontrol edilmesinden dolayı aşmakta ancak daha sonra istenilen referansa gelmektedir. Elektriksel güç ve mekanik güçte akım ve torkun artması ile artış olmaktadır.

Onuncu saniyeden otuzuncu saniyeye kadar TIEM normal sürme devam etmektedir, TIEM hızı, akımı, torku, gerilimi, elektriksel güç ve mekanik güç sabit kalmaktadır. TIEM 25 km/sa sabit hız, 30 N.m yük altında iken 21 A akım çekmektedir. TIEM elektriksel gücü 1000 W olmaktadır ve 780 W mekanik güç elde edebilmektedir. PID denetleyici akım, tork dalgalanmasının ve ani akım sıçramalarının BM denetleyiciden daha fazla olduğu görülmektedir.

Otuzuncu saniyede TIEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş yapmaktadır. Normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş sırasındaki gecikme ve denetleyici değiştirildiği için iki saniye hızda dalgalanma görülmektedir. Geçiş sırasında PID denetleyici 32 km/sa hıza kadar çıkarken BM denetleyici 33 km/sa hıza çıkmaktadır.

Otuz ikinci saniye ile ellinci saniye arasında TIEM sabit hızda rejeneratif frenleme yaparken batarya gerilimi şarj olduğu için yükselmektedir, TIEM akımı negatif yönde bataryayı şarj etmektedir. TIEM 30 N.m negatif yük, 9,5 A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır.

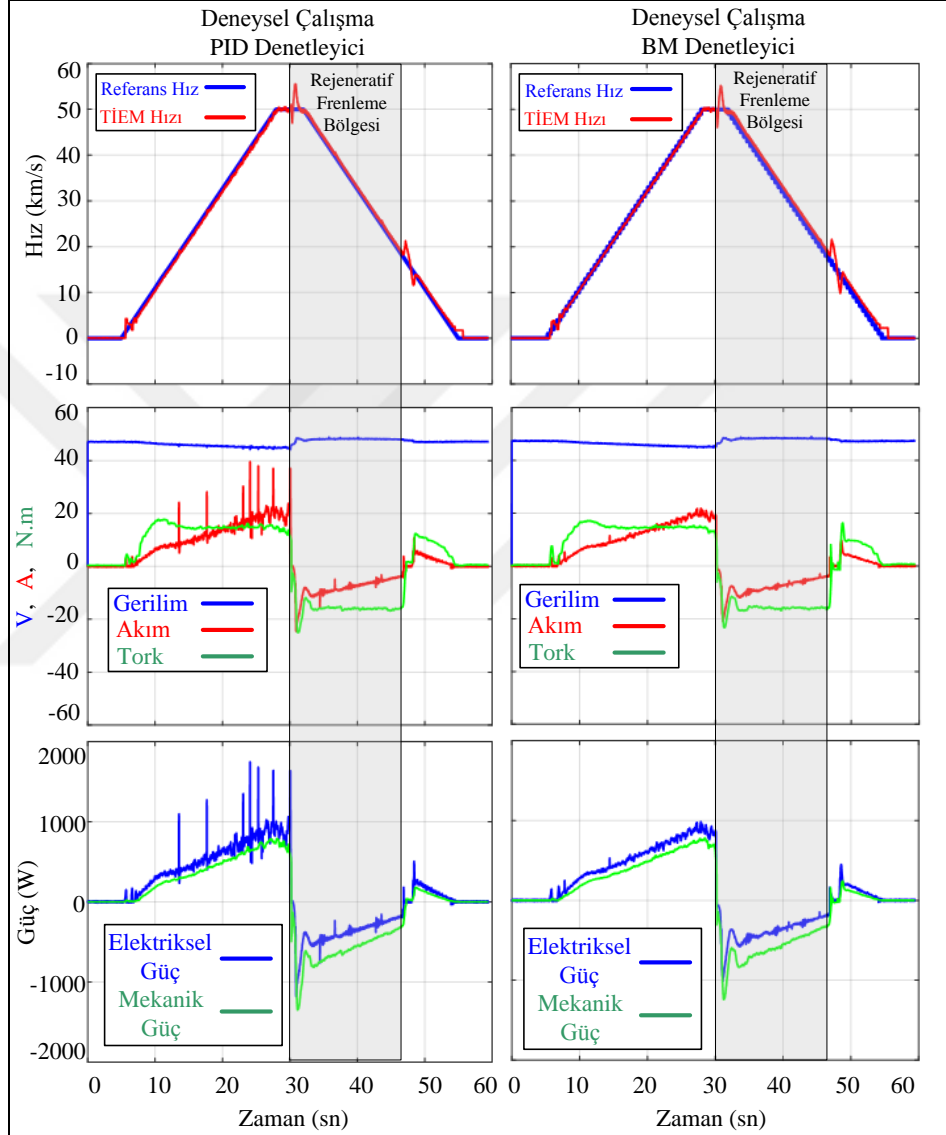
PID denetleyici akım ve tork dalgalanmasının BM denetleyiciden daha fazla olduğu görülmektedir. TIEM'e uygulanan güç 780 W iken TIEM'in elektriksel gücü negatif yönde 460 W'tır. Ellinci saniyeden itibaren referans hız düşmektedir. Rejeneratif frenleme hız sınırı olan 18 km/sa referans hıza kadar devam etmektedir. TIEM 18 km/sa hızın altında rejeneratif frenlemeden normal sürmeye geçmektedir.



Şekil 6.9. PID ve BM denetleyicilerinin 30 N.m yük altında, yamuk fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışması.

Normal sürme ve rejeneratif frenleme torku 15 N.m olarak ayarlanmış, PID ve BM denetleyicileri ve rampa fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışma sonuç grafikleri Şekil 6.10'da verilmektedir. TIEM beşinci saniyeden yirmi sekizinci saniyeye kadar hızlanmaktadır. TIEM referans hızı PID ve BM denetleyicileri ile takip etmektedir, TIEM akımı kontrol edildiği için TIEM akımı artan hız ile birlikte artmaktadır. Batarya gerilimi çekilen akıma bağlı olarak belirli bir miktar düşmektedir. PID denetleyici

akım, tork dalgalanmasının ve ani akım sıçramalarının BM denetleyiciden daha fazla olduğu görülmektedir. Elektriksel güç ve mekanik güçte artış olmaktadır. TIEM 50 km/sa hıza ulaştığında, 15 N.m yük altında iken 19 A akım çekmektedir. TIEM elektriksel gücü 912 W olmaktadır ve 780 W mekanik güç elde edebilmektedir.



Şekil 6.10. PID ve BM denetleyicilerinin 15 N.m yük altında, rampa fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışması.

Otuzuncu saniyede TIEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş yapmaktadır. Normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş sırasındaki gecikme ve denetleyici değiştirildiği için iki saniye hızda dalgalanma görülmektedir. Geçiş sırasında PID denetleyici 55 km/sa hıza kadar çıkarken BM denetleyici 56 km/sa hıza çıkmaktadır.

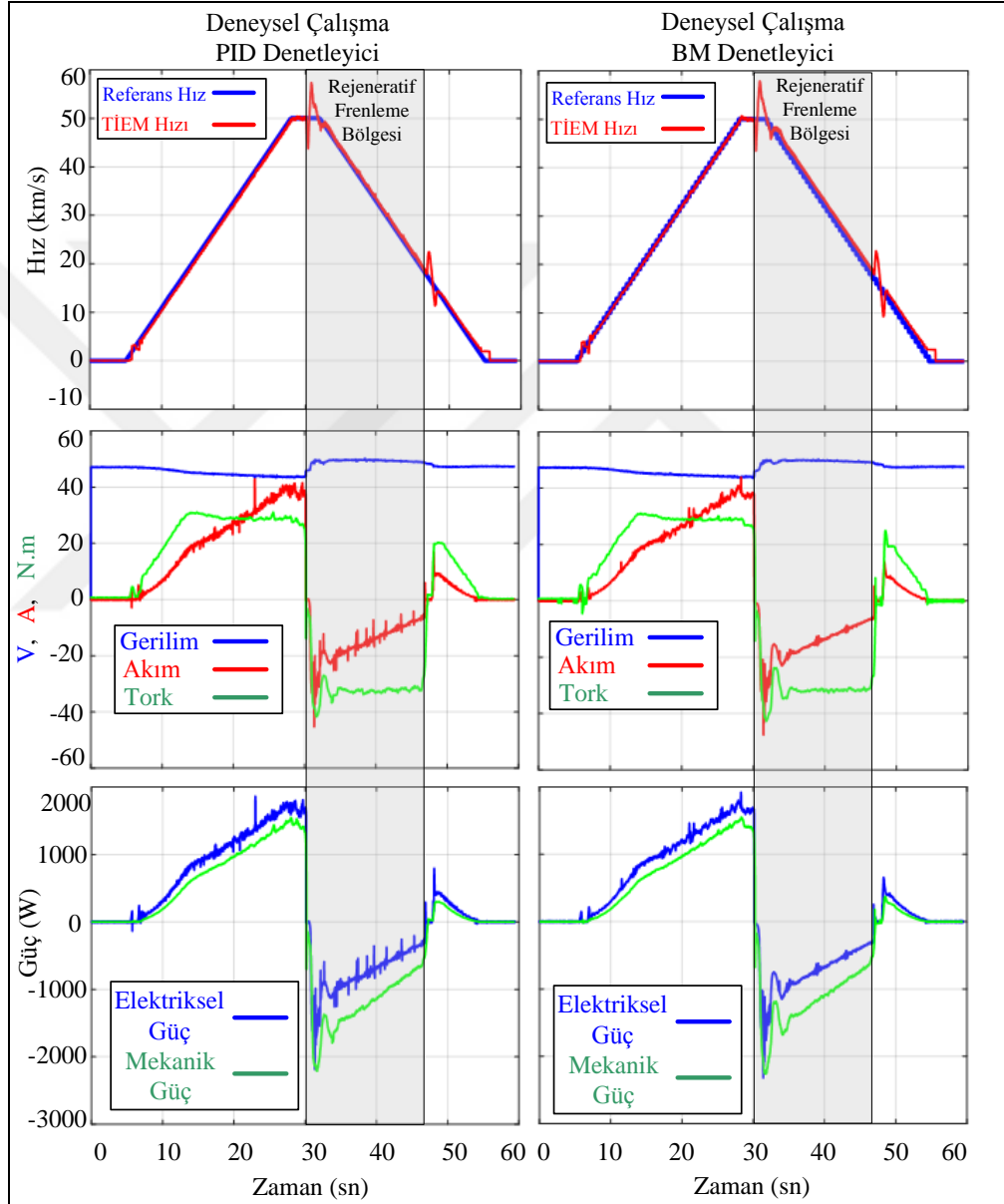
Otuz ikinci saniyeden elli beşinci saniyeye kadar referans hız düşmekte ve TİEM rejeneratif frenleme ile referans hızı takip etmektedir. Rejeneratif frenleme hız sınırı olan 18 km/sa referans hıza kadar devam etmektedir. TİEM rejeneratif frenleme yaparken batarya gerilimi şarj olduğu için yükselmektedir, TİEM akımı negatif yönde bataryayı şarj etmektedir. TİEM 15 N.m negatif yük, PID denetleyici ile maksimum 25A, BM denetleyici ile maksimum 21A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır. PID denetleyici akım, tork dalgalanmasının ve ani akım sıçramalarının BM denetleyiciden daha fazla olduğu görülmektedir. TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş anında TİEM'e uygulanan güç PID denetleyicide 1350 W, BM denetleyicide 1200 W olmaktadır. TİEM'in elektriksel gücü PID denetleyicide negatif yönde 1200 W, BM denetleyicide 1000 W'tır.

Normal sürme ve rejeneratif frenleme torku 30 N.m olarak ayarlanmış, PID ve BM denetleyicileri ve rampa fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışma sonuç grafikleri Şekil 6.11'de verilmektedir. TİEM beşinci saniyeden yirmi sekizinci saniyeye kadar hızlanmaktadır. TİEM referans hızı PID ve BM denetleyicileri ile takip etmektedir, TİEM akımı kontrol edildiği için TİEM akımı artan hız ile birlikte artmaktadır. Batarya gerilimi çekilen akıma bağlı olarak belirli bir miktar düşmektedir.

