

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞRUDAN MOMENT KONTROL YÖNTEMİ KULLANILARAK RAYLI
SİSTEM ARACI ELEKTRİKLİ CER MOTOR KONTROLÜ VE
SİMÜLASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih Tuna CERRAH

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

ARALIK 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞRUDAN MOMENT KONTROL YÖNTEMİ KULLANILARAK RAYLI
SİSİTEM ARACI ELEKTRİKLİ CER MOTOR KONTROLÜ VE
SİMÜLASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Fatih Tuna CERRAH
(504131111)**

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN

ARALIK 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504131111 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Fatih Tuna CERRAH, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DOĞRUDAN MOMENT KONTROL YÖNTEMİ KULLANILARAK RAYLI SİSTEM ARACI ELEKTRİKLİ CER MOTOR KONTROLÜ VE SİMÜLASYONU” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ovsanna Seta ESTRADA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd.Doç. Dr. İlker ÜSTOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 14 Kasım 2017
Savunma Tarihi : 15 Aralık 2017





Aileme,



ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında bilgi ve deneyimleri ile bana her konuda destek olan tez danışman hocam Sayın Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN'a ve gerekli olan parametreleri elde etmemi sağlayan Metro İstanbul A.Ş. ailesine teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca yüksek lisans öğrenimim boyunca ve bu tezi yazarken kahrımı çeken ve hiç bir fedakarlıktan kaçınmadan beni destekleyen aileme sonsuz teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım. .

Kasım 2017

Fatih Tuna Cerrah
Elektrik-Elektronik Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
2. DEMİRYOLU ARAÇLARINDA KULLANILAN TAHRİK SİSTEMLERİ VE KARŞILAŞTIRILMALARI.....	3
2.1 Tahrik Sistemleri	3
2.1.1 Buharlı tahrik sistemleri.....	3
2.1.2 Dizel tahrik sistemleri	3
2.1.3 Elektrikli Tahrik Sistemleri.....	5
2.2 Tahrik Sistemlerinin Karşılaştırılması	7
2.2.1 Tahrik sistemlerinde enerji verimliliği karşılaştırılması	8
2.3 Elektrikli CER Motorları.....	9
2.3.1 Doğru akım motorları.....	9
2.3.2 Alternatif akım motorları	10
2.3.2.1 Sincap kafesli asenkron motor yapısı.....	11
3. DEMİRYOLU ARACINA ETKİYEN KUVVETLER.....	13
3.1 Ray Teker İlişkisi	13
3.2 Araca Etkiyen Dirençler.....	16
3.2.1 Hava direnci	17
3.2.2 Yuvarlanma direnci.....	17
3.2.3 Kurp direnci	18
3.2.4 Eğim direnci.....	18
4. CER EĞRİSİ	19
4.1 Tutunma Kuvveti.....	19
4.2 Maksimum Cer Kuvveti	20
4.3 Sabit Güç Hiperbolü.....	20
4.4 CER Eğrisi Çizimi.....	20
5. ASENKRON MOTOR KONTROL YÖNTEMLERİ	25
5.1 Skalar Kontrol	25
5.2 Vektör ya da Alan Yönlendirmeli Kontrol.....	26
5.3 Doğrudan Moment Kontrol Yöntemi	28

6. DOĞRUDAN MOMENT KONTROL YÖNTEMİ İLE RAYLI SİSTEM ARACI CER MOTORU KONTROL SİMÜLASYONU	33
6.1 Simülasyon Bölümleri	34
6.1.1 Asenkron motor.....	34
6.1.2 DC bara ve rejeneratif frenleme	34
6.1.3 Araç üzerine etki eden dirençlerin simülasyonda uygulanması	35
6.1.3.1 Hava sürtünmesi, yuvarlanma ve ivmelenme dirençleri	35
6.1.3.2 Kurp ve eğim dirençleri.....	36
6.1.4 Kontrol yapısı.....	37
6.1.5 Hız Referansı.....	40
6.2 Simülasyon Sonuçları.....	42
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	47
KAYNAKLAR.....	49
ÖZGEÇMİŞ.....	51



KISALTMALAR

AC	: Alternative Current
DC	: Direct Current
V	: Volt
kV	: kiloVolt
Hz	: Herz
ABB	: Asea Brown Boveri
LRT	: Light Rail Vehicle
kW	: kiloWatt
KTA	: Köln Tramvey Aracı
DEMU	: Diesel Multiple Unit
GTO	: Gate Turn Off Thyristor
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
MCCAF	: Mitsubishi-CAF
SNCF	: Société nationale des chemins de fer français (Fransız Ulusal Demiryolları Şirketi)
DB	: Deutsche Bahn
USA	: United States of America
kN	: kiloNewton
km/h	: kilometre/saat
PWM	: Pulse with Modulation
DTC	: Direct Torque Control
HP	: Hourse Power



SEMBOLLER

m_{stc}	: Statik araç kütlesi
m_{vb}	: Gövde kütlesi
$m_{w,j}, m_{x,j}, m_{br,j}$	: Sırası ile teker, aks ve mekanik fren kütleleri
$m_{m,k}, m_{g,k}$	: Motor ve dişli kütleleri
$m_{b,i}$	: Bogie kütlesi
$V_{w,k}$	: Çizgisel hız
λ	: Kayma
r	: Nominal tekerlek çapı
m_e	: Etkin kütlesi
η	: Dişli verimi
n^k	: Dişli çevrim oranı
$J_{w,k}$	: Eylemsizlik momenti
μ_a	: Tutunma katsayısı
V	: Araç hızı
F_L	: Toplam direnç kuvveti
F_{air}	: Hava direnci
F_{roll}	: Yuvarlanma direnci
F_c	: Kurp direnci
F_g	: Eğim direnci
C_d	: Hava direnç katsayısı
A_v	: Aracın ön kısmının kesit alanı
ρ_{air}	: Havanın yoğunluk
q	: Toplam havalandırma debisi
C_0	: Hava dinamiğinin hızın karesi ile ifade edilmeyen katsayısı
L_t	: Aracın ön kısmının kesit alanı
$w_{x,k}$	: Aks yükü
A_p, B_p, C_p, D_p	: Direnç katsayıları
R_y	: Kurp yarıçapı
m_{dyn}	: Aracın kütlesi
g	: Yerçekimi ivmesi
α	: Eğim açısı
F_p	: Yuvarlanma ve hava sürtünme dirençleri
a	: Aracın ivmesi
F_p	: Maksimum cer kuvveti
V_{pmax}	: Motorun maksimum güçteki hızı
w_r	: Rotor açısal hızı
w_r^*	: Rotor açısal hız referansı
w_{sl}^*	: Kontrol edilmiş ve sınırlandırılmış kayma açısal hızı
V_s^*	: Maksimum değeri sınırlandırılmış inverter referans gerilimi
w_e^*	: Frekans referansı
V_d	: İnverter besleme gerilimi
V_1, V_2, V_3	: Direnç katsayıları

V_{ω}, V_{β}	: Clark dönüşümü ile bulunan iki faz stator gerilimi
V_d, V_q	: Park dönüşümü ile bulunan iki faz stator gerilimi
Ψ_r	: Rotor akısını oluşturan akı bileşeni
Ψ_s^*	: Stator akı referansı
T^*	: Moment referansı
Ψ_s	: Statorda hesaplanan akı referansı
H_T	: Moment histerisiz girişi
H_{ψ}	: Akı histerisiz girişi
$S(k)$	: Akı bölge numarası



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Farklı şirketlerin kullanmış olduğu tutunma katsayısı örnekleri.....	20
Çizelge 4.2 : Cer eğrisi çizilirken kullanılan değerler.	21
Çizelge 5.1 : İnverter gerilim vektörleri anahtarlama tablosu.	31





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Buharlı lokomotif.	3
Şekil 2.2 : TCDD DH9500 dizel hidrolik lokomotif.	4
Şekil 2.3 : Dizel elektrik lokomotif.	4
Şekil 2.4 : İstanbul Tramvay Aracı.	5
Şekil 2.5 : Pantograf.	6
Şekil 2.6 : 3. Ray örnekleri.	6
Şekil 2.7 : Elektrikli ve dizel tahrik sistemi karşılaştırması.	9
Şekil 2.8 : Sincap kafesli motor yapısı.	11
Şekil 3.1 : Teker-ray.	13
Şekil 3.2 : Motorlu aks örneği.	14
Şekil 3.3 : Raya ve tekere etki eden kuvvetler.	15
Şekil 3.4 : Farklı ray yüzeyi için tutunma katsayısı.	16
Şekil 4.1 : CER Eğrisi.	21
Şekil 4.2 : Hesaplanan CER Eğrisi.	22
Şekil 4.3 : İTA CER Eğrisi.	22
Şekil 5.1 : Skalar kontrol yöntemi ile kapalı çevrim asenkron motor hız kontrolü blok diagramı.	26
Şekil 5.2 : Clarke-Park dönüşümü.	27
Şekil 5.3 : Clarke-Park dönüşümü gösterimi.	28
Şekil 5.4 : Genel DTC blok diagram gösterimi.	29
Şekil 5.5 : DTC kontrolde stator akı vektörleri.	30
Şekil 5.6 : Inverter gerilim vektörleri ve bu gerileme karşılık düşen akı vektörleri ...	31
Şekil 6.1 : Simülasyon modeli.	33
Şekil 6.2 : Araca etki eden dirençler.	35
Şekil 6.3 : M1 metro hattı Yenikapı-Fatih bölümü.	36
Şekil 6.4 : Kurp direnci.	37
Şekil 6.5 : Eğim direnci.	37
Şekil 6.6 : Kontrol yapısı.	38
Şekil 6.7 : Sürücü modeli.	39
Şekil 6.8 : Alan zayıflatma modeli.	39
Şekil 6.9 : Doğrudan moment kontrolü.	40
Şekil 6.10 : Uygulanan hız referansı.	41
Şekil 6.11 : Referans hız ve gerçekleşen hız grafikleri.	42
Şekil 6.12 : Moment-zaman grafiği.	44
Şekil 6.13 : Katener gerilimi - zaman grafiği.	44
Şekil 6.14 : Rotor akımı - zaman grafiği.	45
Şekil 6.15 : Akı-zaman grafiği.	45



DOĞRUDAN MOMENT KONTROL YÖNTEMİ KULLANILARAK RAYLI SİSTEM ARACI ELEKTRİKLİ CER MOTOR KONTROLÜ VE SİMULASYONU

ÖZET

Raylı sistem araçları için önemli olan kavramlar söylenmek istendiğinde ilk akla gelenler; güvenlik, konfor, hız ve verimliliklerdir. Güvenlik kavramı için aracı en kısa mesafede durdurma, aracın hareketi esnasında yolcu kapılarının sürekli takibi, kapıların açılması durumunda aracı durdurma, kapıların açık olduğu durumlarda aracı hareket ettirmeme v.b. önlemler alınır. Yolcuların konforu için frenleme ve hızlanma ivmesinin belli sınırların altında olması, araç cer motor hareketlerinin sarsıntıya neden olmaması ve kurplarda yolcuların minimum derecede sarsılmaları istenmektedir. Raylı sistem araçlarında hız kavramı, şehirler arası ulaşım için önemlidir. Şehir içi raylı sistem araçlarında belirlenmiş olan hız sınırları, metro araçlarında 80 km/h olarak belirlenmişken, tramvay araçları için ise 50 km/h olarak belirlenmiştir.

Raylı sistem araçlarında verimlilik güvenlikten sonra gelir. Örneğin acil frenleme durumuna geçmiş bir araçta, rejeneratif frenleme ile kazanılan enerji katener hattındaki enerji durumu kontrol edilmeksizin fren rezistörlerinde yakılır. Bunun nedeni 1 saniyelik frenleme gecikmesi, maksimum hızda giden bir aracın normal durması gereken koşuldan yaklaşık 23 metre daha yol alması anlamına gelmektedir. Bunun engellenmesi için katener hattı izlenmeksizin elde edilen enerji fren rezistörlerinde yakılır. Elektrikli raylı sistem araçlarında enerji verimliliği, tam makinist kullanımında tamamiyle makinistin aracı kullanma stiline bağlıyken, sürücüsüz raylı sistem araçlarında verimliliği artırma üzerine bir algoritma ile araç kontrol edilmektedir.

Raylı sistem araçlarının kullanılmaya başlamasından bu güne kadar geçen sürede verimlilik hızla önem kazanırken, gelecekte de verimliliğin ön planda olacağı aşikardır. Üretilen ilk raylı sistem araçlarında buharlı tahrik sistemi kullanılırken su ve suyun ısıtılması için kullanılacak olan yakıt (kömür, fuel oil v.b.) aracın içinde taşınarak aracın ağırlaşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle araç verimliliği bir hayli düşmekteydi. Elektrik motorlarının kullanılmaya başlanması ile pantograf üzerinden alınan enerji direkt olarak motorlar da kullanılabilir. Böylece araç içerisinde taşınan yakıta gerek duyulmaz, dönüşümler neticesinde oluşan enerji kayıpları minimize edilir ve rejeneratif frenleme neticesinde enerji kazanımı gerçekleştirilebilir.