PID denetleyici akım, tork dalgalanmasının ve ani akım sıçramalarının BM denetleyiciden daha fazla olduğu görülmektedir. Elektriksel güç ve mekanik güçte artış olmaktadır. TİEM 50 km/sa hıza ulaştığında, 30 N.m yük altında iken 38 A akım çekmektedir. TİEM elektriksel gücü 1800 W olmaktadır ve 1550 W mekanik güç elde edebilmektedir.

Otuzuncu saniyede TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş yapmaktadır. Normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş sırasındaki gecikme ve denetleyici değiştirildiği için iki saniye hızda dalgalanma görülmektedir. Geçiş sırasında PID denetleyici 58 km/sa hıza kadar çıkarken BM denetleyici 59 km/sa hıza çıkmaktadır. Otuz ikinci saniyeden elli beşinci saniyeye kadar referans hız düşmekte ve TİEM rejeneratif frenleme ile referans hızı takip etmektedir. Rejeneratif frenleme hız sınırı olan 18 km/sa referans hıza kadar devam etmektedir. TİEM rejeneratif frenleme yaparken batarya gerilimi şarj olduğu için yükselmektedir, TİEM akımı negatif yönde

bataryayı şarj etmektedir. TİEM 30 N.m negatif yük, maksimum 42 A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır. PID denetleyici akım, tork dalgalanmasının ve ani akım sıçramalarının BM denetleyiciden daha fazla olduğu görülmektedir. TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş anında TİEM'e uygulanan güç 2200 W olmaktadır. TİEM'in elektriksel gücü negatif yönde 2000 W'tır.



Şekil 6.11. PID ve BM denetleyicilerinin 30 N.m yük altında, rampa fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışması.

Normal sürme ve rejeneratif frenleme torku 15 N.m olarak ayarlanmış, PID ve BM denetleyicileri ve merdiven fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışma sonuç

grafikleri Şekil 6.12’de verilmektedir. TİEM beşinci saniyeden yedinci saniyeye kadar 20 km/sa hıza çıkmaktadır. TİEM referans hızı PID ve BM denetleyicileri ile takip etmektedir, TİEM akımı kontrol edildiği için TİEM akımı artan hız ile birlikte artmaktadır. TİEM torku 15 N.m referans değerini ivme ve DAEM’in de kontrol edilmesinden dolayı aşmakta ancak daha sonra istenilen referansa gelmektedir. Batarya gerilimi çekilen akıma bağlı olarak belirli bir miktar düşmektedir. Elektriksel güç ve mekanik güçte akım ve torkun artması ile artış olmaktadır.

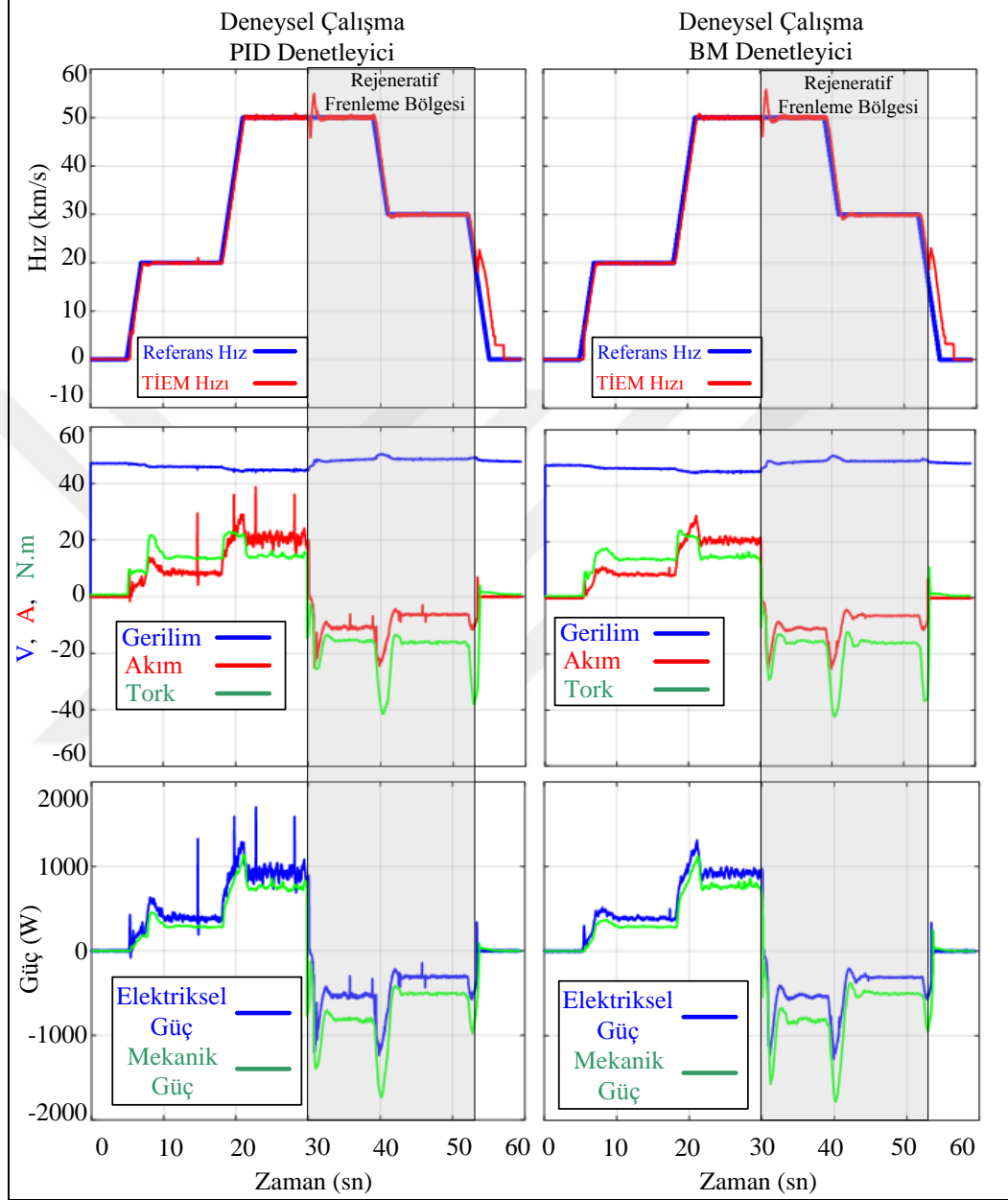
Yedinci saniyeden on sekizinci saniyeye kadar TİEM referans hızı 20 km/sa hızda sabit kalmaktadır. TİEM 9 A akım çekmektedir, TİEM elektriksel gücü 430 W, mekanik gücü 310 W olmaktadır. PID denetleyici akım, tork dalgalanmasının ve ani akım sıçramalarının BM denetleyiciden daha fazla olduğu görülmektedir.

TİEM on sekizinci saniyeden yirmi birinci saniyeye kadar 20 km/sa hızdan 50 km/sa hıza çıkmaktadır. TİEM referans hızı PID ve BM denetleyicileri ile takip etmektedir, TİEM akımı kontrol edildiği için TİEM akımı artan hız ile birlikte artmaktadır. TİEM torku 15 N.m referans değerini ivme ve DAEM’in de kontrol edilmesinden dolayı aşmakta ancak daha sonra istenilen referansa gelmektedir. Batarya gerilimi çekilen akıma bağlı olarak belirli bir miktar düşmektedir. Elektriksel güç ve mekanik güçte akım ve torkun artması ile artış olmaktadır.

Yirmi birinci saniyeden otuzuncu saniyeye kadar TİEM referans hızı 50 km/sa hızda sabit kalmaktadır. TİEM 20 A akım çekmektedir, TİEM elektriksel gücü 980 W, mekanik gücü 780 W olmaktadır. PID denetleyici akım, tork dalgalanmasının ve ani akım sıçramalarının BM denetleyiciden daha fazla olduğu görülmektedir.

Otuzuncu saniyede TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş yapmaktadır. Normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş sırasındaki gecikme ve denetleyici değiştirildiği için iki saniye hızda dalgalanma görülmektedir. Geçiş sırasında PID denetleyici 55 km/sa hıza kadar çıkarken BM denetleyici 56 km/sa hıza çıkmaktadır. Otuz ikinci saniyeden otuz dokuzuncu saniyeye kadar referans hız 50 km/sa hızda sabit kalmaktadır. TİEM 15 N.m negatif yük, 9,5 A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır. PID denetleyici akım ve tork dalgalanmasının BM denetleyiciden daha

fazla olduğu görülmektedir. TİEM'e uygulanan güç 780 W iken TİEM'in elektriksel gücü negatif yönde 460 W'tır.



Şekil 6.12. PID ve BM denetleyicilerinin 15 N.m yük altında, merdiven fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışması.

Otuz dokuzuncu saniyeden kırk birinci saniyeye kadar TİEM referans hızı 50 km/sa hızdan 30 km/sa hıza inmektedir. TİEM torku negatif yönde 15 N.m referans değerini ivme ve DAEM'in de kontrol edilmesinden dolayı aşmakta ancak daha sonra istenilen referansa gelmektedir.

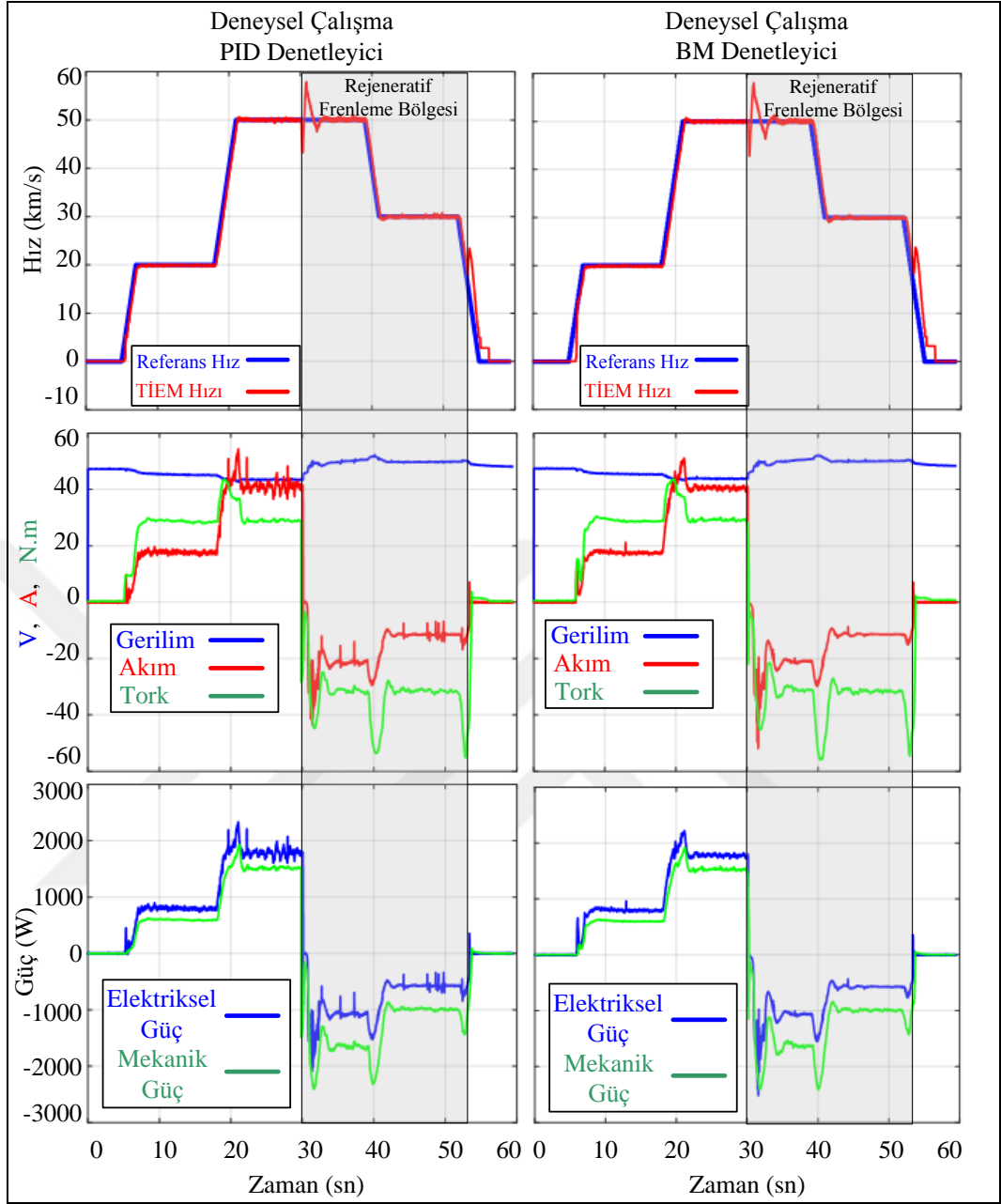
Kırk birinci saniyeden elli ikinci saniyeye kadar TİEM referans hızı 30 km/sa hızda sabit kalmaktadır. TİEM 15 N.m negatif yük, 6 A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır. PID denetleyici akım ve tork dalgalanmasının BM denetleyiciden daha fazla olduğu görülmektedir. TİEM'e uygulanan güç 480 W iken TİEM'in elektriksel gücü negatif yönde 300 W'tır.

Elli ikinci saniyeden elli beşinci saniyeye kadar TİEM referans hızı 30 km/sa hızdan 0 km/sa hıza inmektedir. TİEM torku negatif yönde 15 N.m referans değerini ivme ve DAEM'in de kontrol edilmesinden dolayı aşmaktadır. TİEM hızı rejeneratif frenleme hız sınırı olan 18 km/sa hıza ulaştığında TİEM rejeneratif frenlemeden normal sürmeye geçmektedir.

Normal sürme ve rejeneratif frenleme torku 30 N.m olarak ayarlanmış, PID ve BM denetleyicileri ve merdiven fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışma sonuç grafikleri Şekil 6.13'te verilmektedir. TİEM beşinci saniyeden yedinci saniyeye kadar 20 km/sa hıza çıkmaktadır. TİEM referans hızı PID ve BM denetleyicileri ile takip etmektedir, TİEM akımı kontrol edildiği için TİEM akımı artan hız ile birlikte artmaktadır. Batarya gerilimi çekilen akıma bağlı olarak belirli bir miktar düşmektedir. Elektriksel güç ve mekanik güçte akım ve torkun artması ile artış olmaktadır.

Yedinci saniyeden on sekizinci saniyeye kadar TİEM referans hızı 20 km/sa hızda sabit kalmaktadır. TİEM 18 A akım çekmektedir, TİEM elektriksel gücü 860 W, mekanik gücü 620 W olmaktadır. PID denetleyici akım, tork dalgalanmasının ve ani akım sıçramalarının BM denetleyiciden daha fazla olduğu görülmektedir.

TİEM on sekizinci saniyeden yirmi birinci saniyeye kadar 20 km/sa hızdan 50 km/sa hıza çıkmaktadır. TİEM referans hızı PID ve BM denetleyicileri ile takip etmektedir, TİEM akımı kontrol edildiği için TİEM akımı artan hız ile birlikte artmaktadır. TİEM torku 30 N.m referans değerini ivme ve DAEM'in de kontrol edilmesinden dolayı aşmakta ancak daha sonra istenilen referansa gelmektedir. Batarya gerilimi çekilen akıma bağlı olarak belirli bir miktar düşmektedir. Elektriksel güç ve mekanik güçte akım ve torkun artması ile artış olmaktadır.



Şekil 6.13. PID ve BM denetleyicilerinin 30 N.m yük altında, merdiven fonksiyonu hız referansı ile deneysel çalışması.

Yirmi birinci saniyeden otuzuncu saniyeye kadar TİEM referans hızı 50 km/sa hızda sabit kalmaktadır. TİEM 40 A akım çekmektedir, TİEM elektriksel gücü 1800 W, mekanik gücü 1550 W olmaktadır. PID denetleyici akım, tork dalgalanmasının ve ani akım sıçramalarının BM denetleyiciden daha fazla olduğu görülmektedir.

Otuzuncu saniyede TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş yapmaktadır. Normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş sırasındaki gecikme ve denetleyici

değiştirildiği için beş saniye hızda dalgalanma görülmektedir. Geçiş sırasında PID denetleyici 58 km/sa hıza kadar çıkarken BM denetleyici 59 km/sa hıza çıkmaktadır. Otuz beşinci saniyeden otuz dokuzuncu saniyeye kadar referans hız 50 km/sa hızda sabit kalmaktadır. TİEM 30 N.m negatif yük, 20 A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır. PID denetleyici akım ve tork dalgalanmasının BM denetleyiciden daha fazla olduğu görülmektedir. TİEM'e uygulanan güç 1560 W iken TİEM'in elektriksel gücü negatif yönde 1000 W'tır.

Otuz dokuzuncu saniyeden kırk birinci saniyeye kadar TİEM referans hızı 50 km/sa hızdan 30 km/sa hıza inmektedir. TİEM torku negatif yönde 30 N.m referans değerini ivme ve DAEM'in de kontrol edilmesinden dolayı aşmakta ancak daha sonra istenilen referansa gelmektedir.

Kırk birinci saniyeden elli ikinci saniyeye kadar TİEM referans hızı 30 km/sa hızda sabit kalmaktadır. TİEM 30 N.m negatif yük, 12 A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır. PID denetleyici akım ve tork dalgalanmasının BM denetleyiciden daha fazla olduğu görülmektedir. TİEM'e uygulanan güç 1000 W iken TİEM'in elektriksel gücü negatif yönde 600 W'tır. Elli ikinci saniyeden elli beşinci saniyeye kadar TİEM referans hızı 30 km/sa hızdan 0 km/sa hıza inmektedir. TİEM torku negatif yönde 30 N.m referans değerini ivme ve DAEM'in de kontrol edilmesinden dolayı aşmaktadır. TİEM hızı rejeneratif frenleme hız sınırı olan 18 km/sa hıza ulaştığında TİEM rejeneratif frenlemeden normal sürmeye geçmektedir.

6.2.3. Deneysel Çalışmalarda PID ve BM Denetleyici Karşılaştırması

PID ve BM denetleyicileri kullanılarak yamuk fonksiyonu, rampa fonksiyonu ve merdiven fonksiyonu referans hızları ile deneysel çalışma yapılmaktadır. TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme sırasında elde edilen PID ve BM denetleyici TİEM hız grafikleri birbirine çok yakın çıkmaktadır. TİEM hız grafikleri gözlem ile PID ve BM denetleyici arasındaki farklar anlaşılmamaktadır. Ancak BM denetleyici akım ve akıma bağlı olarak elektriksel güç grafiklerinin PID denetleyiciden daha iyi sonuç verdiği gözlem ile anlaşılabilir.

Deneysel çalışma PID ve BM denetleyici sonuçları Çizelge 6.3'te verilmektedir. TİEM normal sürme mesafesi ve enerji harcaması, TİEM rejeneratif frenleme mesafesi ve enerji kazanımı, TİEM toplam mesafe ve toplam enerji harcaması görülmektedir. Elde edilen bu veriler ile 15 N.m ve 30 N.m yük altında PID, BM denetleyiciler ile yamuk fonksiyonu, rampa fonksiyonu, merdiven fonksiyonu referans hızlarında TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme sonuçları incelenebilmektedir. Sonuçlar ile kıyaslama yapabilmek için aynı referanslara sahip olmaları gerekir ancak sonuçlardan görüleceği üzere PID ve BM denetleyici sonuçları aynı referansa sahip değil. BM ve PID sonuçlarının kıyaslanabilmesi için Çizelge 6.2 verilmektedir.

Çizelge 6.3. Deneysel Çalışma PID ve BM denetleyici sonuçları.

PID ve BM Denetleyici Deneysel Çalışma Sonuçları	Yamuk Fonksiyonu				Rampa Fonksiyonu				Merdiven Fonksiyonu			
	Denetleyici		PID	BM	PID	BM	PID	BM	PID	BM	PID	BM
Yük	15 N.m		30 N.m		15 N.m		30 N.m		15 N.m		30 N.m	
TİEM Normal Sürme Mesafesi (m)	165,70	165,15	165,31	164,93	206,84	208,51	206,45	208,36	229,52	228,69	226,65	225,85
TİEM Rejeneratif Frenleme Mesafesi (m)	146,81	147,04	147,15	147,02	168,68	166,36	168,69	166,58	248,29	248,31	248,80	248,57
Gidilen Toplam Mesafe (m)	312,51	312,20	312,46	311,96	375,52	374,87	375,13	374,94	477,82	476,99	475,45	474,41
TİEM Normal Sürmede Harcanan Enerji (kJ)	11,49	11,31	22,22	22,09	14,44	13,73	25,80	25,38	16,20	16,01	30,85	30,40
TİEM Rejeneratif Frenlemede Kazanılan Enerji (kJ)	5,42	5,53	9,31	9,41	6,20	6,35	12,10	12,23	10,60	10,88	18,91	19,01
Toplam Harcanan Enerji (kJ)	6,07	5,79	12,91	12,68	8,25	7,38	13,70	13,15	5,60	5,13	11,93	11,39

Çizelge 6.4 ile deneysel çalışmada elde edilen TİEM normal sürme mesafesi ve normal sürme referans mesafesi, rejeneratif frenleme mesafesi ve rejeneratif frenleme referans mesafesi, toplam TİEM mesafesi ve toplam referans mesafelerinin sapma oranı verilmektedir. Elde edilen oranlar ile TİEM normal sürme, rejeneratif frenleme ve toplam mesafedeki sapmalar yüzde olarak verilmektedir. PID ve BM denetleyicileri

ile 15 N.m ve 30 N.m için yamuk fonksiyonu ve rampa fonksiyonu referans hızlarındaki sapmalar Çizelge 6.4'te görülmektedir. Düşük sapma oranına sahip olan hücre koyu olarak işaretlenmektedir.

Çizelge 6.4. PID ve BM denetleyici deneysel çalışma karşılaştırması.