Raylı sistem araçlarında elektrik motorun ilk kullanılmaya başladığı yıllardan 90'lı yıllara kadar süre gelen zaman diliminde doğru akım motorlarının sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. 90'lı yıllarda yarı iletken teknolojisinin gelişmesi ile alternatif akım motorlarının raylı sistem araçlarında kullanımı yaygınlaşmıştır. Özellikle asenkron motorun gelişen teknoloji ile kolay kontrol edilebilir hale gelmesi

demiryolu araçlarında doğru akım motor kullanımını sonlandırmıştır. Simülasyonda kullanılmak üzere seçmiş olduğumuz cer motorunun uygunluğunun tespiti için cer eğrisi oluşturularak İTA üzerinde kullanılan cer motoru cer eğrisi üzerinden karşılaştırması yapıldı.

Aracın basit modelinin oluşturulabilmesi için gerekli olan ray-teker ilişkisi incelendi. Ray teker ilişkisi demiryolu araçlarında önem arz etmektedir. Bunun nedeni düşük dürtünme nedeni ile çekiş gücünün ve frenleme kuvvetinin raylara tam aktarılamaması, bunun neticesinde kayma kızıklama denilen problemlerin yaşanmasıdır. Ayrıca aracın basit modelinde kullanılmak üzere aracın üzerine etkileyen direnç kuvvetleri bu tezde incelendi. Aracın modelinin oluşturulması bu araç için farklı hatlardaki davranışlarının gözlemlenebilirliğini bize sunmaktadır.

Asenkron motor kontrol yöntemlerinden skalar kontrol yöntemi, doğrudan vektör kontrol yöntemi ve doğrudan moment kontrol yöntemi incelendi. Bu yöntemler arasında doğrudan moment kontrol yöntemi üzerinde duruldu. Matlab/Simulink ortamında basit raylı sistem araç modeli ile doğrudan moment kontrol yöntemi kullanılarak cer motoru kontrol simülasyonu gerçekleştirildi.

Doğrudan kontrol yönteminin simülasyonda kullanılmasındaki nedenlerden biri motor parametrelerinin sisteme olan etkisinin azaltılmak istenmesi iken bir diğer neden ise moment ve akı hatasında oluşabilecek değişimler eviricilerdeki anahtarlama dizisi sayesinde anında düzeltilerek, hızlı bir moment cevabının elde edilebilmesidir.

Simülasyonda gerçeğe çok yakın eğim ve kurp değerleri kullanılarak sadece tek motora sahip bir shaftın hareket ettirilmesi simüle edilmeye çalışılmıştır. Bu nedenle hattın eğim ve kurp değerlerinin yüksek olduğu bölümler simülasyon için seçilmiştir. Referans hızın seçilmesinde makinist davranışları göz önünde bulundurularak grafik oluşturulmuştur.

Simülasyonun gerçekleştirilmesi sonucunda, referans rotor hız grafiği ile simülasyonda görülen rotor hız grafiği karşılaştırılması yapılmış, moment-zaman grafiğinde yolun ve referans hızın etkisi incelenmiş, katener geriliminin hızlanma ve frenleme ile değişimleri görülmüştür. Ayrıca rotor akımı - zaman grafiği ve akı-zaman grafiği oluşturulmuştur.

Simülasyon için kullanılan yol modeli gerçek bir yol modeline çok benzemesi ve referans hızın makinist hareketlerini göz önüne alarak oluşturulması nedeni ile harcanan enerji değerlerinin gerçeğe yakın çıkabileceği düşünülmektedir. Simülasyon sonuçları ile gerçekte araç üzerinden alınan sonuçlar karşılaştırılıp simülasyon değerlerinin araç üzeri değerler ile örtüştürülmesi sağlanabilir.

ELECTRICAL RAILWAY TRACTION SYSTEM CONTROL AND SIMULATION WITH USING DIRECT TORQUE CONTROL

SUMMARY

In the railway industry, there are four important topic which are safety, comfort, speed and efficiency. For safety, there are many precautions. Some of this precautions are ability of stopping at suitable distance in the international standard, monitoring vehicle doors when vehicle moving and stopping when one of the door open, blocing the moving when doors open etc.

For comfort, moving acceleration and braking acceleration should be under the limit which is writing in the international standard. Vehicle traction should work smooth and shouldn't jerk passenger. When getting curve, as traction behavior, vehicle shouldn't jerk passenger. All comfort issues are for passenger.

Speed is important for intercity trains on the other hand urban trains have speed limits because of safety issues so speed isn't important for urban rail transportation. This limits can be change for different lines but generally on the underground lines have 80 km/h maximum speed limitation and on the tram lines have 50 km/h maximum speed limitaion.

Efficiency comes after safety in railway vehicles. For example when rail vehicle is doing emergency brake, vehicle doesn't send regain energy to catenary line. This energy burn in the brake resistance even if there is lack of energy on the catenary line. Tram vehicles are driven by machinist who controls the energy efficiency. But unattended vehicles doesn't need someone so their energy efficiencies is controled by algorithm which control online catenary line energy and other vehicles location. Thus, energy saving is provided.

Energy efficiency is getting important from the beginning of the using electric motors of railway vehicles to this day and it is not hard to guess that it will continue to getting important. Because reaching energy won't find easy in the future.

First rail vehicles had steam engine which needed a lot of water and fuel for heating water. Fuel and water were carried separately on tank by vehicle. This load made heavier the vehicle. For this reason, energy efficiency got low. With the introduction of using electrical motors for railway vehicle, energy have been coming direct to vehicle over pantograph. So that, vehicles with electric motor don't need to carring fuel, energy loses decrease and regenerative braking can be use.

DC motors mostly had been using from begininig of the using electrical motor in the rail vehicle to 90's. With the evolution of semiconducting technology, AC motors was begun to use for rail vehicles. Especially induction motor can be controled easily by this way using DC motor decreased.

There are few things prefering AC motors to DC motors. First of all maintainability of AC motors is easy than DC motor. The other one, AC motors are cheaper than DC motors.

Correlation of rail-wheel and resistance which is effect to the vehicle are studied at this thesis for using basic model in the Matlab/Simulink simulation. Resistive effect which can be said as air resistance, roll resistance, curve resistance, grade resistance

and acceleration resistance, isn't same all conduction. They are changeable for different conductions. Railway construction is important for resistive effects.

Traction effort curve have been created for finding suitability of using traction motor and we have compared real motor traction effort curve and simulating motor effort curve.

There are many control technique for induction machine. In this thesis, scalar control, direct vector control and direct torque control techniques are studied. Direct torque control technique was chosen to dwell because of some advantages. Rail vehicle simulation was used with direct torque control of induction motor in the Matlab/Simulink.

Direct torque control technique was used for simulation because effect of the specific motor parameters were wanted to decrease in the system. The other cause for using direct torque control technique is decreasing to effect of rapid changing torque and flux error. Thus, sudden torque control response is used for induction motor. This can be possible in the inverter switching positions.

Real curve and grade parameters were used and shaft with a motor moved in this line in the simulation. High curve and high grade points of line were chosen for moving the shaft because of seeing the performance of induction motor. Creating the reference speed curve comes from rail vehicle drives behavior. All drivers have different drive style but speed limits don't permit this behavior. Reference speed curve was created in general purpose.

As a result of simulation, graph of reference rotor speed compared with result of simulation rotor speed. Graph of motor torque-time was studied in a line conduction as curve, grade and in a conduction of acceleration. Overflow conductions were decreased by tuning the control parameter.

Catenary voltage was monitored with changing the front acceleration and braking acceleration. When braking position, regenerative effect can be seen clearly. In addition graph of flux-time was drawn and field weakening place was seen easily. It should be done for reaching high speed in induction motors. The other drawing graph is rotor current – time graph.

In simulation, using line modal and using speed reference are like real line and vehicle speed. Therefore we can think that vehicle spent same energy in real life and in simulation. Generally we have to compare with real results and simulation results. Even if simulation not same exactly real, can be closed. If it is close, we can work for simulation like real but it must be acceptable.

Rail vehicle traction motors are open for new developing side. Especially energy efficiency of rail vehicle can be improve. Control techniques can be develop for efficiency, different control techniques can be used for same time for efficiency or for different line different control techniques can be used.

Like in the other industries, future of railway industry is unattended in an other word driveless system. Driver will be algorithm in unattended systems. In this algorithm will have different control techniques which will work with traction control techniques. For this reasons energy efficiency control will be getting easier rather than with driver system.

Our simulation can be developed for different techniques or six car 144 meter metro vehicle and we can use this simulation for developing to unattended rail vehicle algorithm.

Keywords: Rail vehicle, traction system, safety comfort, speed, efficiency, rail vehicle resistive effects, traction effort curve, scalar control, direct vector control, direct torque control.





1. GİRİŞ

Ülkemizde gelişmeye açık olan demiryolu ulaşım sistemlerinin güvenli ve ucuz olması bu sektörü önemli kılmakta ve her geçen gün önemini arttırmaktadır. Yeni yatırımlar ve düzenlemeler ile birlikte karayollarında halihazırda taşınmakta olan yük ve yolcuların, demiryolu ile taşınması hedeflenmektedir.

Ülkemizde hızlı bir gelişim süreci içine giren raylı sistem sektörünün farklı ihtiyaçları göze çarpmaktadır. Bu ihtiyaçları karşılamak için raylı sistem araçlarında güvenlik düzeylerinin artırılarak hızın ve verimliliğin artırılması, üretim ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi amaçlanmaktadır.

Verimliliğin artırılması ile birlikte referans hatalarının sistemi etkilemesi yolcu taşımacılığında konforu olumsuz yönde etkiler. Frenleme durumunda, frenleme ivmesine hızlı cevap verilememesi ise güvenliği olumsuz yönde etkileyebilecek faktörlerden biridir. Cer motor kontrol yöntemlerinin uygulanmasında güvenlik, konfor, verimlilik ve hız referansının takibi önemlidir.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezde, raylı sistem araçlarında kullanılmaya başlanan buharlı tahrik sistemlerinden başlanarak genel olarak günümüze kadar ulaşan tahrik sistemleri incelendi. Günümüzde kullanılmakta olan elektrikli tahrik sistemlerinin tercih edilme nedenleri ele alındı.

Elektrikli tahrik sistem çeşitleri anlatılacak ve günümüzde ön plana çıkan cer sistemi üzerinde duruldu. Raylı sistem aracı üzerine etkiyen direnç kuvvetleri ve ray eker ilişkisi raylı sistem aracının basit modelinde kullanılmak üzere matematiksel şekilde ifade edildi. Hava direnci, ivmelenme direnci, kurp direnci ve eğim direnci araç üzerine etkiyen değerlerin motora olan etkileri gözlemlendi.

Motor seçiminin belirlenmesinde kullanılmak üzere elimizdeki parametreler ile cer eğrisi çizildi ve bu cer eğrisi üzerinden tutunma kuvvetinin raylı sistem araçlarında kullanımı gösterildi.

Asenkron motor kontrol yöntemlerinden skalar kontrol, doğrudan vektör kontrol ve doğrudan moment kontrol yöntemleri incelendi ve simülasyonda uygulanacak olan raylı sistem araç modelinde kullanılmak üzere bu kontrol yöntemlerinden biri seçildi.

Seçilen kontrol yöntemi ile simülasyonda hız referansının uygulaması yapıldı, referans ile sistem cevabı kontrol edilerek motor moment, akım, akı, hat gerilimi gibi motorda ölçülen değerlerin yorumları yapıldı.