PID ve BM Denetleyici Deneysel Çalışma Karşılaştırması	Yamuk Fonksiyonu				Rampa Fonksiyonu				Merdiven Fonksiyonu			
TİEM Normal Sürme Referans Mesafe (m)	165,251				208,2071				225,1380			
TİEM Rejeneratif Frenleme Referans Mesafe (m)	147,249				166,7201				246,1312			
TİEM Toplam Referans Mesafe (m)	312,500				374,9272				471,2692			
Denetleyici	PID	BM	PID	BM	PID	BM	PID	BM	PID	BM	PID	BM
Yük	15 N.m		30 N.m		15 N.m		30 N.m		15 N.m		30 N.m	
TİEM Normal Sürme Mesafe Sapması (%)	0,27	-0,06	0,04	-0,19	-0,66	0,14	-0,85	0,07	1,95	1,58	0,67	0,31
TİEM Rejeneratif Frenleme Mesafe Sapması (%)	-0,30	-0,14	-0,07	-0,15	1,18	-0,21	1,18	-0,08	0,88	0,88	1,09	0,99
Toplam Mesafe Sapması (%)	0,00	-0,10	-0,01	-0,17	0,16	-0,02	0,05	0,00	1,39	1,21	0,89	0,67
Harcanan Enerji (J) / Normal Sürme Mesafe (m)	69,35	68,49	134,44	133,91	69,83	65,86	124,96	121,81	70,56	69,99	136,09	134,58
Kazanılan Enerji (J) / Rejeneratif Frenleme Mesafe (m)	36,95	37,57	63,27	64,00	36,74	38,17	71,74	73,43	42,69	43,80	76,01	76,46
Toplam Enerji (J) / Gidilen Mesafe (m)	19,42	18,54	41,33	40,63	21,96	19,69	36,51	35,07	11,71	10,76	25,10	24,01

TİEM normal sürme ile harcanan enerjinin, normal sürme ile gidilen mesafeye oranı, TİEM rejeneratif frenleme ile toplanan enerjinin, rejeneratif frenlemeyle gidilen mesafeye oranı, toplam harcanan enerjinin toplam harcanan enerjiye oranı Çizelge 6.4'te verilmektedir. TİEM normal sürme ile harcanan enerjinin TİEM normal sürme ile gidilen mesafe oranı düşük olan hücre koyu olarak işaretlenmektedir. TİEM rejeneratif frenleme ile kazanılan enerjinin TİEM rejeneratif frenleme ile gidilen mesafe oranı yüksek olan hücre koyu olarak işaretlenmektedir. Deney boyunca

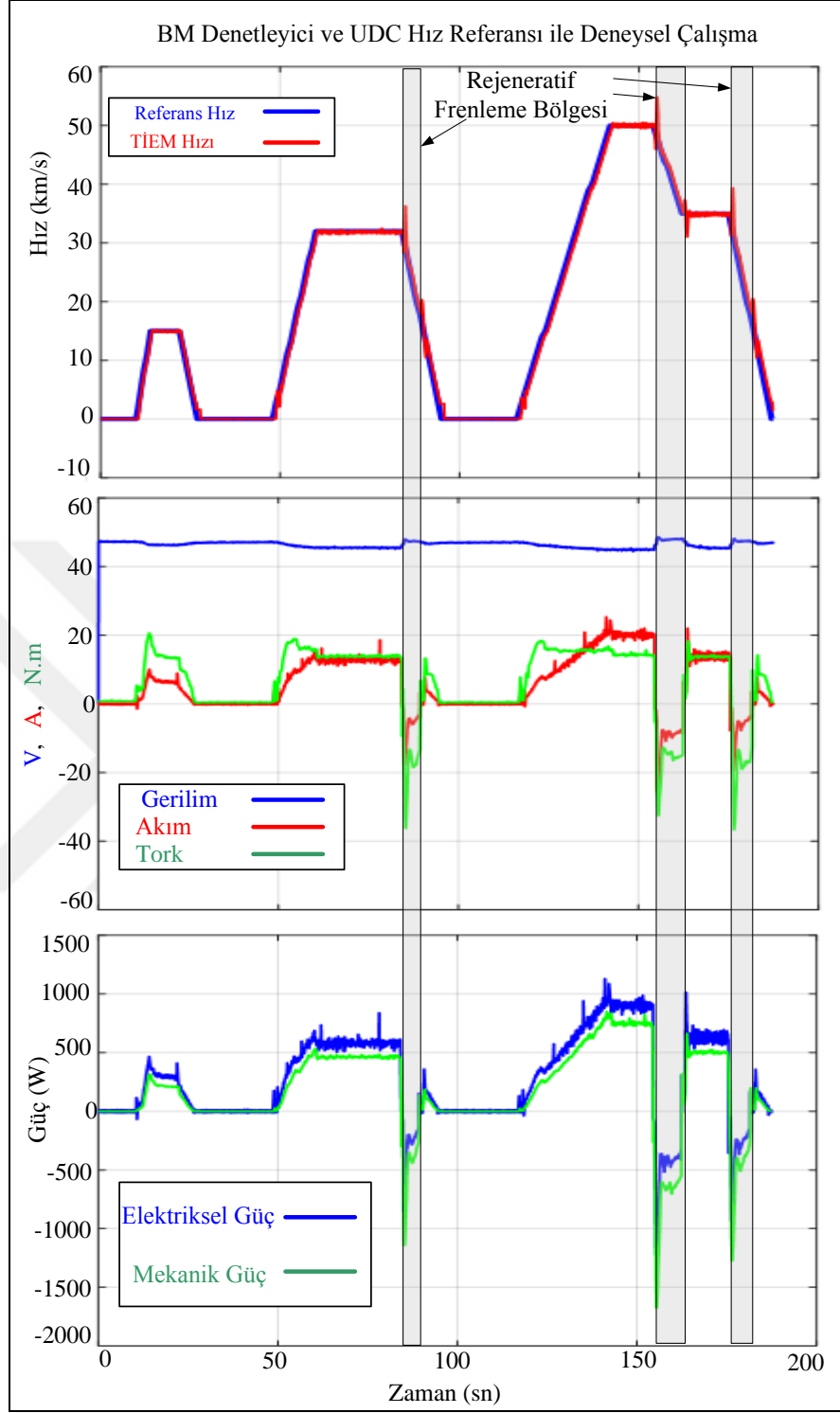
harcanan toplam enerjinin toplam gidilen mesafeye oranı düşük olan hücre koyu olarak işaretlenmektedir.

PID ve BM denetleyici deneysel çalışma karşılaştırılması yamuk fonksiyonu, rampa fonksiyonu ve merdiven fonksiyonu hız referansları ile 15 ve 30 N.m yükler için yapılmaktadır. Mesafe sapma karşılaştırması sonucunda BM denetleyicinin daha fazla koyu hücresi bulunmaktadır ancak değerlere bakıldığında PID denetleyici sonuçlarının BM denetleyiciye ya da sifıra yakın olduğu görülmektedir. Enerji karşılaştırmasında BM denetleyicinin PID denetleyiciden üstün olduğu söylenebilmektedir. Elde edilen sonuçlar ile BM mantık denetleyici ile standart sürüş çevrim hız referansları ile deneysel çalışması yapılmaya karar verilmektedir.

6.2.4. Standart Sürüş Çevrim Hız Referansları ile Deneysel Çalışmalar

Normal sürme ve rejeneratif frenleme torku 15 N.m olarak ayarlanmış, PID ve BM denetleyicileri ve UDC hız referansı ile deneysel çalışma sonuç grafikleri Şekil 6.14'te verilmektedir. TIEM onuncu saniyeden yirmi yedinci saniyeye normal sürülmektedir. Referans hız 15 km/sa hız ile rejeneratif frenleme hız sınırı olan 18 km/sa hızı geçmediği için ilk hızlanma bölgesinde rejeneratif frenleme yapılmamaktadır. Batarya gerilimi çekilen akıma bağlı olarak belirli bir miktar düşmektedir. TIEM referans hızı takip etmektedir, TIEM akımı kontrol edildiği için TIEM akımı artan hız ile birlikte artmaktadır. TIEM torku 15 N.m referans değerini ivme ve DAEM'in de kontrol edilmesinden dolayı aşmakta ancak daha sonra istenilen referansa gelmektedir. TIEM'in çektiği akım 7,5 A, mekanik gücü 240 W, elektriksel gücü 360 W olmaktadır.

Kırk sekizinci saniyeden altmışıncı saniyeye kadar TIEM hızı artmakta ve altmışıncı saniyeden seksen dördüncü saniyeye kadar TIEM sabit hızda kalmaktadır. Bu süre içinde TIEM normal sürülmektedir. TIEM hızının sabitlenmesiyle, akımı, torku, gerilimi, elektriksel gücü, mekanik çıkış gücü sabit kalmaktadır. TIEM 32 km/sa sabit hız, 15 N.m yük altında iken 13 A akım çekmektedir. TIEM elektriksel gücü 620 W olmaktadır ve 500 W mekanik çıkış gücü elde edebilmektedir.



Şekil 6.14. BM denetleyici kullanarak 15 N.m yük altında, UDC hız referansı ile deneysel çalışma.

Seksen dördüncü saniyede TIEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş yapmaktadır. Normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş sırasındaki gecikme ve denetleyici değiştirildiği için iki saniye hızda dalgalanma görülmektedir. Seksen

dokuzuncu saniyede TİEM hızı rejeneratif hız sınırı olan 18 km/sa hızın kalmaktadır ve TİEM rejeneratif frenlemeden normal sürmeye geçmektedir. TİEM 15 N.m negatif yük, maksimum 18 A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır. TİEM'e uygulanan maksimum güç 1150 W iken TİEM'in elektriksel gücü negatif yönde 860 W'tır. Doksan beşinci saniyede ikinci hızlanma bölgesi bitmektedir.

Yüz on altıncı saniyeden yüz kırk ikinci saniyeye kadar TİEM hızı artmakta ve yüz kırk ikinci saniyeden yüz elli dördüncü saniyeye kadar TİEM sabit hızda kalmaktadır. Bu süre içinde TİEM normal sürülmektedir. TİEM hızının sabitlenmesiyle, akımı, torku, elektriksel gücü, mekanik gücü sabit kalmaktadır. TİEM 50 km/sa sabit hız, 15 N.m yük altında iken 20 A akım çekmektedir. Elektriksel gücü 960 W olmaktadır ve 780 W mekanik gücü elde edebilmektedir. Yüz elli dördüncü saniyede TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş yapmaktadır. Normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş sırasındaki gecikme ve denetleyici değiştirildiği için iki saniye hızda dalgalanma görülmektedir. Yüz altmış ikinci saniyeye kadar rejeneratif frenleme devam etmektedir ve TİEM hızı 50 km/sa'den 35 km/sa'e kadar düşmektedir. TİEM 15 N.m negatif yük, maksimum 25 A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır. TİEM'e uygulanan maksimum güç 1700 W iken TİEM'in elektriksel gücü negatif yönde 1200 W'tır.

Yüz altmış ikinci saniyede TİEM rejeneratif frenlemeden normal sürmeye 35 km/sa referans hız ile geçmektedir. Rejeneratif frenlemeden normal sürmeye geçiş sırasındaki gecikme ve denetleyici değiştirildiği için iki saniye hızda dalgalanma görülmektedir. Yüz altmış ikinci saniyeden yüz yetmiş beşinci saniyeye kadar TİEM normal sürülmektedir. Bu sırada TİEM 14 A akım çekmektedir, elektriksel gücü 670 W, mekanik çıkış gücü 540 W olmaktadır.

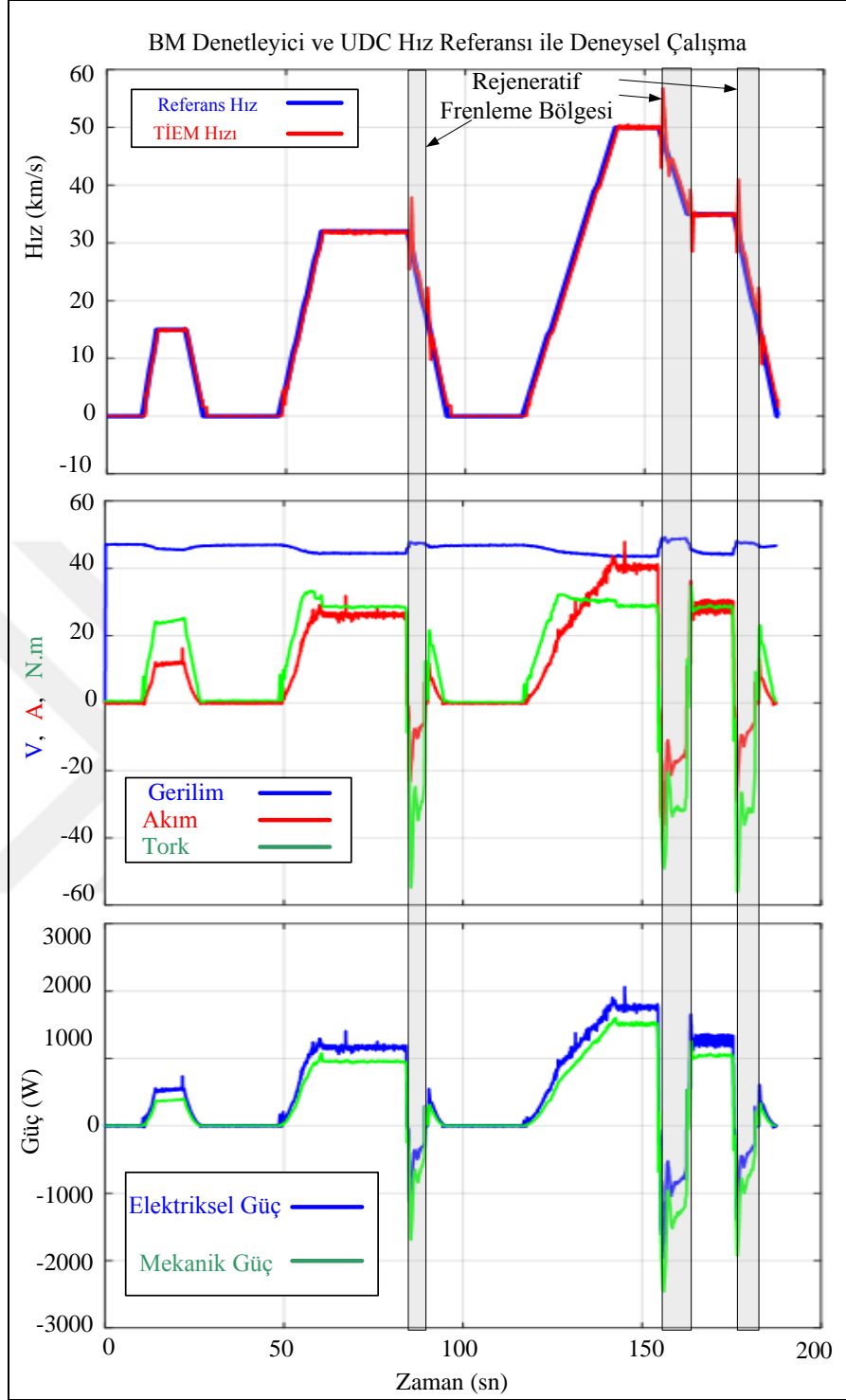
Yüz yetmiş beşinci saniyede TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş yapmaktadır. Rejeneratif frenleme 35 km/sa'den rejeneratif frenleme sınır hızı olan 18 km/sa hıza kadar devam etmektedir. TİEM 18 km/sa hızın altında rejeneratif frenlemeden normal sürmeye geçmektedir. TİEM 15 N.m negatif yük, maksimum 19 A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır. TİEM'e uygulanan maksimum güç 1250 W iken TİEM'in elektriksel gücü negatif yönde 910 W'tır.

Normal sürme ve rejeneratif frenleme torku 30 N.m olarak ayarlanmış, PID ve BM denetleyicileri ve UDC hız referansı ile deneysel çalışma sonuç grafikleri Şekil 6.15'te verilmektedir. TİEM onuncu saniyeden yirmi yedinci saniyeye normal sürülmektedir. Referans hız 15 km/sa hız ile rejeneratif frenleme hız sınırı olan 18 km/sa hızı geçmediği için ilk hızlanma bölgesinde rejeneratif frenleme yapılmamaktadır. Batarya gerilimi çekilen akıma bağlı olarak belirli bir miktar düşmektedir. TİEM referans hızı takip etmektedir, TİEM akımı kontrol edildiği için TİEM akımı artan hız ile birlikte artmaktadır. DAEM yükleme sınırına geldiği için TİEM torku 30 N.m yüke gelemediği görülmektedir. TİEM'in çektiği akım 13 A, mekanik gücü 360 W, elektriksel gücü 620 W olmaktadır.

Kırk sekizinci saniyeden altmışıncı saniyeye kadar TİEM hızı artmakta ve altmışıncı saniyeden seksen dördüncü saniyeye kadar TİEM sabit hızda kalmaktadır. Bu süre içinde TİEM normal sürülmektedir. TİEM hızının sabitlenmesiyle, akımı, torku, gerilimi, elektriksel gücü, mekanik çıkış gücü sabit kalmaktadır. TİEM 32 km/sa sabit hız, 15 N.m yük altında iken 26 A akım çekmektedir. TİEM elektriksel gücü 1240 W olmaktadır ve 1000 W mekanik çıkış gücü elde edebilmektedir.

Seksen dördüncü saniyede TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş yapmaktadır. Normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş sırasındaki gecikme ve denetleyici değiştirildiği için iki saniye hızda dalgalanma görülmektedir. Seksen dokuzuncu saniyede TİEM hızı rejeneratif hız sınırı olan 18 km/sa hızın kalmaktadır ve TİEM rejeneratif frenlemeden normal sürmeye geçmektedir. TİEM 15 N.m negatif yük, maksimum 25 A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır. TİEM'e uygulanan maksimum güç 1800 W iken TİEM'in elektriksel gücü negatif yönde 1200 W'tır. Doksan beşinci saniyede ikinci hızlanma bölgesi bitmektedir.

Yüz on altıncı saniyeden yüz kırk ikinci saniyeye kadar TİEM hızı artmakta ve yüz kırk ikinci saniyeden yüz elli dördüncü saniyeye kadar TİEM sabit hızda kalmaktadır. Bu süre içinde TİEM normal sürülmektedir. TİEM hızının sabitlenmesiyle, akımı, torku, elektriksel gücü, mekanik gücü sabit kalmaktadır. TİEM 50 km/sa sabit hız, 15 N.m yük altında iken 40 A akım çekmektedir.



Şekil 6.15. BM denetleyici kullanarak 30 N.m yük altında, UDC hız referansı ile deneysel çalışma.

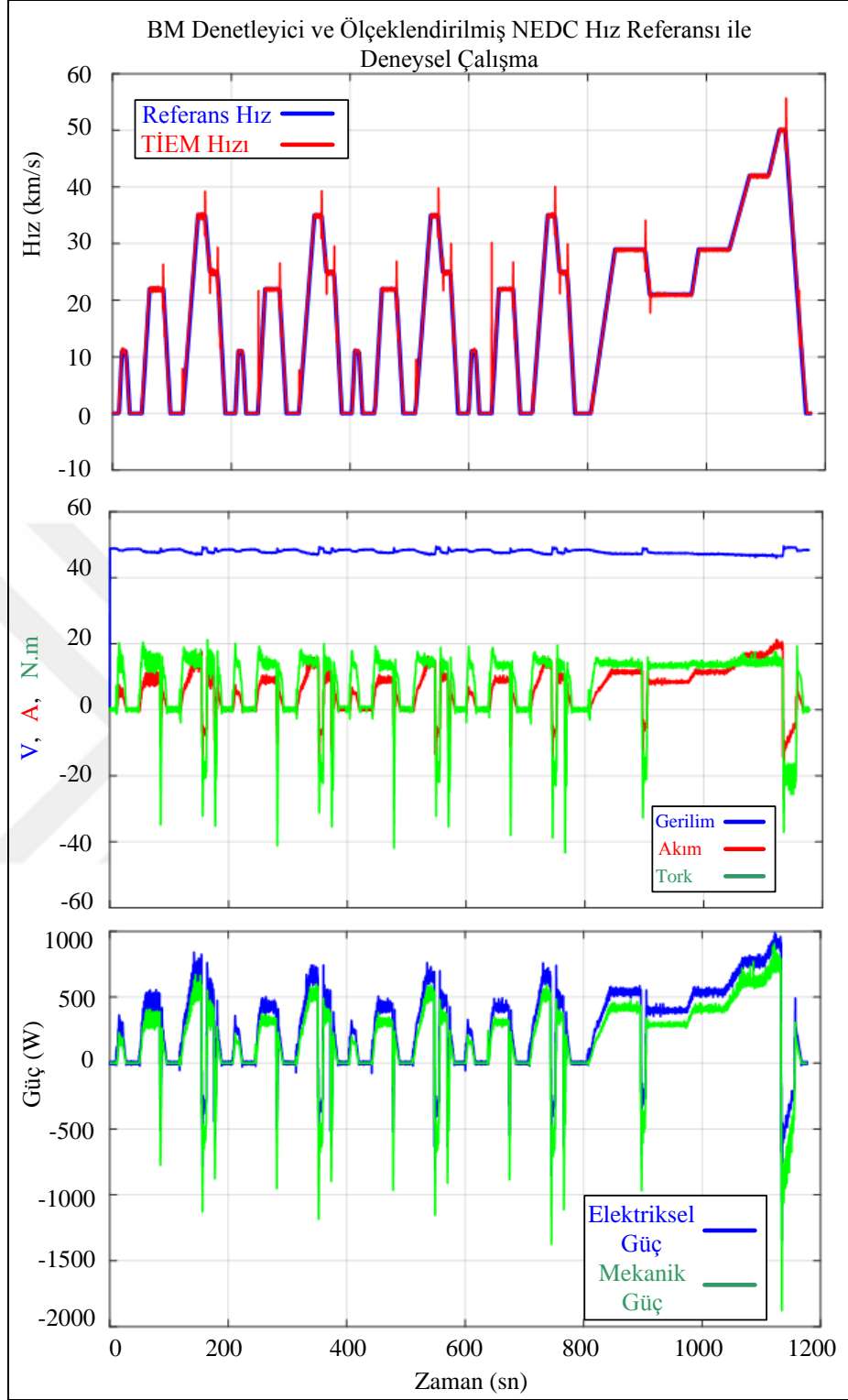
Elektriksel gücü 1920 W olmaktadır ve 1560 W mekanik gücü elde edebilmektedir. Yüz elli dördüncü saniyede TIEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş yapmaktadır. Normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş sırasındaki gecikme ve

denetleyici değiştirildiği için iki saniye hızda dalgalanma görölmektedir. Yüz altmış ikinci saniyeye kadar rejeneratif frenleme devam etmektedir ve TİEM hızı 50 km/sa'den 35 km/sa'e kadar düşmektedir. TİEM 15 N.m negatif yük, maksimum 28 A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır. TİEM'e uygulanan maksimum güç 2500 W iken TİEM'in elektriksel gücü negatif yönde 1350 W'tır.