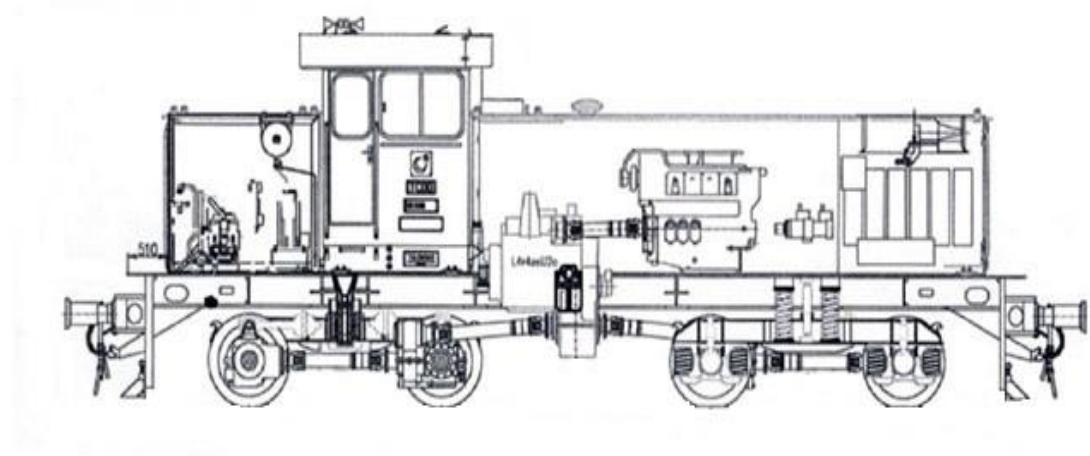
Gerçeğe yakın araç durumu ve çevre koşulu için cer motor davranışlarının gözlemlenmesi bu tezin asıl amacıdır. Raylı sistem araçlarında verimliliğin arttırılabilmesi için yapılabilecek çalışmalara temel oluşturulabilmesi tezin bir diğer amacı olarak söylenebilir.

1.2 Literatür Araştırması

Bu çalışmada raylı sistem aracının basit modeli çıkartıldıve elektrikli cer motor kontrolü ile ilgili literatür araştırması yapıldı. Özellikle son zamanlarda yazılmış olan makalelerde doğrudan moment kontrol yönteminin kullanımının bir hayli arttığı gözlemlendi. Raylı sistem aracına etki eden direnç kuvvetleri ve ray taker ilişkisi demiryolu araç üretici şirketleri ve demir yolu araç işletmecisi şirketlerinin yoğunlaştığı alanlardır. Direnç ve ray taker ilişkisi raylı sistem modellerine direkt etki etmektedir.

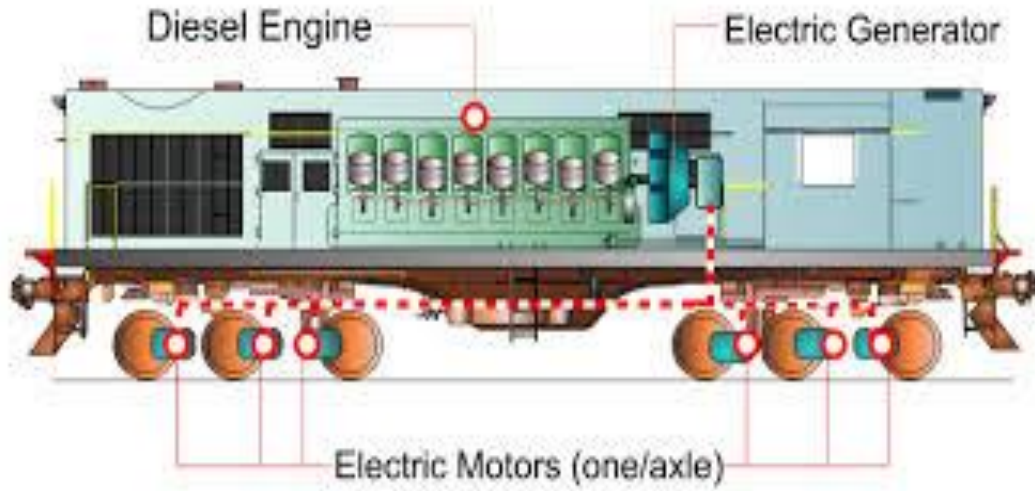
Asenkron motor kontrol yöntemleri kullanılan yöntemin belirlenmesi amacı ilke araştırıldı. Asenkron motor kontrol tekniklerinden skalar kontrol, doğrudan vektör kontrol ve doğrudan moment kontrol yöntemleri ile ilgili yurt içi ve yurt dışında yapılmış olan çalışmaları incelendi.

Dizel hidrolik araçlar; dizel motoru hidrolik pompa gibi kullanarak hidrolik basınçtan hareket enerjisi üretir. Kısa mesafeli ve manevra için kullanılan araçlardır.

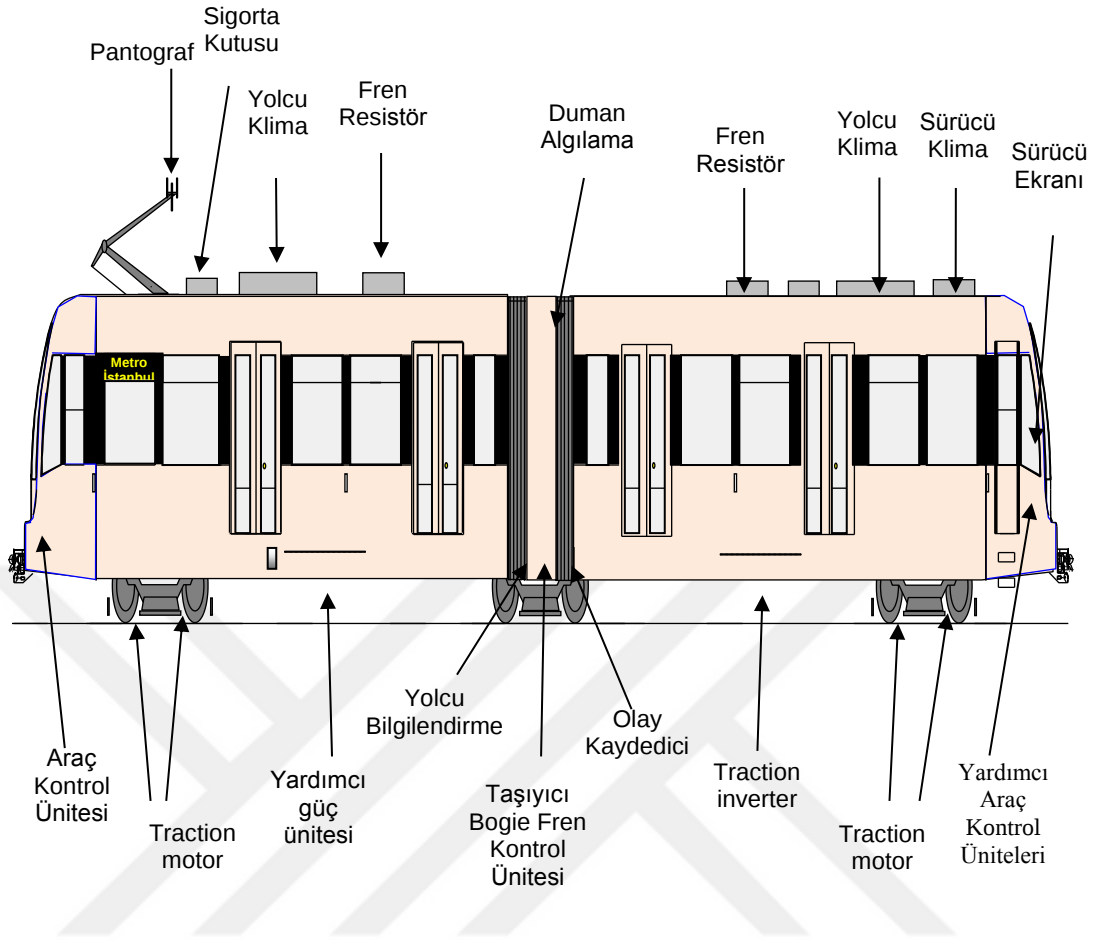


Şekil 2.2 : TCDD DH9500 dizel hidrolik lokomotif.

Dizel elektrik araçlar; dizel motorunu elektrik üretmek için jeneratör olarak kullanır ve üretilen elektrik enerjisi ile elektrikli motorları hareket ettirilir. Buharlı trenlere göre durmaksızın uzun mesafeler katedebilirler.



Şekil 2.3 : Dizel elektrik lokomotif.

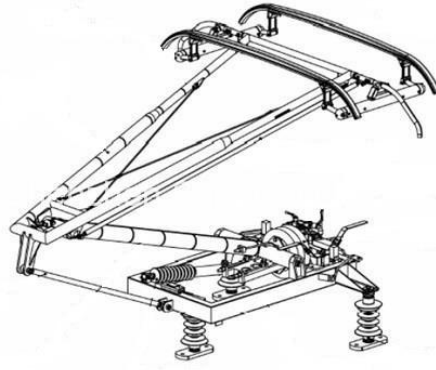


Şekil 2.4 : İstanbul Tramvay Aracı.

2.1.3 Elektrikli Tahrik Sistemleri

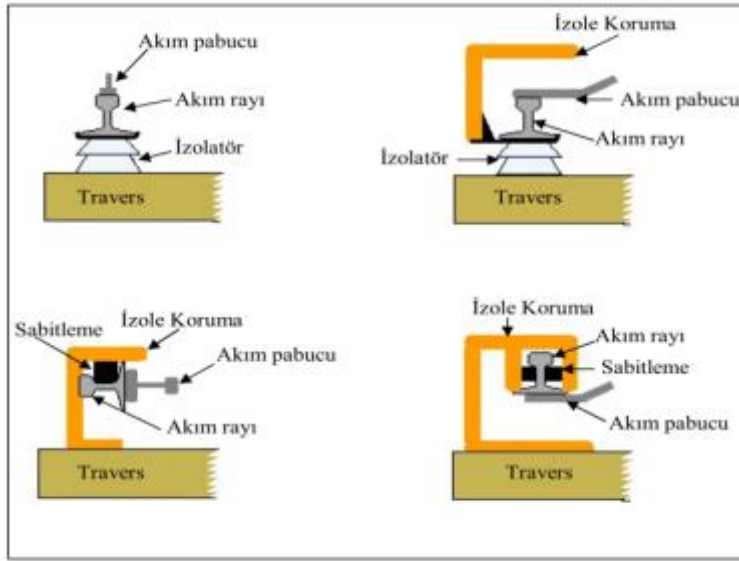
Elektrikli tahrik sistemleri, katener hattından ve ya 3. raydan alınan elektrik enerjisini elektrik motorları ile hareket enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Elektrik tahrik sistemli araçlar, enerjiyi araç içersinde üretmeyip dışarıdan alabilmesi nedeniyle ikmal problemi olmayan bu nedenle çok uzak mesafelere durmaksızın gidebilen araçlardır.

Elektrikli tahrik sistemlerinin en büyük dezavantajı elektrik enerjisinin kullanıldığı yere kadar olan taşınmasının getirmiş olduğu yüksek maliyettir. Bu nedenle katener adı verilen yol boyunca uzanan elektrik besleme hatları kullanılır. Katenerden elektrik enerjisini kömürleri aracılığı ile alan ekipmana pantograf denir.



Şekil 2.5 : Pantograf.

3. Ray ekipmanı ile demir yolunun yan tarafında bulunan bir raydan fırçalar yardımı ile besleme gerilimi araç içerisine alınır. 3. Ray sistemi şehir içi raylı sistem araçlarında 120 km/s hıza kadar kullanılabilir.



Şekil 2.6 : 3. Ray örnekleri.

Katener/3. Ray hatlarından elektrikli tahrik sistemlerine gelen besleme doğru akım (DC) ile yapılabildiği gibi tek fazlı alternatif akım (AC) ile de yapılabilmektedir. Demiryolu sistemlerinde kullanılan besleme gerilimleri aşağıda verilmiştir[1]:

DC gerilimler;

750 V

1500 V

3000 V

AC tek fazlı gerilimler

25 kV-50 Hz

15 kV-16.67 Hz

Gerilimlerin farklılık göstermesinin sebebi demiryolu araçlarının kullanım sebeplerinden kaynaklanmaktadır. Şehir içi raylı sistem araçlarında doğru akım ve düşük gerilimler tercih edilirken, uzak mesafelere giden ve hızlı araçlar için alternatif akımlar ve yüksek gerilim tercih edilmektedir.

2.2 Tahrik Sistemlerinin Karşılaştırılması

Elektrikli tahrik sistemleri ile diğer tahrik sistemlerini karşılaştırdığımızda avantajları ile karşılaştığımız gibi dezavantajları ile de karşılaşmaktadır. Dezavantajlarının başında daha önce de belirtildiği gibi elektrifikasyon maliyetleri gelmektedir [2]. Hat boyunca çekilmesi gereken katener hattı yüksek maliyet getirmektedir. Bu katener hattı için daha öne yapılmış olan tünel gibi yeterince yüksek olmayan bir kısım yapıların yenilenmesi de gerekmektedir. Tüm hattın elektrikli hale getirilmesi ile ulusal şebekede fazla yüklenme gözlenebilir. Direkler ve katener hattı şehir içi sistemler raylı sistemlerde görüntü kirliliğine neden olabilir. Bu gibi durumlarda 3. Ray ve ya kısa mesafelerde batarya ve süper kapasitör gibi sistemler ile bu durumun önüne geçilebilir. Katener sistemi dış etkenler nedeni ile hasar görebilir. Katener telinin kopması durumunda ulaşımda aksamalar gerçekleşebilir. Katener sistemi iletkenlerini hurda bakır olarak satmak amacıyla hırsızlık olayları yaşanabilmektedir.

Elektrikli tahrik sisteminin diğer sistemler ile karşılaştırılması ile olumlu yönleri daha ağır basmaktadır. Bunları sıraladığımızda[2]:

- Elektrikli demiryolu araçlarının üretimi, iletilmesi ve bakımı diğer tahrik sistemi ile çalışan araçlara göre daha az maliyetlidir.
- Elektrikli araçların diğer araçlara göre yüksek güç/ağırlık oranına sahip olması, daha çabuk hızlanma, daha yüksek güçlere erişim, daha yüksek hızlarda seyretme imkanları sağlar.
- Elektrikli tahrik sistemleri diğer araçlara göre neredeyse hiç çalışma gürültüsü oluşturmazlar.

- Demiryolu hatlarında daha hızlı hareket edebilmelerinden aynı hatta daha çok trenin çalıştırılmasına olanak sağlarlar.
- Yüksek rakımlarda güç kaybı yaşamazlar.
- Atık ve duman çıkarmadıklarından yer altı hatlarında çalışma imkanı ve yüksek güvenlik sağlarlar.
- Elektrik enerjisi fosil yakıtlardan elde edilse bile, kalabalık şehirlerde hava kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlarlar.
- Elektrikli motorlar frenleme esnasında enerjinin bir kısmının geri kazanılmasına imkan tanırırlar.
- Elektrikli demiryolu araçları diğer demiryolu araçlarına göre daha verimli olarak çalışırlar.

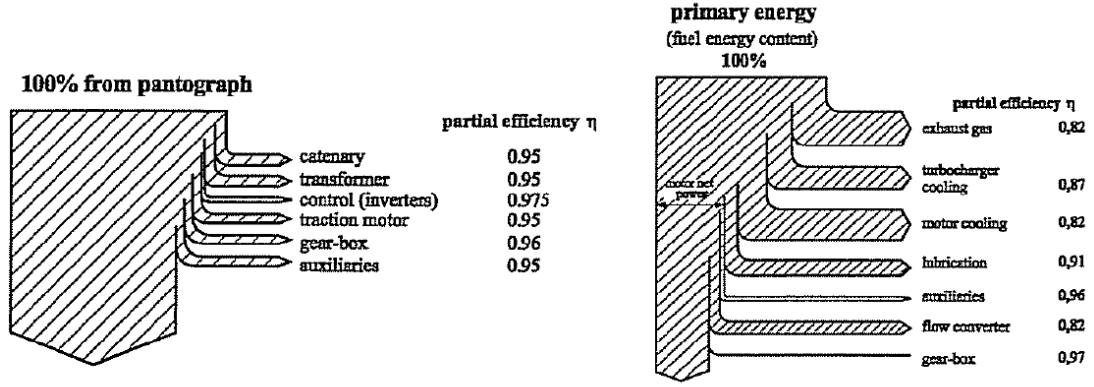
2.2.1 Tahrik sistemlerinde enerji verimliliği karşılaştırılması

Elektrikli demiryolu araçları diğer demiryolu araçlarına göre daha verimli çalışırlar. Elektrik enerjisi üretiminde karbon oranı düşük yakıtlar kullanılması nedeniyle, elektrikli tahrik sistemleri diğer tahrik sistemlerine göre daha az kabondiyoksit salınımı yaparlar

Elektrikli raylı sistem araçları dizel motor ile karşılaştırıldığında, kavrama sistemi ve yakıt ağırlıkları elektrikli araçlarda bulunmamaktadır. Bunun yerine elektrikli tahrik sistemlerinde trafo gibi ekipmanlar bulunur. Buna rağmen elektrik tahrik sistemli araçlar diğer araçlara göre daha hafiftir.

Elektrikli raylı sistem araçlarında rejeneratif frenleme ile enerji geri kazanımı mümkündür. Frenleme ve ya eğimli bölgelerden iniş sırasında motorun ters çalışması ile üretilen enerji hatta verilerek hat üzerinde çalışmakta olan diğer elektrik tahrikli raylı sistem araçlarının kullanımına sunulur.

Elektrik üretim santrallerindeki verim, raylı sistem araçlarının dizel motorları ile elektrik üretilmesindeki verimden yüksek olur. Böylece elektrikli tren sisteminde toplam verim dizelden daha yüksek olur. [3]



Şekil 2.7 : Elektrikli ve dizel tahrik sistemi karşılaştırması.

2.3 Elektrikli CER Motorları

Verimlilik karşılaştırması ve diğer avantajları göz önüne alındığında elektrikli CER sistemleri bir adım öne çıkmaktadır. Elektrikli tahrik sistemi içerisinde, raylı sistem araçları için 2 farklı motor türü de kullanılmaktadır. Bunlar; doğru akım motorları ve alternatif akım motorlarıdır.

2.3.1 Doğru akım motorları

Doğru akım motorları kendi içerisinde üçe ayrılır:

1. Serbest uyarmalı
2. Seri uyarmalı
3. Paralel uyarmalı

Paralel uyarmalı ve serbest uyarmalı doğru akım motor yapısı ve kolay kontrol edilebilirliği nedeniyle endüstriyel uygulamalarda tercih edilirler. Seri uyarmalı doğru akım motorunun, endüvi ve uyarma akımlarının eşit olması nedeniyle kullanımı daha kolaydır. Şönt ve serbest uyarmalı DC motorlarıda uyarma akımı endüvi akımını izleyecek şekilde kontrol edilmesiyle bir yerde seri uyarmalı DC motor gibi çalıştırılabilirler.

Seri doğru akım motorlarının CER sistemi açısından dezavantajları bulunur. Seri doğru akım motorları başlangıçta gerekli olan ivmelenme momentini rahatlıkla sağlayabilir fakat hızın artması ile moment hızlı bir şekilde düşer ve bu durumda kayma ve kararlılık etkisi yaratır.

İstanbul M1 metro hattında çalışmakta olan ABB LRT araçlarının tahrik sisteminde 75 kW gücünde serbest uyarmalı doğru akım motorları, İstanbul T4 tramvay hattında çalışmakta olan KTA araçlarının tahrik sisteminde 235 kW gücünde serbest uyarmalı, üreticisinin Siemens/AEG olduğu motorlar, İstanbul M2 metro hattında çalışmakta olan Alstom araçlarının tahrik sisteminde 152 kW gücünde serbest uyarmalı, üreticisinin Alstom olduğu doğru akım motorları kullanılmaktadır. Örnek olarak verilmiş olan araçların üretim tarihleri 1975 ile 1999 arasında değişmektedir. Bundan da anlaşılabacağı üzere eski şehir içi raylı sistem araçlarında serbest uyarmalı DC motor yaygın olarak kullanılmıştır.

2.3.2 Alternatif akım motorları

Alternatif akım motorları kendi içerisinde ikiye ayrılır:

1. Senkron AC Motor
2. Asenkron AC Motor

CER motoru olarak, yüksek güç ve hızlar için doğru akım motor kollektörlerinin ve fırçalarının bakım maliyetinin yüksek olması nedeni ile günümüzde yapısında fırça ve kollaktör bulunmayan, bunun yerine manyetik alan kullanan alternatif akım motorları kullanılmaktadır.

Dizel-elektrik lokomotiflerin ve DEMU sistemlerinin elektrik üreticisi olarakta senkron jeneratör kullanılmakta ve CER motoru olarak kullanılan senkron motorlu demiryolu araçları bulunmaktadır.

Günümüzde demiryolu araçları CER sistemleri için en fazla kullanılan motor asenkron motordur. Bunun nedenleri; AC motorlarının tutunma kuvvetlerinin DC motorlara göre iki katı kadar yüksek olması, AC motorların bakım maliyetinin daha az olması ve güvenilirliğin DC motorlara göre daha fazla olmasıdır.

Gelişen teknoloji ile birlikte eskiden kullanılan GTO (gate-turn-off thyristor) sürücülerin yerini IGBT (insulated-gate bipolar transistor) sürücüleri almıştır. Bu nedenle AC motor kontrolü daha kolay bir hale gelmiştir.

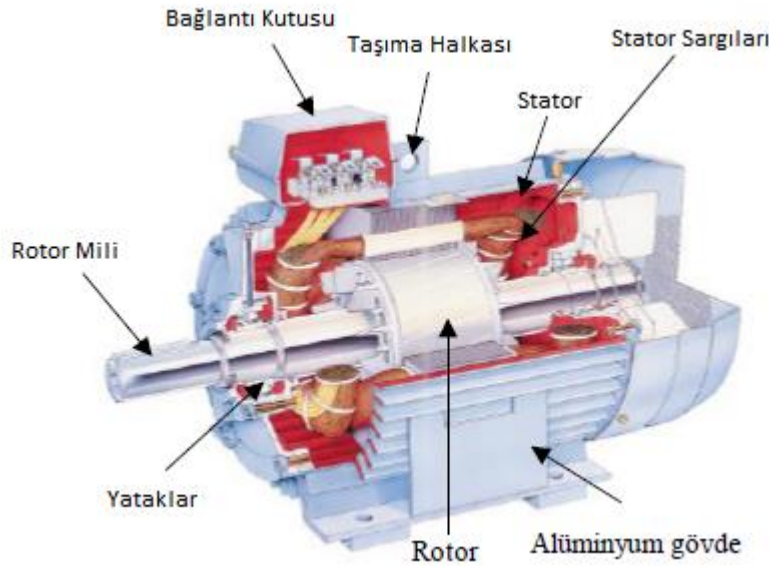
AC motorların kullanım örneklerine baktığımızda İstanbul T1 hatında kullanılmakta olan Alstom tramvay araçlarında üreticisinin Alstom olduğu 150 kW gücünde 3 faz sabit kutuplu senkron parmanent magnet motor kullanılmaktadır. Yine aynı hatta kullanılmakta olan Bombardier tramvay araçlarında üreticisinin Alstom olduğu 110

kW gücünde 4 kutuplu trifaze sincap kafesli asenkron motor kullanılmaktadır. Metro İstanbul M5 hattında kullanıma girecek olan MCCAF metro aracında üreticisinin Mitsubishi olduğu 160 kW gücünde 4 kutuplu trifaze sincap kafesli asenkron motor kullanılacaktır. Örneklerden de görüldüğü üzere 1999 yılından sonra Metro İstanbul bünyesine katılan tüm araçlar AC motorlara sahip, biri hariç hepsinde 4 kutuplu trifaze sincap kafesli asenkron motor kullanılmaktadır.

Bu tezde CER motoru olarak raylı sistem araçlarında son dönemde yoğun bir şekilde kullanılmakta olan motor çeşidi olduğu için sincap kafesli asenkron motor irdelenmiştir.

2.3.2.1 Sincap kafesli asenkron motor yapısı

Asenkron motor, stator ve rotordan oluşur. Stator sargılarından almış olduğu elektrik enerjisi ile elektro manyetik indüksiyon elde ederek rotor sargılarında elektrik akımı ve moment üretir. Sincap kafesli denmesinin nedeni rotorunda bulunan oyukların içine yerleştirilmiş olan alüminyum ve bakırdan yapılmış birbirleri ile kısa devre edilmiş çubuklar bulunmasıdır. Şekil 2.8’de motor yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.8 : Sincap kafesli motor yapısı.



3. DEMİRYOLU ARACINA ETKİYEN KUVVETLER

Demir yolu araçları için dinamik denklemler çıkarıldığında, teker-ray ilişkisi ve sürtünme kuvvetleri ön plana çıkmaktadır. Teker ray ilişkisinde kurp dönme direnci ve eğim tırmanma direnci gibi etkiler raylı sistem aracının hareket etmiş olduğu güzergah nedeniyle oluşur. Ayrıca ray üzerinin kuru, ıslak, tozlu vb. olması durumunda motorun gücünün tekerlekler üzerinden raya iletme kuvvetinde farklılıklar gözlenebilir.

Demiryolu aracının modeli, simülasyonun gerçek duruma yakın olması açısından önemlidir. Simülasyonda sadece motor modeli kullanılması, demiryolu aracının karşılaşmış olduğu sürtünme kuvvetlerinin etkisinin göz ardı edilmesi demektir ve bu nedenle simülasyonun gerçeklikten uzak bir sonuca götürecektir. Simülasyon yapılmasının amacı, gerçek durumu oluşabilecek olan problemlerin önceden belirlenerek ortadan kaldırılmasının sağlanmasıdır.