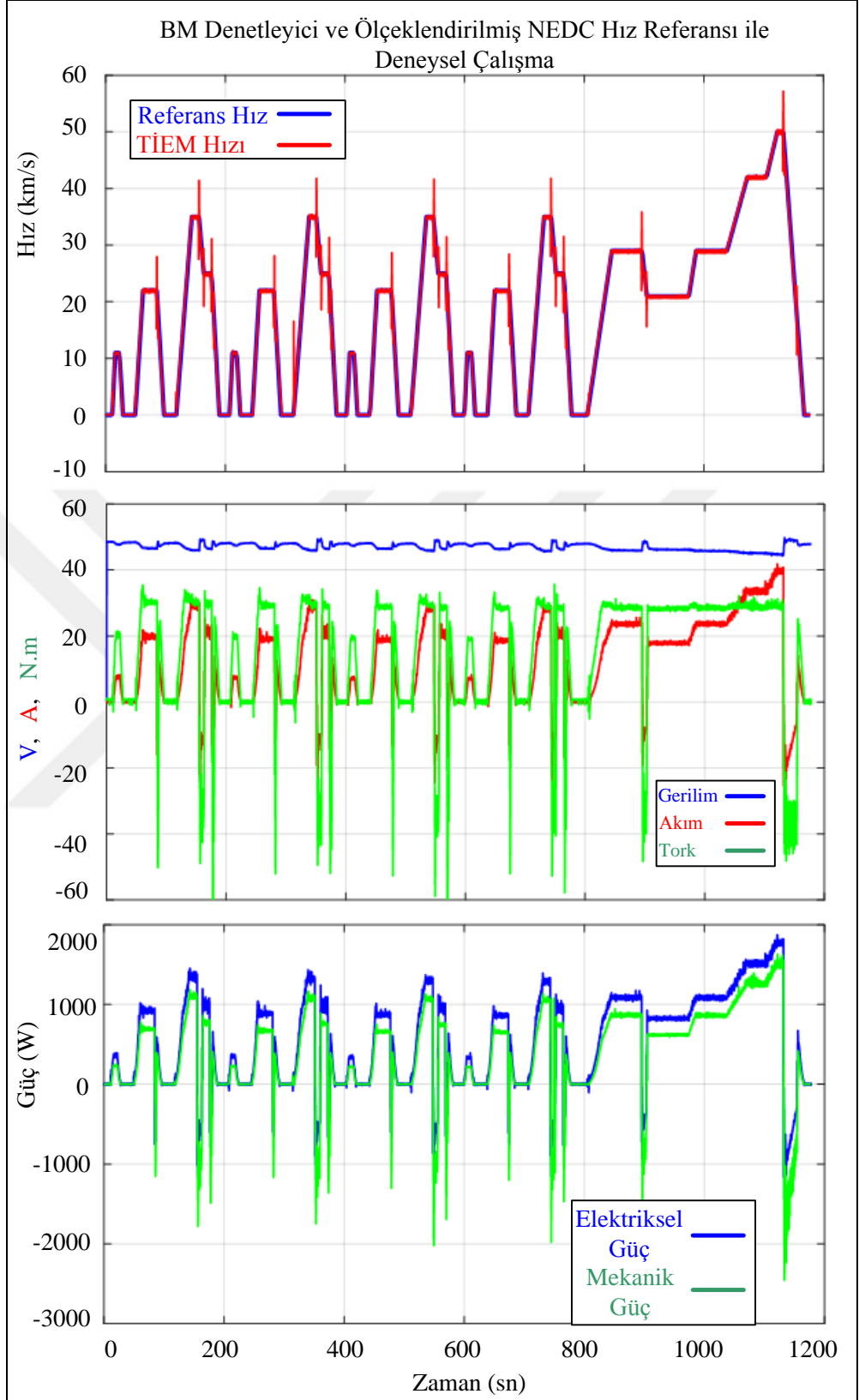
Yüz altmış ikinci saniyede TİEM rejeneratif frenlemeden normal sürmeye 35 km/sa referans hız ile geçmektedir. Rejeneratif frenlemeden normal sürmeye geçiş sırasındaki gecikme ve denetleyici değiştirildiği için iki saniye hızda dalgalanma görölmektedir. Yüz altmış ikinci saniyeden yüz yetmiş beşinci saniyeye kadar TİEM normal sürölmektedir. Bu sırada TİEM 28 A akım çekmektedir, elektriksel gücü 1340 W, mekanik çıkış gücü 1080 W olmaktadır.

Yüz yetmiş beşinci saniyede TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş yapmaktadır. Rejeneratif frenleme 35 km/sa'den rejeneratif frenleme sınır hızı olan 18 km/sa hıza kadar devam etmektedir. TİEM 18 km/sa hızın altında rejeneratif frenlemeden normal sürmeye geçmektedir. TİEM 15 N.m negatif yük, maksimum 26 A akım ile rejeneratif frenleme yapmaktadır. TİEM'e uygulanan maksimum güç 1950 W iken TİEM'in elektriksel gücü negatif yönde 1250 W'tır.

15 N.m ve 30 N.m yük altında TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme ölçeklendirilmiş NEDC hız referansı ile deneysel çalışmalar sırası ile Şekil 6.16 ve Şekil 6.17'de gösterilmektedir. Deney süresi boyunca TİEM hızı normal sürme ve rejeneratif frenleme yapılırken referans değeri takip ettiği görölmektedir. TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçişlerde ve rejeneratif frenlemeden normal sürmeye geçişlerde hız dalgalanmaları görölmektedir. Bu hız dalgalanmalarının sebebi TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçişlerde konulan gecikme ve denetleyicinin değiştiriliyor olmasıdır. Geçiş sürelerindeki bu durum TİEM rejeneratif frenleme akım ve tork değerlerine de yansımaktadır. 15 N.m yük altında negatif yönde 20 A akım geçtiği, 30 N.m yük altında negatif 32 A akım ile rejeneratif frenleme yapıldığı görölmektedir. TİEM normal sürme ile 15 N.m yük altında 20 A, 30 N.m yük altında 40 A akım değerlerine çıktığı görölmektedir.



Şekil 6.16. BM denetleyici kullanarak 15 N.m yük altında, ölçeklendirilmiş NEDC hız referansı ile deneysel çalışma.



Şekil 6.17. BM denetleyici kullanarak 30 N.m yük altında, ölçeklendirilmiş NEDC hız referansı ile deneysel çalışma.

6.2.5. Standart Sürüş Çevrim Hız Referansları ile Deneysel Çalışma Sonuçları

BM denetleyici kullanarak UDC ve ölçeklendirilmiş NEDC hız referansları ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları Çizelge 6.5'te verilmektedir. TİEM normal sürme UDC ve ölçeklendirilmiş NEDC hız referanslarında yük arttıkça mesafenin arttığı, rejeneratif frenlemede mesafe kısaldığı görülmektedir. Toplam mesafe sapması yüzdesi düşük olduğu için BM denetleyicinin görevini yaptığı söylenebilir.

Çizelge 6.5. UDC ve ölçeklendirilmiş NEDC hız referansları ile BM denetleyici deneysel çalışma sonuçları.

UDC ve Ölçeklendirilmiş NEDC referans hızları ile BM denetleyici sonuçları	UDC		Ölçeklendirilmiş NEDC	
	15 N.m	30 N.m	15 N.m	30 N.m
Yük				
TİEM Normal Sürme Referans Mesafe (m)	827,62		4995,77	
TİEM Rejeneratif Frenleme Referans Mesafe (m)	167,23		660,02	
TİEM Toplam Referans Mesafe (m)	994,85		5655,79	
TİEM Normal Sürme Mesafesi (m)	830,41	832,05	5010,54	5015,95
TİEM Rejeneratif Frenleme Mesafesi (m)	168,03	166,88	668,14	647,66
Gidilen Toplam Mesafe (m)	998,43	998,93	5678,67	5663,61
TİEM Normal Sürmede Harcanan Enerji (kJ)	55,56	105,29	349,07	669,19
TİEM Rejeneratif Frenlemede Kazanılan Enerji (kJ)	7,06	12,07	28,18	45,65
Toplam Harcanan Enerji (kJ)	48,50	93,22	320,89	623,54
TİEM Normal Sürme Mesafe Sapması (%)	0,34	0,53	0,30	0,40
TİEM Rejeneratif Frenleme Mesafe Sapması (%)	0,48	-0,21	1,23	-1,87
Toplam Mesafe Sapması (%)	0,36	0,41	0,40	0,14
Harcanan Enerji (J) / Normal Sürme Mesafe (m)	66,90	126,54	69,67	133,41
Kazanılan Enerji (J) / Rejeneratif Frenleme Mesafe (m)	42,02	72,32	42,18	70,48
Toplam Enerji (J) / Gidilen Mesafe (m)	48,57	93,32	56,51	110,10

UDC ve ölçeklendirilmiş NEDC hız referans deneylerinde yük iki katına çıktığı halde harcanan ve kazanılan enerji iki katından azdır. Bu durum TİEM verimi ile açıklanabilir, 30 N.m yük ile TİEM'in verimi daha yüksektir. Aynı yükler altında ölçeklendirilmiş NEDC hız referansının UDC hız referansından gidilen yol başına

enerji tüketimi daha fazla olduğu, enerji kazanımının ise daha az olduğu görölmektedir.



BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Elektrikli araçların gidebileceği mesafenin arttırılabilmesi için TİEM ile farklı sürüş çevrim referans hızlarında TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme deneyleri yapılmaktadır. Sürüş çevrim hız referansları, ön test sürüş çevrim hız referansları ve standart sürüş çevrim hız referansları olarak ikiye ayrılmaktadır. Ön test sürüş çevrim hız referanslarının içerisinde yamuk fonksiyonu, rampa fonksiyonu ve merdiven fonksiyonu bulunmaktadır. Standart sürüş çevrim hız referansları uluslararası standartlarda kabul gören hız referansları olan UDC ve ölçeklendirilmiş NEDC hız referanslarıdır.

Yamuk fonksiyonu ve rampa fonksiyonu hız referansları kullanılarak PID ve BM denetleyici ile TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme benzetim çalışması yapılmaktadır. Benzetim çalışmasının sonucunda TİEM'in PID ve BM ile kontrol edilebildiği, TİEM normal sürme ve rejeneratif frenlemede referans hız takibinin yapılabildiği görülmektedir. Benzetim çalışması ile PID ve BM denetleyici arasında kesin mukayese yapmak mümkün olmamaktadır.

Yamuk fonksiyonu, rampa fonksiyonu ve merdiven fonksiyonu hız referansları kullanarak PID ve BM denetleyici ile TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme deneysel çalışması gerçekleştirilmektedir. Deneysel olarak TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme ile belirlenen hız referanslarında hızın takip edildiği görülmektedir. BM denetleyicinin PID denetleyiciden daha iyi performans gösterdiği sonuç grafikleri ve sonuç tablosundan anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışma ön test sürüş çevrim hız referansları için gidilen mesafe başına harcanan enerji, kazanılan enerji ve toplam enerjiye bakıldığında BM denetleyici sırası ile % 2, % 1,76 ve % 5 PID denetleyiciden daha iyidir.

Normal sürme, rejeneratif frenleme ve toplam mesafe sapma oranının düşük olması (en fazla % 1,87), BM denetleyici kullanılarak UDC ve NEDC hız referanslarında TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme yapılabildiğini göstermektedir. UDC hız referansında sadece yavaşlama anlarında rejeneratif frenleme yaparak 15 N.m yük altında % 12,7 ve 30 N.m yük altında % 11,4 enerji tasarrufu yapılmaktadır. Ölçeklendirilmiş NEDC hız referansında sadece yavaşlama anlarında rejeneratif frenleme yaparak 15 N.m yük altında % 8,3 ve 30 N.m yük altında % 6,8 enerji tasarrufu yapılmaktadır. Yapılan enerji tasarrufu ile bir elektrikli aracın gidebileceği maksimum mesafe arttırabilmektedir.

Kurulan test düzeneği ile bir elektrikli aracın yol testleri normal sürme, rejeneratif frenleme, standart olan ya da oluşturan herhangi bir sürüş çevrim hız referansı ile kontrol edilebilmektedir. Geliştirilen TİEM sürücü ile MATLAB/Simulink'te oluşturulabilen herhangi bir denetleyici TİEM kontrolü için kullanılabilir. Bu tez çalışması ile TİEM rejeneratif frenleme hızı PID ve BM denetleyicileri ile kontrol edilerek literatüre katkı sağlanmaktadır.

Ülkemiz şartlarına uygun, yokuş aşağı ve yokuş yukarı yol koşullarını da ihtiva eden sürüş çevrim hız referansı geliştirilebilir. TİEM normal sürmeden rejeneratif frenlemeye geçiş anında ve TİEM rejeneratif frenlemeden normal sürmeye geçiş anında TİEM hızının dalgalandığı benzetim ve deneysel çalışma sonuçlarıyla görülmektedir. Bu geçişlerin daha pürüzsüz yapılabilmesi için çalışma yapılabilir.

Kurulan test düzeneğinde DAEM jeneratör olarak çalışırken ürettiği enerji frenleme direnci üzerinden harcanmaktadır. Frenleme direnci 1 Ω değerinde seçilmesine rağmen 15 km/sa hız deneylerinde en fazla 28 N.m tork ile yükleme yapabildiği görülmektedir. TİEM hızlanmalarında jeneratör tepkisinin geç olması ile istenilen tork değerinin üzerine çıkıldığı gözlenmektedir. Bu tip jeneratör kaynaklı problemleri aşabilmek için jeneratör sisteminin şebekeyi beslediği sistemler tercih edilmelidir.

TİEM normal sürme ve rejeneratif frenleme, 5 x 5 üçgen üyelik fonksiyonlu BM denetleyici ile kontrol edilmiştir. TİEM farklı üyelik fonksiyonları ile BM denetleyici kullanılarak kontrol edilebilir. BM denetleyiciden farklı olarak yapay zeka

algoritmaları, optimizasyon teknikleri, hibrit PID BM denetleyici varyasyonları kullanılarak TIEM kontrol edilebilir.