3.1 Ray Teker İlişkisi

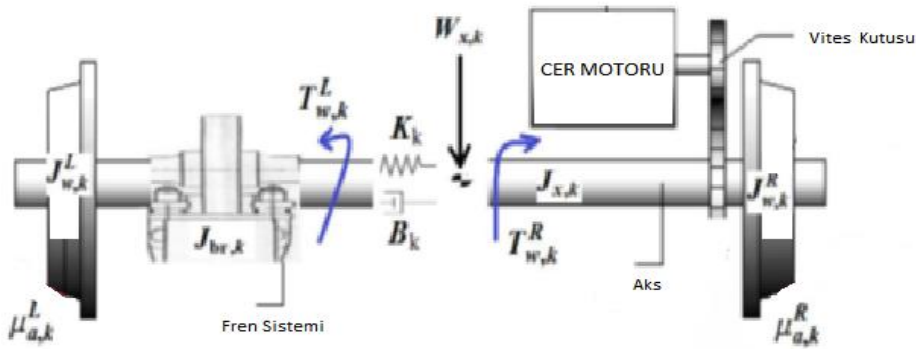
Demiryolu araçlarında, düşük sürtünmeden dolayı teker-ray arasında çekiş gücünün tam olarak aktarılamama sorunu meydana gelmektedir. Tekerleğe uygulanan maksimum kuvvet, tekerleğin kayma değerine göre belirlenmelidir. Aksi takdirde araç tekerleklerinde apleti denilen düzleşmeler gerçekleşebilmekte ve bu gibi durumlarda tekerlerde çatlama ve yolcu konforunda düşüşler meydana gelmektedir.



Şekil 3.1 : Teker-ray

Demiryolu tramvay araçlarında motorlu ve taşıyıcı olmak üzere iki çeşit bogie bulunur. Araçtan araca değişmekle birlikte genellikle taşıyıcı bogieler motorsuzdur fakat üzerlerinde mekanik fren sistemi bulunur. Motorlu bogieler ise adından da anlaşılacağı üzere 2 adet motor ve fren sistemi ekipmanlarını üzerinde barındırır.

Bir bogiede iki aks ve 4 tekerlek bulunur. Her aksa bir adet motor dişliler yardımı ile kuvvet uygular. Aracın yapısına göre değişmekle birlikte her aks üzerinde bir adet mekanik fren bulunur.



Şekil 3.2 : Motorlu aks örneği

Aracın kütlesini elde etmek için ilk olarak statik araç kütlesi bulunmalıdır. [2]

$$m_{stc} = m_{vb} + \sum_{j=1}^{m,n} (2m_{w,j} + m_{x,j} + m_{br,j}) + \sum_{i=1}^m (2m_{b,i}) + \sum_{k=1}^l (m_{m,k} + m_{g,k}) \quad (3.1)$$

m_{vb} gövde kütlesi, $m_{w,j}, m_{x,j}, m_{br,j}$ taker, aks ve mekanik fren kütleleri, $m_{m,k} + m_{g,k}$ motor ve dişli kütlesi $m_{b,i}$ bogie kütlesi.

Sağ tekerlek çizgisel hız 3.2 denklemi ile bulunur.

$$V_{w,k}^R = w_{w,k}^R + r_{w,k}^R \quad (3.2)$$

Ortalama kayma 3.3 denklemi ile bulunur.

$$\bar{\lambda} = \frac{\left(\frac{\sum_{k=1}^l (v_{w,k}^L + v_{w,k}^R)}{2l} - v \right)}{\max \left(\frac{\sum_{k=1}^l (v_{w,k}^L + v_{w,k}^R)}{2l}, v \right)} \quad (3.3)$$

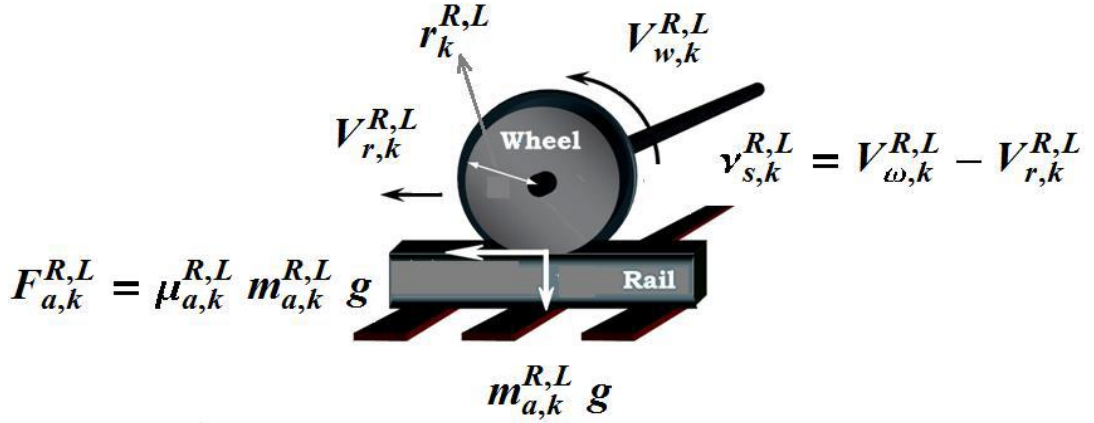
Ortalama nominal tekerlek çapı denklem 3.43'teki gibi bulunur.

$$\bar{r} = \frac{\sum_{k=1}^l (r_{w,k}^L + r_{w,k}^R)}{2l} \quad (3.4)$$

Aracın rayın üzerinde oluşturacağı etkin kütle aşağıdaki 3.5 denklemi ile bulunur.

$$m_e = m_{stc} + \frac{\eta n_k^2 l}{(1-\bar{\lambda})^2 r} J_{m,k} + \frac{n}{(1-\bar{\lambda})^2 r} (J_{w,k}^L + J_{w,k}^R) \quad (3.5)$$

η dişli verimi, n^k dişli çevrim oranı, $J_{m,k}$ sağ ve sol tekerlek eylemsizlik momentleri [2]

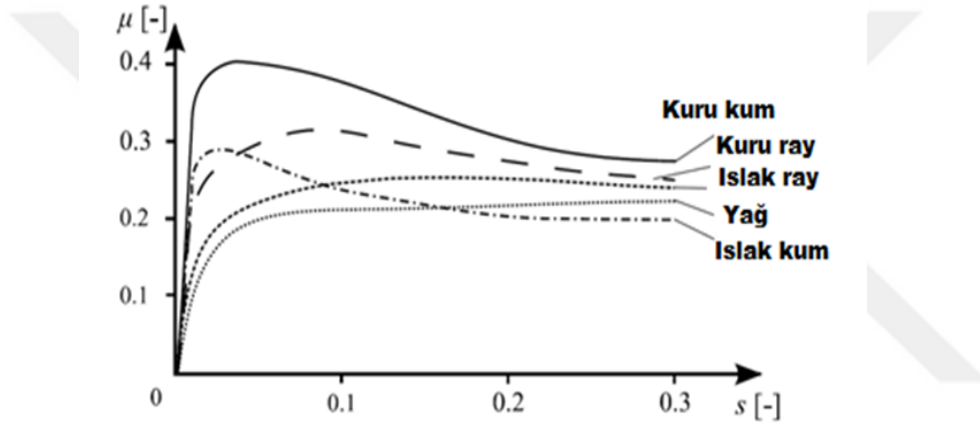


Şekil 3.3 : Raya ve tekere etki eden kuvvetler

Tutunma kuvvetinin bilimsel tanımı, temas eden iki obje arasındaki bağlanma kuvvetidir. Bu tanımın raylı sistem araçlarındaki karşılığı ise optimal kaymayı aşmayan temas direncini sağlama ve tekerleklerin ray üzerinde maksimum hareket kuvvetini uygulayabilme becerisidir.

Tutunma, motor momentinin araç hareketine dönüştürmek için gereklidir. Tutunma katsayısı belirli bir hızda maksimum değerini alır. Hız arttıkça tutunma kuvveti düşmektedir.

Raylı sistem araçlarında kayma ve kızaklamayı önlemek için bazı önlemler alınır. Bunlardan biri kayma/kızaklama kontrolüdür. Araç kontrol sistemlerinde kayma ve kızaklamanın algılanması ile farklı algoritmalar ile tekerlekler üzerine uygulanan gücü düşüren sistemler mevcuttur. Bunun yanında çok basit bir yöntem olan tekerleklerin altına kum püskürtme sistemleri bulunur. Kum püskürtülen rayda sürtünme artırılarak kayma/kızaklama önlenmeye çalışılır. Aşağıdaki grafikte farklı ray yüzeylerindeki kayma katsayısındaki değişiklikler verilmiştir.



Şekil 3.4 : Farklı ray yüzeyi için tutunma katsayısı.

Tutunma katsayısı kuru raylar için Curtius-Kniffler formülasyonu 3.6'deki gibi hesaplanır.

$$\mu_{a,\max} = \frac{7.5}{V + 44} + 0.161 \quad (3.6)$$

3.2 Araca Etkiyen Dirençler

Demiryolu araçlarına 4 farklı sürtünme kuvveti etki etmektedir. Bunlar:

- Hava direnci
- Yuvarlanma direnci
- Kurb direnci

- Eğim direnci

Bu direnç kuvvetlerinin toplamı, araca etkiyen toplam direnç kuvvetini oluşturur. 3.7 ile gösterilen denklemde direnç kuvvetleri toplamı gösterilmiştir. [4]

$$F_L = F_{air} + F_{roll} + F_c + F_g \quad (3.7)$$

F_L raylı sistem aracına etkiyen direnç kuvvetleri toplamı, F_{air} hava direnci, F_{roll} yuvarlanma direnci, F_c kurp direnci ve F_g eğim direncidir.

3.2.1 Hava direnci

Hava direnci, raylı sistem aracına etkiyen hava sürtünmesinden kaynaklanır. 3.7 denklemi ile gösterilmiştir.

$$F_{air} = \frac{1}{2} C_d A_v \rho_{air} V^2 + (q + C_0 L_t) V \quad (3.7)$$

C_d hava direnç katsayısı, A_v aracın ön kısmının kesit alanı, ρ_{air} havanın yoğunluğu, q toplam havalandırma debisi, C_0 hava dinamiğinin hızın karesi ile ifade edilmeyen katsayısı, L_t trenin uzunluğu.

3.2.2 Yuvarlanma direnci

Tekerleklerin yuvarlanmasını başlatmak için ve durdurmak için tekerlek hareket yönünün ters yönünde direnç kuvvetleri etki etmektedir.

Yuvarlanma direnci 3.8 denklemi ile gösterilir.

$$F_{roll} = m_e (C_{r1} + C_{r2} V) \quad (3.7)$$

Ayrıca yuvarlanma ve hava sürtünmesi katsayıları birleştirilerek 3.9'daki Davis formülü ile hesaplanabilir.[4]

$$F_p = F_{roll} + F_{air} = \left[A_p + \frac{B_p}{w_{x,k}} + C_p V + \frac{(D_p A_v V^2)}{w_{x,k} n} \right] w_{x,k} g n \quad (3.9)$$

$w_{x,k}$ aks yükü, A_p , B_p , C_p , D_p direnç katsayıları.

3.2.3 Kurp direnci

Kurp direnci, demiryolu aracı kurp içerisinde hareket ederken tekerlekler ve raylar arasında meydana gelen sürtünme altındaki çapraz kaymaya bağlı olarak oluşan dirençtir.

Kurp direnci, 3.10 formülü ile hesaplanır.

$$F_c = \frac{m_{dyn}g}{1000} \frac{800 - 0.4R_y}{R_y - 40} \quad (3.10)$$

R_y yolun kurp yarıçapı, m_{dyn} aracın kütlesidir.

3.2.4 Eğim direnci

Aracın bir eğimi tırmanması esnasında maruz kaldığı dirence eğim direnci denir. Eğim direnci 3.11 formülü ile hesaplanır.

$$F_g = m_e g \sin(\alpha) \approx m_e g \tan(\alpha) \approx m_e g \alpha \quad (3.11)$$

m_e etkin kütle, g yerçekimi ivmesi, α eğim açısıdır.

4. CER EĞRİSİ

CER eğrisi raylı sistem aracının raylara aktarabileceği CER kuvvetinin sınırlarını çizer. Bu sınırlar çizilirken aracın taker ray ilişkisinden gelen maksimum tutunma kuvveti, motorun üretebileceği maksimum CER kuvveti ve sabit güç eğrisi dikkate alınır [5]. CER eğrisi için aracın ilk hareketinden maksimum hızına kadar olan kuvvetler ele alınır.

4.1 Tutunma Kuvveti

Tutunma kuvveti, tekerleğin ray üzerinde tutunarak dönmesini sağlayan kuvvettir. Maksimum tutunma kuvveti raya uygulanan kuvvetten fazla olmalıdır. Aksi halde aracın harekete başladığı durumda kayma, aracın frenlemesi durumunda ise kızaklama gerçekleşir. Bu nedenle CER eğrisinde, CER'in uyguladığı kuvvet maksimum tutunma kuvvetinin daima altında olmalıdır.

Maksimum tutunma kuvveti denklem 4.1'de gösterildiği gibi olacaktır:

$$F_{a,max} = m_{stc} g \mu_{a,max} \quad (4.1)$$

m_{stc} statik araç kütlesi, g yer çemi kuvveti, $\mu_{a,max}$ ise bölüm '3.1 Ray Teker İlişkisi' bölümünde gösterilmiş olan tutunma katsayısıdır. Kuru raylar için 3.6 denklemi ile hesaplanır. 3.6 denkleminde görüldüğü gibi hız arttıkça tutunma katsayısı düşmektedir.

$\mu_{a,max}$ değerleri işletmeci şirketlerin kabulleri ile değişik alınabildiği gibi farklı demiryolu araçları için de değişiklik gösterebilmektedir. [5] Bu parametreler şirketlerin kendi içlerinde yapmış oldukları testler neticesinde kabul edilmiştir.

Çizelge 4.1 : Farklı şirketlerin kullanmış olduğu tutunma katsayısı örnekleri.

μ_0 değerleri		
SNCF (Fransa)	Elektrikli Lokomotif	0.33
DB (Almanya)	Dizel Lokomotif	0.30
DB (Almanya)	Elektrikli Lokomotif	0.33
USA	Dizel-Elektrik Lokomotif	0.45

4.2 Maksimum Cer Kuvveti

Maksimum Cer kuvveti, araç cer motorlarının üretebildiği maksimum kuvvettir. Bu kuvvet motorun maksimum güç ürettiği hıza kadar maksimumda kalır. Maksimum güç hızının aşıldığı hızlarda motorlar maksimum cer kuvvetini sağlayamaz. Maksimum cer kuvveti 4.1 denkleminde gösterilmiştir.

$$F_D = F_P + m_e a \quad (4.2)$$

F_P yuvarlanma ve hava sürtünmesi dirençleri, m_e etkin kütle, a ise aracın ivmelenmesidir.

4.2 denkleminden görüldüğü gibi maksimum cer kuvveti araca etkiyen yuvarlanma ve hava dirençlerine, araç kütlesine ve hareketlenme ivmesine bağlıdır.

4.3 Sabit Güç Hiperbolü

Güç hesabında cer kuvvetiyle hız ters orantılı olduğundan dolayı hız arttıkça cer kuvveti düşecektir. Sabit güç hiperbolü denklem 4.3'teki gibi hesaplanır.

$$P_{\Sigma m, \max} = F_D v_{P \max} \quad (4.2)$$

F_D maksimum cer kuvveti, $v_{P \max}$ motorun maksimum güçteki hızıdır.

4.4 CER Eğrisi Çizimi

Cer eğrisinde dikkat edilmesi gereken, araç cer motorlarının çalıştığı bölgenin sürekli olarak maksimum tutunma kuvvetinin altında kalmasıdır. Eğer tutunma kuvveti cer motorlarının çalıştığı bölgenin altındaysa araç cer motorları gereksiz şekilde güçlü

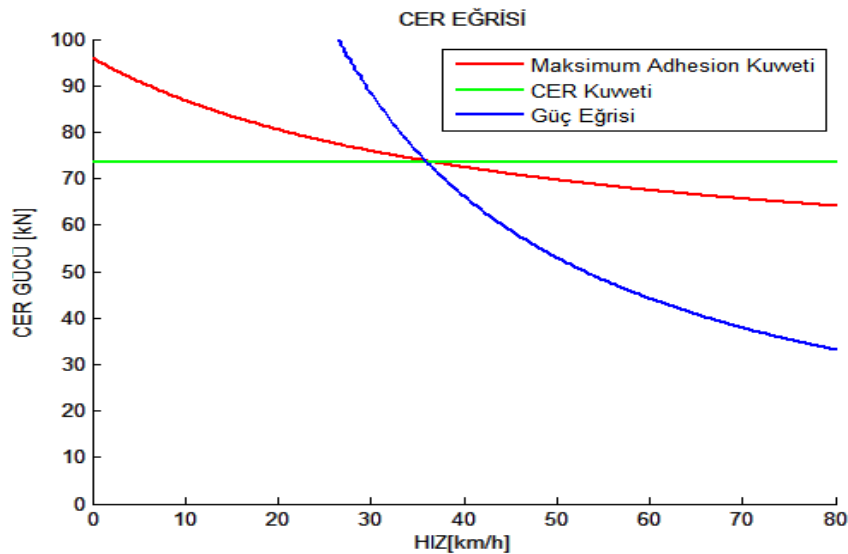
seçilmiş olur. Bu durum kullanılmayan kuvvet için fazladan harcanmış olan maliyet anlamına gelecektir. Cer motorlarının seçiminde cer eğrisine dikkat edilmelidir.

Çizelge 4.2’de araç cer eğrisi çiziminde kullanılan değerler görülmektedir. Bu değerler Metro İstanbul bünyesinde çalışmakta olan İstanbul Tramvay aracı değerleri ile örtüşmektedir. Bu nedenle gerçek test sonuçları ile hesaplamış olduğumuz cer eğrisini karşılaştırma imkanımız bulunmaktadır.

Çizelge 4.2 : Cer eğrisi çizilirken kullanılan değerler.

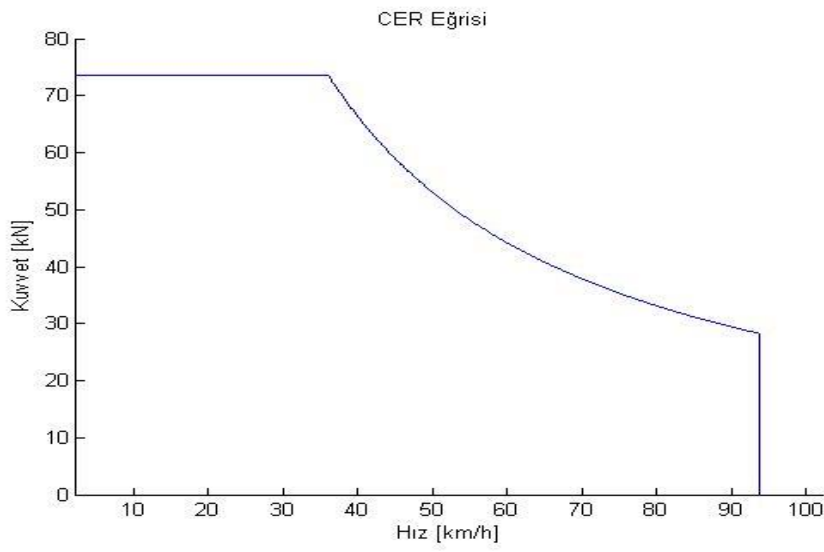
m_e	61704 kg	m_{Rm}	120 kg	A_p	0,0064
η	0,98	n_{aks}	6	B_p	129,5
n	6,92	A	9 m ²	C_p	0,000329
r	0,34 m	a	1 m/s ²	D_p	0,576
J_m	3,50 kg m ²	v_{nom}	40,8 km/h		
J_w	148,4 kg m ²	v_{max}	93,4 km/h		
m_{vb}	42500 kg	g	9,81 m/s ²		
m_{yolcu}	16500 kg	VP_{max}	10 km/h		
r_{Rm}	0,121 m	m_w	214 kg		

Şekil 4.1’de çizdirdiğimiz cer eğrisi görülmektedir. Motorların maksimum güçteki hızı 36 km/h olması nedeniyle sabit güç eğrisi ile cer kuvveti bu hızda kesişmektedir. Motorların maksimum güçteki hızına kadar cer kuvveti maksimum tutunma (adhesion) kuvvetinin altında kalması istenen bir durumdu ve tam istenildiği gibi motorların maksimum güçteki hızından sonra tutunma kuvveti cer kuvvetinin altında kaldı. Bu da demek oluyor ki seçilen motorlar bu demiryolu aracı için tam verim ile çalışabilecektir.

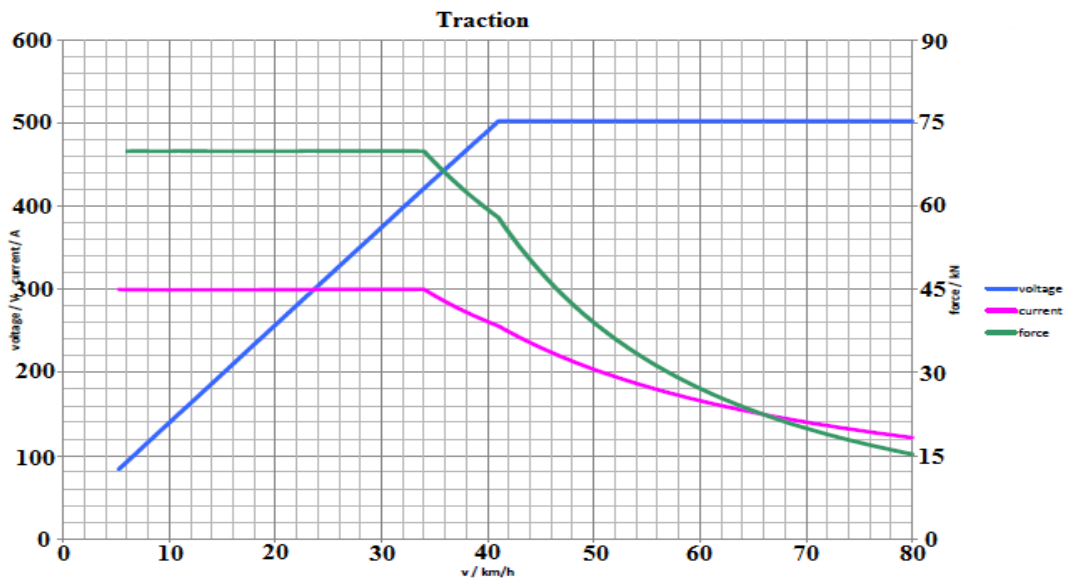


Şekil 4.1 : CER Eğrisi.

Şekil 4.2’de hesaplamalarımız sonucunda ortaya çıkan cer eğrisi ile İstanbul Tramvay Aracı’nın testleri sonucunda ortaya çıkan cer eğrisi şekil 4.3’te yeşil renkli çizim ile gösterilmiştir. Bu iki grafik birbirleri ile karşılaştırıldığında testler sonucu oluşan grafik ile model üzerinden çıkarılan grafikte bir miktar farklılık gözlenmektedir. Bunun nedeni motorun gerçek hayattaki davranışlarında, motor özellikleri nedeni ile akım ve gerilim değerlerinde sınırlandırmalarının gözlenmesidir. Akı ayarlamaların için gerekli olan yüksek gerilim değerlerine ulaşamaması grafikte bir miktar farklılığa neden olmaktadır. Elde ettiğimiz grafikte akım ve gerilim sınırlamaları gözardı edilmiştir. Bu farklılıklar kullanılan motor ile değişebilmektedir.



Şekil 4.2 : Hesaplanan CER Eğrisi.



Şekil 4.3 : İTA CER Eğrisi.

Şekil 4.2’de gösterilmiş olan cer eğrisi çiziminde aracın ulaşabileceği maksimum hız motorun üretiminden kaynaklanan mekanik nedenlerle belirlenmektedir. Bu nedenle cer eğrisinin kuvvetin 0’a düştüğü nokta 93,4 km/h ile maksimum motor hızıdır.

Simülasyonda, İstanbul Tramvay Aracında kullanılan 120 kW gücünde thrifaze sincap kafesli asenkron motor tercih edilmiştir.





5. ASENKRON MOTOR KONTROL YÖNTEMLERİ

Asenkron motorlar küçük güçlerden çok büyük güçlere kadar geniş aralıktaki güçler için değişken hızlı uygulamalarda sıklıkla kullanılır.

Asenkron motorun kullanıldığı uygulamalara örnek vermek istersek; pompa ve fanlarda, kağıt ve tekstil makinalarında, elektrikli ve hibrit araçlarda, robotik sistemlerde, ev uygulamalarında, ısıtma ve havalandırma sistemlerinde, rüzgar türbünlerinde jeneratör olarak ve simülasyonda kullanıldığı gibi rayli sistem araçlarında sıklıkla kullanılmaktadır.