KAYNAKLAR

1. Gencer, C. and Gedikpinar, M., "Modeling and simulation of bldcm using matlab/simulink", *Journal Of Applied Sciences*, 6: 688–691 (2006).
2. Muruganantham, N. and Palani, S., "State Space Modeling and Simulation of Sensorless Permanent Magnet Bldc Motor", *International Journal Of Engineering Science And Technology*, 2 (10): 5099–5106 (2010).
3. Patel, V. K. R. S. and Pandey, A. K., "Modeling and performance analysis of PID controlled BLDC motor and different schemes of PWM controlled BLDC motor", *International Journal Of Scientific And Research Publications*, 3 (4): 1–14 (2013).
4. Rao, A. P. C., Obulesh, Y. P., and Babu, C. S., "Mathematical modeling of BLDC motor with closed loop speed control using PID controller under various loading conditions", *ARPJ Journal Of Engineering And Applied Sciences*, 7 (10): 1321–1328 (2012).
5. Patel, V. K. S., "Modeling and simulation of brushless DC motor using PWM control Technique", *International Journal Of Engineering Research And Applications*, 3 (3): 612–620 (2013).
6. Joice, C. S., Paranjothi, S. R., and Kumar, V. J. S., "Digital control strategy for four quadrant operation of three phase BLDC motor with load variations", *IEEE Transactions On Industrial Informatics*, 9 (2): 974–982 (2013).
7. Masmoudi, M., El Badsı, B., and Masmoudi, A., "DTC of B4-inverter-fed BLDC motor drives with reduced torque ripple during sector-to-sector commutations", *IEEE Transactions On Power Electronics*, 29 (9): 4855–4865 (2014).
8. Philip, P. and Meenakshy, K., "Modelling Of Brushless DC Motor Drive Using Sensored And Sensorless Control (back EMF zero crossing detection)", *International Journal Of Emerging Technology And Advanced Engineering*, 2 (8): 153–162 (2012).
9. Wu, H., Cheng, S.-K., and Cui, S., "A controller of brushless DC motor for electric vehicle", *IEEE Transactions On Magnetics*, 41 (1): 509–513 (2005).
10. Rubaai, A., Ricketts, D., and Kankam, M. D., "Experimental Verification of a Hybrid Fuzzy Control Strategy for a High-Performance Brushless DC Drive System", *IEEE Transactions On Industry Applications*, 37 (2): 503–512 (2001).
11. Rubaai, A., Castro-Sitiriche, M. J., and Ofoli, A. R., "Design and implementation of parallel fuzzy PID controller for high-performance brushless motor drives: An

- integrated environment for rapid control prototyping", *IEEE Transactions On Industry Applications*, 44 (4): 1090–1098 (2008).
12. Rubaai, A., Ricketts, D., and Kankam, M. D., "Development and implementation of an adaptive fuzzy-neural-network controller for brushless drives", *IEEE Transactions On Industry Applications*, 38 (2): 441–447 (2002).
 13. Aydoğdu, Ö., "Fırçasız doğru akım motorlarının genetik tabanlı bulanık denetleyici ile sensörsüz kontrolü", Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, (2006).
 14. Terki, A., Moussi, A., Betka, A., and Terki, N., "An improved efficiency of fuzzy logic control of PMBLDC for PV pumping system", *Applied Mathematical Modelling*, 36 (3): 934–944 (2012).
 15. Chau, K. T., Chan, C. C., and Liu, C., "Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles", *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 55 (6): 2246–2257 (2008).
 16. Naderi, P. and Azizianfard, M., "A Fuel Cell/Battery Hybrid Vehicle Modeling and Power Management/Regenerative Braking Controller Design", *Journal Of Fuel Cell Science And Technology*, 10 (1): 11008 (2013).
 17. Long, B., Lim, S. T., Ryu, J. H., and Chong, K. T., "Energy-regenerative braking control of electric vehicles using three-phase brushless direct-current motors", *Energies*, 7 (1): 99–114 (2013).
 18. Nian, X., Peng, F., and Zhang, H., "Regenerative braking system of electric vehicle driven by brushless DC motor", *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 61 (10): 5798–5808 (2014).
 19. Shi, Y., Liu, Q., and Yu, F., "Design of an Adaptive FO-PID Controller for an In-Wheel-Motor Driven Electric Vehicle", *SAE International Journal Of Commercial Vehicles*, 10 (2017-01–0427): 265–274 (2017).
 20. Murata, S., "Innovation by in-wheel-motor drive unit", *Vehicle System Dynamics*, 50 (6): 807–830 (2012).
 21. Terashima, M., Ashikaga, T., Mizuno, T., Natori, K., Fujiwara, N., and Yada, M., "Novel Motors and Controllers for High-Performance Electric Vehicle with Four In-Wheel Motors", *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 44 (1): 28–38 (1997).
 22. Lovatt, H. C., Ramsden, V. S., and Mecrow, B. C., "Design of an in-wheel motor for a solar-powered electric vehicle", *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 145 (5): 402–208 (1998).
 23. Chen, Q., Xiao, Q., Liao, C., Zeng, L., Li, X., Huang, J., and Zhou, C., "Design and analysis of outer rotor in-wheel motor for micro-electric vehicle", *Advances*

- In Mechanical Engineering*, 9 (11): 1687814017729088 (2017).
24. Chan, T. F., Yan, L.-T., and Fang, S.-Y., "In-wheel permanent-magnet brushless DC motor drive for an electric bicycle", *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 17 (2): 229–233 (2002).
 25. Lee, J.-Y., Woo, B.-C., Kim, J.-M., and Oh, H.-S., "In-wheel Motor Design for an Electric Scooter", *Journal Of Electrical Engineering & Technology*, 12 (6): 2307–2316 (2017).
 26. Yang, Y.-P. and Chuang, D. S., "Optimal design and control of a wheel motor for electric passenger cars", *IEEE Transactions On Magnetics*, 43 (1): 51–61 (2007).
 27. Biček, M., Kunc, R., and Zupan, S., "Mechanical Impact on In-Wheel Motor's Performance", *Journal Of Mechanics*, 33 (5): 607–618 (2017).
 28. Fan, Y., Zhang, L., Huang, J., and Han, X., "Design, analysis, and sensorless control of a self-decelerating permanent-magnet in-wheel motor", *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 61 (10): 5788–5797 (2014).
 29. Yoshimura, M. and Fujimoto, H., "Driving torque control method for electric vehicle with in-wheel motors", *Electrical Engineering In Japan*, 181 (3): 49–58 (2012).
 30. Wu, F. K., Yeh, T. J., and Huang, C. F., "Motor control and torque coordination of an electric vehicle actuated by two in-wheel motors", *Mechatronics*, 23 (1): 46–60 (2013).
 31. Ko, S. Y., Ko, J. W., Lee, S. M., Cheon, J. S., and Kim, H. S., "A study on in-wheel motor control to improve vehicle stability using human-in-the-loop simulation", *Journal Of Power Electronics*, 13 (4): 536–545 (2013).
 32. Omatu, S., Yoshioka, M., Kosaka, T., Yanagimoto, H., and Dargham, J. A., "Neuro-PID Control of Speed and Torque of Electric Vehicle", *International Journal On Advances In Systems And Measurements*, 3 (1): 82–91 (2010).
 33. Seki, H., Ishihara, K., and Tadakuma, S., "Novel regenerative braking control of electric power-assisted wheelchair for safety downhill road driving", *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 56 (5): 1393–1400 (2009).
 34. Pei, J., Zhao, L.-M., Wang, D.-J., and Chu, L., "Fuzzy PID control of traction system for vehicles", *Proceedings Of The Fourth International Conference On Machine Learning And Cybernetics, Guangzhou, 18-21 August, 773–777* (2005).
 35. Guifang, G., Gang, X., Binggang, C., Zengliang, L., and others, "Driving and control of torque for direct-wheel-driven electric vehicle with motors in serial", *Expert Systems With Applications*, 38 (1): 80–86 (2011).

36. Lin, F.-J., Hung, Y.-C., Hwang, J.-C., Chang, I.-P., and Tsai, M.-T., "Digital signal processor-based probabilistic fuzzy neural network control of in-wheel motor drive for light electric vehicle", *IET Electric Power Applications*, 6 (2): 47-61 (2012).
37. Uysal, A. and Soylu, E., "Embedded System Design and Implementation of an Intelligent Electronic Differential System for Electric Vehicles", *International Journal Of Advanced Computer Science And Applications*, 8 (9): 129–134 (2017).
38. Hu, J.-S., Wang, Y., Fujimoto, H., and Hori, Y., "Robust yaw stability control for in-wheel motor electric vehicles", *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 22 (3): 1360–1370 (2017).
39. Ozkop, E., Altas, I. H., Okumus, H. I., and Sharaf, A. M., "A fuzzy logic sliding mode controlled electronic differential for a direct wheel drive EV", *International Journal Of Electronics*, 102 (11): 1919–1942 (2015).
40. Hartani, K., Merah, A., and Draou, A., "Stability enhancement of four-in-wheel motor-driven electric vehicles using an electric differential system", *Journal Of Power Electronics*, 15 (5): 1244–1255 (2015).
41. Wang, R., Chen, Y., Feng, D., Huang, X., and Wang, J., "Development and performance characterization of an electric ground vehicle with independently actuated in-wheel motors", *Journal Of Power Sources*, 196 (8): 3962–3971 (2011).
42. Sekour, M., Hartani, K., Draou, A., and Allali, A., "Sensorless Fuzzy Direct Torque Control for High Performance Electric Vehicle with Four In-Wheel Motors", *Journal Of Electrical Engineering & Technology*, 8 (3): 530–543 (2013).
43. Li, Z., Ling, Z., Ren, Y., Li, Y., Wang, K., and Zhan, Z., "Research on Low Frequency Torque Ripple of In-wheel Motor of Four Wheel Independent Drive", *Society Of Automotive Engineers (SAE)-China Congress*, 133–149 (2016).
44. Li, X., Chen, Y., and Wang, J., "In-wheel motor electric ground vehicle energy management strategy for maximizing the travel distance", *American Control Conference (ACC), 2012*, 4993–4998 (2012).
45. Gu, J., Ouyang, M., Lu, D., Li, J., and Lu, L., "Energy efficiency optimization of electric vehicle driven by in-wheel motors", *International Journal Of Automotive Technology*, 14 (5): 763–772 (2013).
46. Chen, Y., Li, X., Wiet, C., and Wang, J., "Energy management and driving strategy for in-wheel motor electric ground vehicles with terrain profile preview", *IEEE Transactions On Industrial Informatics*, 10 (3): 1938–1947 (2014).
47. Kim, J., "Optimal power distribution of front and rear motors for minimizing

- energy consumption of 4-wheel-drive electric vehicles", *International Journal Of Automotive Technology*, 17 (2): 319–326 (2016).
48. Poorani, S., Kumar, K. U., and Renganarayanan, S., "Design of a fuzzy-based controller for electric vehicles on Indian roads", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part I: Journal Of Systems And Control Engineering*, 221 (1): 61–74 (2007).
 49. Li, B., Goodarzi, A., Khajepour, A., Chen, S., and Litkouhi, B., "An optimal torque distribution control strategy for four-independent wheel drive electric vehicles", *Vehicle System Dynamics*, 53 (8): 1172–1189 (2015).
 50. Ko, S., Ko, J., Lee, S., Cheon, J., and Kim, H., "A study on the road friction coefficient estimation and motor torque control for an in-wheel electric vehicle", *Journal Of Automobile Engineering*, 229 (5): 611–623 (2015).
 51. Zhao, H., Gao, B., Ren, B., and Chen, H., "Integrated control of in-wheel motor electric vehicles using a triple-step nonlinear method", *Journal Of The Franklin Institute*, 352 (2): 519–540 (2015).
 52. Yin, D. and Hu, J.-S., "Active approach to Electronic Stability Control for front-wheel drive in-wheel motor electric vehicles", *International Journal Of Automotive Technology*, 15 (6): 979–987 (2014).
 53. Chen, B.-C. and Kuo, C.-C., "Electronic stability control for electric vehicle with four in-wheel motors", *International Journal Of Automotive Technology*, 15 (4): 573–580 (2014).
 54. Adinolfi, A., Lamedica, R., Modesto, C., Prudenzi, A., and Vimercati, S., "Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line", *IEEE Transactions On Power Delivery*, 13 (4): 1536–1542 (1998).
 55. Han, J. and Park, Y., "Cooperative regenerative braking control for front-wheel-drive hybrid electric vehicle based on adaptive regenerative brake torque optimization using under-steer index", *International Journal Of Automotive Technology*, 15 (6): 989–1000 (2014).
 56. Wang, B., Choi, J. H., Song, H. W., Choi, H. K., and Hwang, S. H., "Development of the performance simulator for electric scooters with an in-wheel motor", *International Journal Of Automotive Technology*, 15 (5): 835–841 (2014).
 57. Le Sollicc, G., Chasse, A., Van-Frank, J., and Walser, D., "Dual mode vehicle with in-wheel motor: Regenerative braking optimization", *Oil & Gas Science And Technology--Revue D'IFP Energies Nouvelles*, 68 (1): 95–108 (2013).
 58. Caratti, A., Catacchio, G., Gambino, C., and Kar, N. C., "Development of a predictive model for regenerative braking system", *Transportation Electrification Conference And Expo (ITEC), 2013 IEEE*, 1–6 (2013).