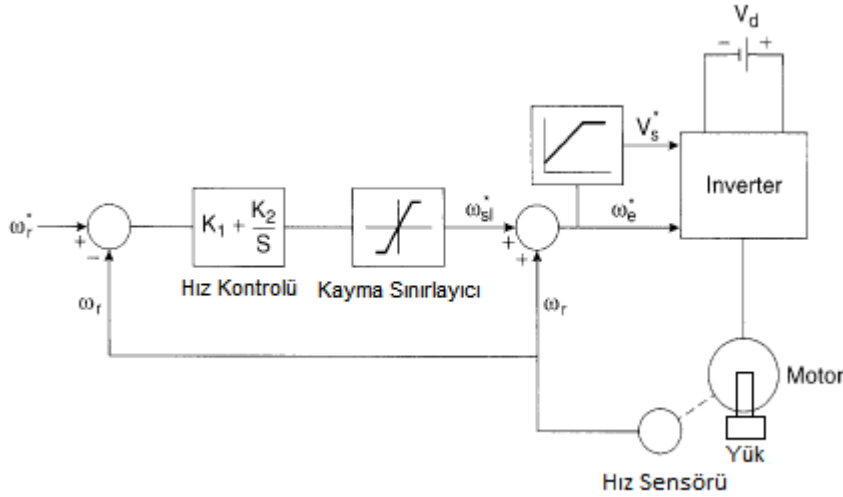
DC motor kontrolüne göre AC motor kontrolü çok daha kompleks bir yapıya sahiptir. Eğer AC motordan yüksek performans isteniyorsa bu komplekslik daha da artmaktadır. Bu zorluğun temel nedenlerini sıralayacak olursak; AC motor dinamik modelinin kompleksliği, değişken frekans ihtiyacı, makina parametre değişimleri, geri besleme sinyallerinde oluşan harmoniklerdir.

Bir çok asenkron motor kontrol tekniği bulunmaktadır. Bunlar: skalar kontrol, vektör kontrol veya alan yönlendirmeli kontrol, moment ve akı kontrolü, uyarlamalı kontrol vb. [6].

5.1 Skalar Kontrol

Asenkron motorun skalar kontrolü veya V/F, frekans ve stator geriliminin genliğini ayarlayarak motor hızının kontrolünü sağlar. Stator geriliminin frekansla olan oranı sabit tutulmalıdır. [7]

Şekil 5.1’de ω_r^* sembolü ile gösterilen referans açısal hız, ω_r ile gösterilen açısal hızın geri beslemesi, ω_{sl}^* kontrol edilmiş ve sınırlandırılmış kayma açısal hızı, V_s^* maksimum değeri sınırlandırılmış inverter referans gerilimi, ω_e^* frekans referansı, V_d inverter besleme gerilimidir [6].



Şekil 5.1 : Skalar kontrol yöntemi ile kapalı çevrim asenkron motor hız kontrolü blok diagramı.

Skalar kontrol sürücü parametreleri bağımsız, kolay uygulanabilen ve düşük maliyetlidir fakat asenkron motor kontrolü çeşitleri içerisinde düşük performanslı ve düşük verimlidirler [7]. Bu nedenle hassas hız kontrolü gerektirmeyen havalandırma sistemleri için kullanılan fanlarda kullanılmaktadır.

Asenkron motorun maksimum momenti yüksek hızlarda sabit kalacak şekilde motorun hızı geniş bir aralıkta kontrol edilebilmektedir. Ayrıca yüksek hızlar için makinanın bağlı olduğu kaynaktan çektiği akım değişmeyen bir yük için tüm hız aralığı boyunca sabit kalacaktır. Fakat düşük hızlar için scalar motor kontrol yönteminin uygulanmasında sorunlar görülmektedir.

Nominal hızın üzerine çıkılmak istendiğinde gerilim frekans oranının sabit tutulması için gerilimin de artırılması gerekmektedir. Fakat bu durumda motor sargı izolasyonlarında yaşanabilecek sorunlar nedeniyle gerilimin nominal gerilimin çok üstüne çıkarılması istenmez. Bu durumda gerilimin frekans oranının bozulması motorun üreteceği momentin düşmesine neden olur [8].

5.2 Vektör ya da Alan Yönlendirmeli Kontrol

Skalar kontrolün uygulanması kolaydır fakat moment ve akının, gerilim ve akı değişimlerine bağlı olması nedeniyle yavaş tepki verir ve sistemin yüksek mertebeden olması nedeniyle kararsızlığa gitmeye çok yatkındır [6]. Bu gibi nedenlerden dolayı AC motorun kolay kontrol edilebilen DC motor gibi kontrol edilebilmesi istenmektedir. DC motorlarda stator manyetik alanı ve motorun

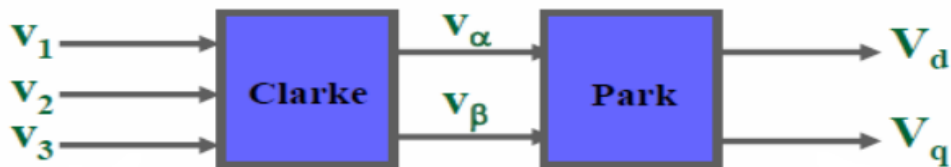
elektromanyetik momenti ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir [9]. Asenkron motor vektör kontrolünün amacı akıyı ve momenti oluşturan akım bileşenlerinin birbirinden bağımsız kontrol edilmesidir. Akı sabit tutulduğunda, moment kendini oluşturan akım bileşeni ile doğrusal olarak kontrol edilmektedir. Matematiksel dönüşümler yapılarak vektör kontrol gerçekleştirilebilmektedir.

Burada yapılan dönüşümlere Clarke-Park dönüşümü denir. Clark dönüşümü, asenkron motorun statorunda üç faza ait abc eksenlerini referans eksen sisteminde 2 boyuta taşır. Bu iki boyuttaki büyüklüklerle rotor akısının genliği ve fazı hesaplanır. Rotor akısının fazı a-b-c fazından dönüşüm açısıyla d-q eksen takımına taşınır bu dönüşüme park dönüşümü adı verilir. Dönüşüm açısının ölçülmesi ancak makinada yapılan özel bir takım uygulamalar, statora dışarıdan müdahale edilmesi vb. uygulamalar ile gerçekleştirilebilir. Vektör kontrol yöntemleride kendi içerisinde farklı iki bölüme ayrılır. Bu iki farklı başlıkta dönüşüm açısının bulunması farklılık göstermektedir. Bu yöntemlerden ilkinde statora yerleştirilen sensörler ile hava aralığı akısı ölçülür ve ya statorde birbirine dik yerleştirilen (α ve β için) özel sargılardan endüklenen gerilimden hareketle hava aralığı akıları bulunur. Hava aralığı akısından rotor akıları bulunarak α ve β arasındaki açı dönüşüm açısı olarak kullanılır. Diğer yöntemde ise motorun senkron açısal hızının integralinin alınması ile dönüşüm açısı bulunmaktadır [10].

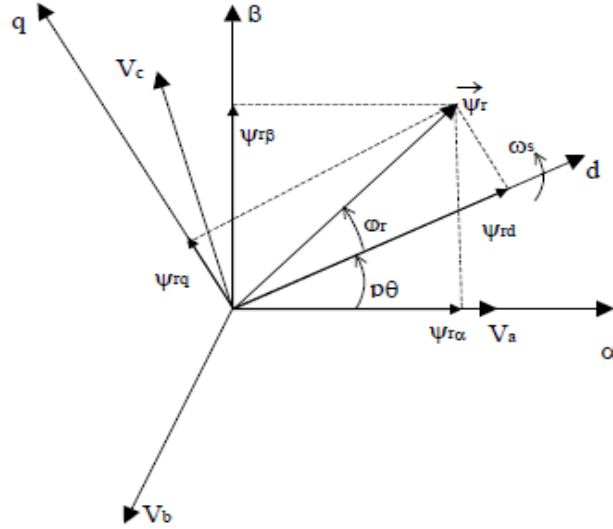
Sonuç olarak Clarke-Park dönüşümü ile üç fazlı sistem iki faza indirilerek asenkron motor kontrolü, doğru akım motor kontrolüne benzetilmeye çalışılır.

Motor gerilim referansının uygulanması için motor geri beslemesinden alınan sinyaller üzerinden kontroller gerçekleştirilir ve ters Clarke-Park dönüşümleri yapılarak konvertör üzerinden PWM ile motor referansı verilir.

Şekil 5.2’de V_1 , V_2 ve V_3 3 fazlı motor girişlerine uygulanan gerilim, V_α ve V_β Clark dönüşümü sonucunda bulunan iki faza dönüştürülmüş stator gerilimleri, V_d ve V_q ise Park dönüşümü sonucunda bulunan senkron hızda dönen stator gerilimleridir.



Şekil 5.2 : Clarke-Park dönüşümü.



Şekil 5.3 : Clarke-Park dönüşümü gösterimi.

Yapılan dönüşümler ile alternatif akım motor modelimiz doğru akım motor modeline dönüştürülmüştür. Böylece ψ_r rotor akısını oluşturan akım bileşeni i_{sd} doğru akım makinesindeki uyarma akımı i_f 'ye, i_{sq} ise endüvi akımı i_a ya benzemektedir. Rotor döner alanı üzerinde tanımlı bu büyüklükler artık doğru akım büyüklükleridir.

Yukarıda da belirtildiği gibi vektör kontrol yöntemi iki başlıkta incelenebilir. Biri doğrudan vektör kontrolüken diğeri dolaylı vektör kontrolüdür. Bu kontrol yöntemlerinin ortak özelliği rotor akısının genlik ve fazına ihtiyaç duyulmasıdır. Doğrudan vektör kontrol ve dolaylı vektör kontrol yöntemlerini birbirinden ayıran ise akının genlik ve fazının elde edilme aşamalarıdır.

Doğrudan vektör kontrol yönteminde, rotor akısı hava aralığı akı bileşenlerinin makinanın statoruna yerleştirilmiş olan iki akı sensörü ile doğrudan ölçülmesi ile elde edilmektedir. Dolaylı vektör kontrol yönteminde ise, rotor akısı referans değerine karşılık düşen d eksenli akım değeri elde edilir ve motor açısal hızı ile dönüşüm açısı elde edilmektedir [10].

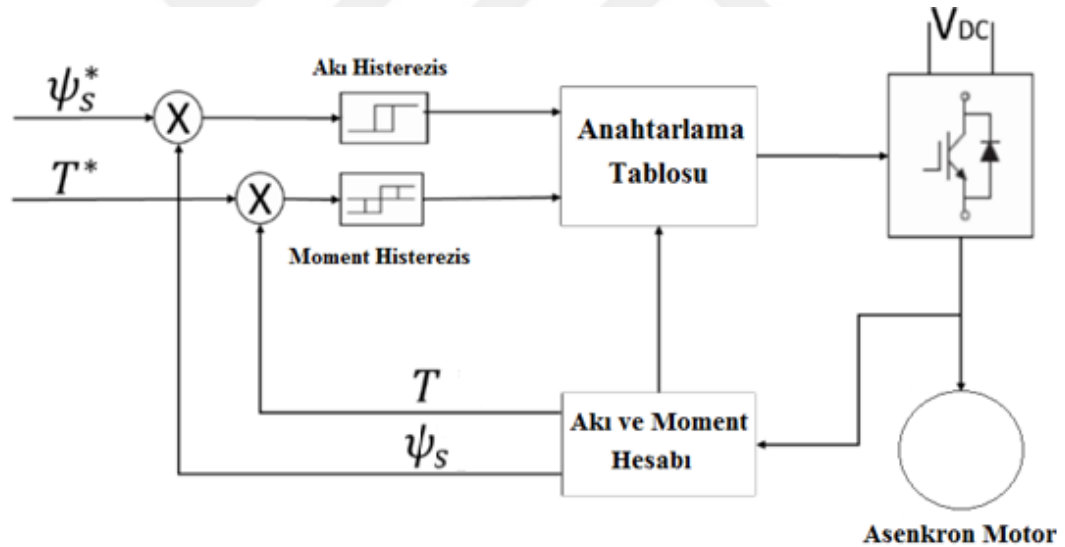
5.3 Doğrudan Moment Kontrol Yöntemi

Doğrudan moment kontrol (DTC) yöntemi Takahashi isimli Japon araştırmacı ve Noguchi isimli Alman araştırmacı tarafından asenkron motor kontrol tekniği olarak ve özellikle alan yönlendirmeli kontrol ve ya vektör kontrole alternatif olarak yaklaşık 30 yıl önce ortaya çıkartılmıştır. Doğrudan moment kontrol yöntemi ve alan

yönlendirmeli kontrol yöntemi, çalışma prensibi olarak farklıdır fakat iki yöntemde de yapılmak istenen akı ve moment kontrol etmektir [11,12].

Doğrudan moment kontrolü, referans moment ve akı değerleri ile motor geri beslemesi üzerinden tahmin edilen moment ve akı değerleri arasındaki farkın invertördeki anahtarlama durumları ile belli bir band limiti arasında tutulması ile gerçekleştirilir [11].