59. Yeo, H. and Kim, H., "Hardware-in-the-loop simulation of regenerative braking for a hybrid electric vehicle", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part D: Journal Of Automobile Engineering*, 216 (11): 855–864 (2002).
60. Clarke, P., Muneer, T., and Cullinane, K., "Cutting vehicle emissions with regenerative braking", *Transportation Research Part D: Transport And Environment*, 15 (3): 160–167 (2010).
61. Ahn, J. K., Jung, K. H., Kim, D. H., Jin, H. B., Kim, H. S., and Hwang, S. H., "Analysis of a regenerative braking system for hybrid electric vehicles using an electro-mechanical brake", *International Journal Of Automotive Technology*, 10 (2): 229–234 (2009).
62. Ma, Z., "Parameters Design for a Parallel Hybrid Electric Bus Using Regenerative Brake Model", *Advances In Mechanical Engineering*, 6760815 (2014).
63. Maia, R., Silva, M., Araújo, R., and Nunes, U., "Electrical vehicle modeling: A fuzzy logic model for regenerative braking", *Expert Systems With Applications*, 42 (22): 8504–8519 (2015).
64. Montesinos-Miracle, D., Massot-Campos, M., Bergas-Jane, J., Galceran-Arellano, S., and Rufer, A., "Design and control of a modular multilevel DC/DC converter for regenerative applications", *IEEE Transactions On Power Electronics*, 28 (8): 3970–3979 (2013).
65. Jin, L., Zheng, Y., Li, J., and Liu, Y., "A study of novel regenerative braking system based on supercapacitor for electric vehicle driven by in-wheel motors", *Advances In Mechanical Engineering*, 7 (3): 1687814015573762 (2015).
66. Zou, Z., Cao, J., Cao, B., and Chen, W., "Evaluation strategy of regenerative braking energy for supercapacitor vehicle", *ISA Transactions*, 55: 234–240 (2015).
67. Xu, G., Xu, K., Zheng, C., Zhang, X., and Zahid, T., "Fully electrified regenerative braking control for deep energy recovery and maintaining safety of electric vehicles", *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 65 (3): 1186–1198 (2016).
68. Dadashnialehi, A., Bab-Hadiashar, A., Cao, Z., and Kapoor, A., "Intelligent sensorless antilock braking system for brushless in-wheel electric vehicles", *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 62 (3): 1629–1638 (2015).
69. Savitski, D., Ivanov, V., Shyrokau, B., Pütz, T., De Smet, J., and Theunissen, J., "Experimental investigations on continuous regenerative anti-lock braking system of full electric vehicle", *International Journal Of Automotive Technology*, 17 (2): 327–338 (2016).
70. Ko, J. W., Ko, S. Y., Kim, I. S., Hyun, D. Y., and Kim, H. S., "Co-operative

control for regenerative braking and friction braking to increase energy recovery without wheel lock", *International Journal Of Automotive Technology*, 15 (2): 253-262 (2014).

71. Lv, C., Zhang, J., Li, Y., Sun, D., and Yuan, Y., "Hardware-in-the-loop simulation of pressure-difference-limiting modulation of the hydraulic brake for regenerative braking control of electric vehicles", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part D: Journal Of Automobile Engineering*, 228 (6): 649–662 (2014).
72. Xu, G., Li, W., Xu, K., and Song, Z., "An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles", *Energies*, 4 (9): 1461–1477 (2011).
73. Guo, H., He, H., and Sun, F., "A combined cooperative braking model with a predictive control strategy in an electric vehicle", *Energies*, 6 (12): 6455–6475 (2013).
74. Lian, Y., Tian, Y., Hu, L., and Yin, C., "A new braking force distribution strategy for electric vehicle based on regenerative braking strength continuity", *Journal Of Central South University*, 20 (12): 3481–3489 (2013).
75. Kanarachos, S., Alirezaei, M., Jansen, S., and Maurice, J.-P., "Control allocation for regenerative braking of electric vehicles with an electric motor at the front axle using the state-dependent Riccati equation control technique", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part D: Journal Of Automobile Engineering*, 228 (2): 129–143 (2014).
76. Kumar, C. S. N. and Subramanian, S. C., "Cooperative control of regenerative braking and friction braking for a hybrid electric vehicle", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part D: Journal Of Automobile Engineering*, 230 (1): 103–116 (2016).
77. Kwon, M. H., Park, J. H., Gwak, G. S., Huh, J. W., Choi, H. K., and Hwang, S. H., "Cooperative control for friction and regenerative braking systems considering dynamic characteristic and temperature condition", *International Journal Of Automotive Technology*, 17 (3): 437–446 (2016).
78. Luo, Y., Han, Y., Chen, L., and Li, K., "Downhill safety assistance control for hybrid electric vehicles based on the downhill driver's intention model", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part D: Journal Of Automobile Engineering*, 229 (13): 1848–1860 (2015).
79. Ko, J., Ko, S., Son, H., Yoo, B., Cheon, J., and Kim, H., "Development of brake system and regenerative braking cooperative control algorithm for automatic-transmission-based hybrid electric vehicles", *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 64 (2): 431–440 (2015).
80. Oleksowicz, S., Ruta, M., Burnham, K., Curry, E., and Garces, H., "Legal, Safety and Practical Regenerative Braking Control Challenges", *Measurement And*

- Control*, 46 (9): 283–288 (2013).
81. Lu, D., Ouyang, M., Gu, J., and Li, J., "Instantaneous optimal regenerative braking control for a permanent-magnet synchronous motor in a four-wheel-drive electric vehicle", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part D: Journal Of Automobile Engineering*, 228 (8): 894–908 (2014).
 82. Pennycott, A., De Novellis, L., Gruber, P., and Sorniotti, A., "Optimal braking force allocation for a four-wheel drive fully electric vehicle", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part I: Journal Of Systems And Control Engineering*, 228 (8): 621–628 (2014).
 83. Li, L., Zhang, Y., Yang, C., Yan, B., and Martinez, C. M., "Model predictive control-based efficient energy recovery control strategy for regenerative braking system of hybrid electric bus", *Energy Conversion And Management*, 111: 299–314 (2016).
 84. Ko, S. Y., Ko, J. W., Lee, S. M., Cheon, J. S., and Kim, H. S., "Vehicle velocity estimation using effective inertia for an in-wheel electric vehicle", *International Journal Of Automotive Technology*, 15 (5): 815–821 (2014).
 85. Song, Z., Li, J., Wei, Y., Xu, L., and Ouyang, M., "Interaction of In-wheel permanent magnet synchronous motor with tire dynamics", *Chinese Journal Of Mechanical Engineering*, 28 (3): 470–478 (2015).
 86. Vasiljevic, G., Griparic, K., and Bogdan, S., "Experimental testing of a traction control system with on-line road condition estimation for electric vehicles", *Control & Automation (MED), 2013 21st Mediterranean Conference On*, 296–302 (2013).
 87. Park, G., Lee, S., Jin, S., and Kwak, S., "Integrated modeling and analysis of dynamics for electric vehicle powertrains", *Expert Systems With Applications*, 41 (5): 2595–2607 (2014).
 88. Kang, D. K. and Kim, M. S., "Hardware-in-the-loop simulation to evaluate the drive performance of the electric two-wheelers on a motor dynamometer", *International Journal Of Automotive Technology*, 16 (6): 1031-1040 (2015).
 89. Schroeder, J. C. and Fuchs, F. W., "General analysis and design guideline for a battery buffer system with DC/DC converter and EDLC for electric vehicles and its influence on efficiency", *IEEE Transactions On Power Electronics*, 30 (2): 922–932 (2015).
 90. Soylyu, E., Soylyu, T., and Bayir, R., "Design and Implementation of SOC Prediction for a Li-Ion Battery Pack in an Electric Car with an Embedded System", *Entropy*, 19 (4): 146 (2017).
 91. Bayir, R. and Soylyu, T., "Downhill Speed Control of In-Wheel Motor during Regenerative Braking", *Elektronika Ir Elektrotechnika*, 23 (6): 40–45 (2017).

92. Internet: Eminebea, "DC Brush Motor for Aircraft-Use", http://www.eminebea.com/en/engineering_info/rotary/brushmotor/brushmotor_aircraft/cat/001.shtml (2018).
93. Internet: Maxon Precision Motors, "Highly Dynamic Brushless DC Motors", <https://maxonmotorusa.wordpress.com/2013/12/13/maxon-ec-i40/> (2018).
94. Soyly, T. and Bayir, R., "Mathematical Modelling and Simulating of In-Wheel Motor Using Matlab/Simulink", *16th International Power Electronics And Motion Control Conference And Exposition (PEMC 2014)*, 816–820 (2014).
95. Ziegler, J. G. and Nichols, N. B., "Optimum settings for automatic controllers", *Trans. ASME*, 64 (11): 759-765 (1942).
96. He, S.-Z., Tan, S., Xu, F.-L., and Wang, P.-Z., "Fuzzy self-tuning of PID controllers", *Fuzzy Sets And Systems*, 56 (1): 37–46 (1993).
97. Ang, K. H., Chong, G., and Li, Y., "PID control system analysis, design, and technology", *IEEE Transactions On Control Systems Technology*, 13 (4): 559–576 (2005).
98. Zadeh, L. A., "Fuzzy sets", *Information And Control*, 83: 338-353 (1965).
99. Mamdani, E. H. and Assilian, S., "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", *International Journal Of Man-machine Studies*, 7 (1): 1–13 (1975).
100. Larsen, P. M., "Industrial applications of fuzzy logic control", *International Journal Of Man-Machine Studies*, 12 (1): 3–10 (1980).
101. Sugeno, M., "An introductory survey of fuzzy control", *Information Sciences*, 36 (1–2): 59–83 (1985).
102. Soyly, T. and Bayir, R., "Test Stand Establishing For An In Wheel Motor", *2nd International Conference On Science, Ecology And Technology (ICONSETE'2016)*, 760–767 (2016).
103. Giakoumis, E. G., "Light-Duty Vehicles", *Driving and Engine Cycles*, Springer International Publishing, Cham, 65–166 (2017).

ÖZGEÇMİŞ

Tuncay SOYLU 1983 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Profilo Anadolu Teknik Lisesi Elektronik Bölümü'nden 2001 yılında mezun oldu. Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dalı'ndan 2007 yılında mezun olarak lisans öğrenimini tamamladı. 2009 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Yüksek lisans öğrenimini Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı'nda 2011 yılında tamamladı. Aynı yıl Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği doktora programına başladı. 2016 yılında Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı ve halen aynı yerde çalışmaya devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi
Demir Çelik Kampüsü / KARABÜK
Tel : 0(370) 418 71 08 /1230
E-posta : tuncaysoylu@karabuk.edu.tr