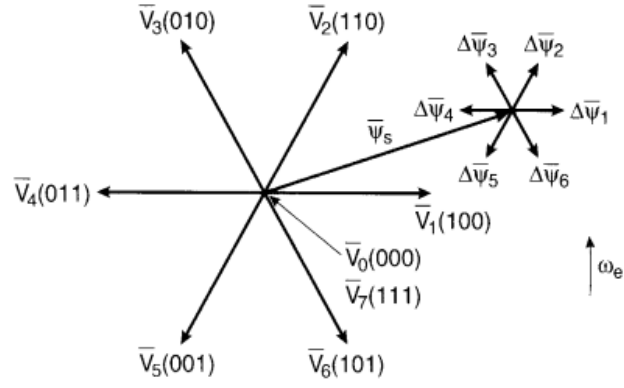
Literatürde doğrudan moment kontrol yöntemine yoğun bir şekilde önem verilmektedir [12,13]. Bunun nedeni spesifik makina parametrelerinin minimum seviyeye indirilmesidir [14,15]. Ayrıca momentin doğrudan kontrol edilmesi nedeniyle vektör kontrol yöntemine göre referans değişimlerine daha hızlı cevap verebilmesi, doğrudan moment kontrol yönteminin avantajlarından biridir. Akı ve moment kontrolü için histerisiz band kullanılır. Stator akısı histerisiz bandın dışına çıktığında inverter anahtarlama onayına göre ayarlanır ve istenilen akı değerine getirilir.



Şekil 5.4 : Genel DTC blok diagram gösterimi.

Şekil 5.4'te ψ_s^* stator akı referansı, T^* moment referansı, ψ_s motor statorunda hesaplanan akı değeri, T hesaplanan motor moment, V_{DC} doğru akım inverter girişi olarak gösterilmektedir.

Şekil 5.4'ten anlaşılacağı üzere referans akı ve moment değerleri, hesaplanan akı ve moment değerleri ile karşılaştırılır. Karşılaştırma sonucunda görülen hata durumlarına göre daha önceden belirlenmiş olan vektörler anahtarlama listesi



Şekil 5.6 : Inverter gerilim vektörleri ve bu gerileme karşılık düşen akı vektörleri

Makina, gerilim ve akım değerleri üzerinden sistem için gerekli olan moment ve akı geribeslemesi ile birlikte akının (ψ_s) uzandığı vektör bölge numarası $S(k)$ hesaplanır. Şekil 5.5’de görüldüğü gibi $S(k)$ 60° aralıklarla 6 bölgeden oluşur. Şekil 5.4’te gösterilen anahtarlama tablosu bloğuna, anahtarlama bölgelerinin tablo üzerinden seçilmesi için moment histerisiz girişi ψ_{hata} , akı histerisiz girişi T_{hata} ve akı bölge numarası $S(k)$ uygulanır [6].

Çizelge 5.1 : Inverter gerilim vektörleri anahtarlama tablosu.

ψ_{hata}	T_{hata}	$S(1)$	$S(2)$	$S(3)$	$S(4)$	$S(5)$	$S(6)$
1	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	0	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7
	-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
-1	1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
	-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

Akı V_1 , V_2 ve V_6 vektörleri uygulandığında artarken, V_3 , V_4 ve V_5 vektörleri ile azalır. Moment V_2 , V_3 ve V_4 vektörleri ile artarken, V_1 , V_5 ve V_6 vektörleri ile azalır.

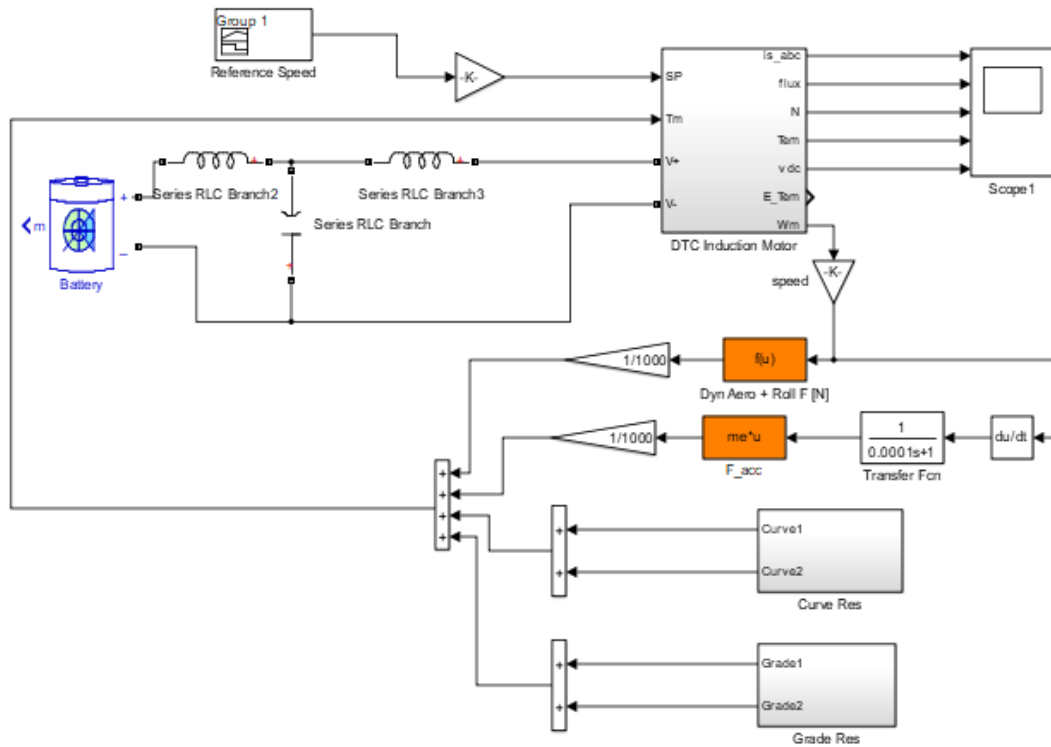
V_0 ve V_7 vektörleri uygulandığında motor terminalleri kısa devre yapılır ve akı ve moment değişmez.



6. DOĞRUDAN MOMENT KONTROL YÖNTEMİ İLE RAYLI SİSTEM ARACI CER MOTORU KONTROL SİMÜLASYONU

Doğrudan moment kontrol yöntemi ile asenkron motor simülasyonu yapılırken matlab programı içerisinde Simulink bölümü tercih edilmiştir. Bunun temel amacı yaygın olarak kullanılan Simulink programının herkes tarafından bilinmesi ve yapılacak olan simülasyonda hazır blokların kullanılması ile karışık modellemelerden biraz olsun kaçınmaktır.

Bu simülasyonda Matlab/Simulink'in AC4 doğrudan moment kontrol asenkron motor sürücüsü bloğundan yararlanılmıştır.



Şekil 6.1 : Simülasyon modeli.

6.1 Simülasyon Bölümleri

6.1.1 Asenkron motor

Motor modeli olarak Simulink programı içerisinde bulunan mekanik girişi moment olan sincap kafesli asenkron motor modeli kullanılmıştır. Motor gücü, İstanbul tramvayında kullanılmakta olan motorlarda olduğu gibi 120 kW, yaklaşık 160 HP seçilmiştir. Motor giriş gerilimi 520 V alternatif akım, ağırlığı 395 kg ve kutup sayısı iki kutup çiftinden toplam 4 adettir.

6.1.2 DC bara ve rejeneratif frenleme

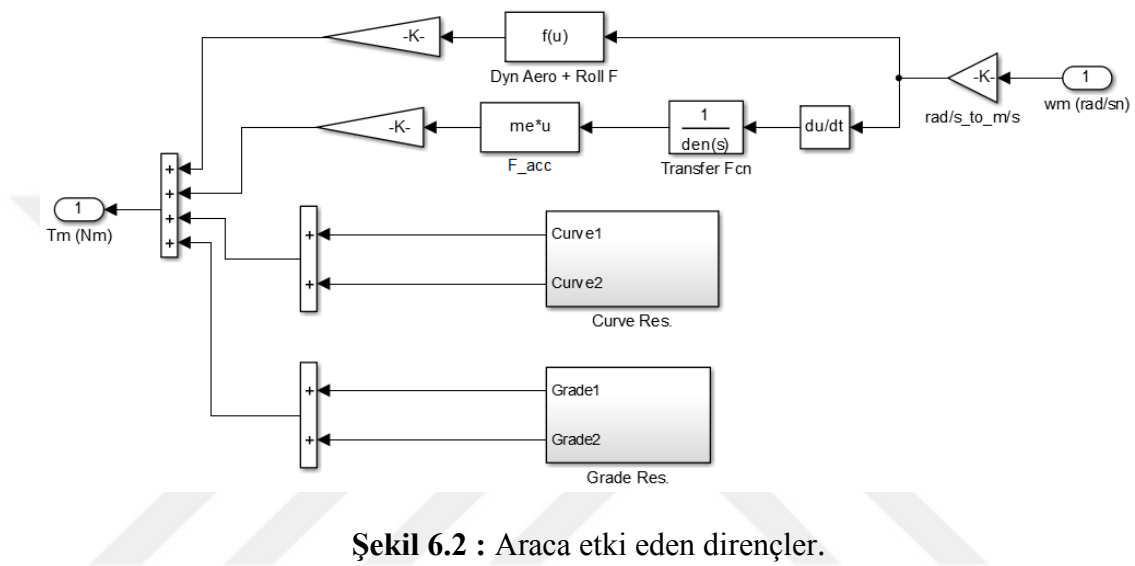
Şehir içi raylı sistemlerde nominal 750 V doğru akım besleme gerilimi kullanılır. Bu gerilim aynı hat üzerinde bulunan araçların frenleme sonucunda asenkron motorların jeneratör gibi davranarak hatta enerji basması ile 900 V'un üzerine kadar çıkabilirken, ivmelenme performansı nedeniyle yüksek gerilimler 650 V civarına düşebilmektedir. Frenleme performansı ile meydana gelen yüksek gerilimlerin doğru akım katener hattı üzerinden diğer araçlara zarar vermesini önlemek için her araçta fren dirençleri bulunmaktadır. 900 V üzerindeki gerilim değerlerinde üretilen enerjinin bir kısmı bu fren dirençlerine gönderilerek ısı enerjisine dönüştürülmesi sağlanır.

Doğru akım katener sistem modeli başlı başına bir konu olması nedeni ile bunun yerine batarya kullanılmıştır. Batarya seçiminde, rejeneratif frenleme sonucunda meydana gelen gerilim yükselmesini gözlemleyebiliyor olmak için şarj edilebilir bataryaya ihtiyaç duyulmaktaydı. Bu nedenle simülasyonumuzda kurşun asit batarya kullanılmıştır.

DC bara kapasitansı küçük gerilimlerde yaşanan gerilim değişikliğini önlemek için büyük seçilir. Simülasyon düşük hat gerilimi ile başlatılması durumunda doğrultucu kapasitansı doldurulmak için çok yüksek değerlerde akım çekilir. Bu yüksek akım değeri pratikte izolasyonların yanması gibi çok büyük zararlara neden olabilir. Bu nedenlerden dolayı doğru akım bara gerilimi için kullandığımız batarya gerilim çıkışına bobbin ve kondansatör bağlanmıştır. Ayrıca başlangıç DC bara gerilimi yüksek akımdan korunmak için sınırlandırılmalıdır [17].

6.1.3 Araç üzerine etki eden dirençlerin simülasyonda uygulanması

Araç üzerine etki eden direnç kuvvetleri, aracın hızlanmasına ters yönde etki etmesi nedeni ile motor yükü olarak düşünülebilir. Bölüm 3.2. Araca Etkiyen Kuvvetlerde anlatıldığı gibi araç hareketine karşı bazı direnç kuvvetleri etli etmektedir. Bunlar hava sürtünmesi, yuvarlanma, ivmelenme, kurp dönme ve eğim tırmanmadır. Bu dirençlerin toplamı motor hareketine ters yönde bir kuvvet uygular ve bu kuvvet N cinsindendir.



Şekil 6.2 : Araca etki eden dirençler.

6.1.3.1 Hava sürtünmesi, yuvarlanma ve ivmelenme dirençleri

Hava sürtünme ve yuvarlanma direnci 6.1 denklemi ile gösterilmiştir.

$$F_p = \frac{k_0 + k_1 V + k_2 V^2}{1000} \quad (6.1)$$

Denklem 6.1’de gösterilen k_0 , k_1 ve k_2 parametreleri Davis formülüne göre sırasıyla 1232,24, 23,388 ve 5,184 olarak alınmıştır. V araç hızıdır ve m/s birimindedir. Araç hızı rotor dönüş hızının açısal hızının rad/s’den m/s’ye dönüştürülmesi ile bulunur.

İvmelenme direnci 6.2 numaralı denklem ile gösterilmektedir.

$$F_{acc} = \frac{m_e a}{1000} \quad (6.2)$$

F_{acc} ivmelenme direnci, a araç ivmesidir. Aracın ivmesi hızın türevi alınarak bulunur. m_e sembolü ise etkin kütledir.

6.1.3.2 Kurp ve eğim dirençleri

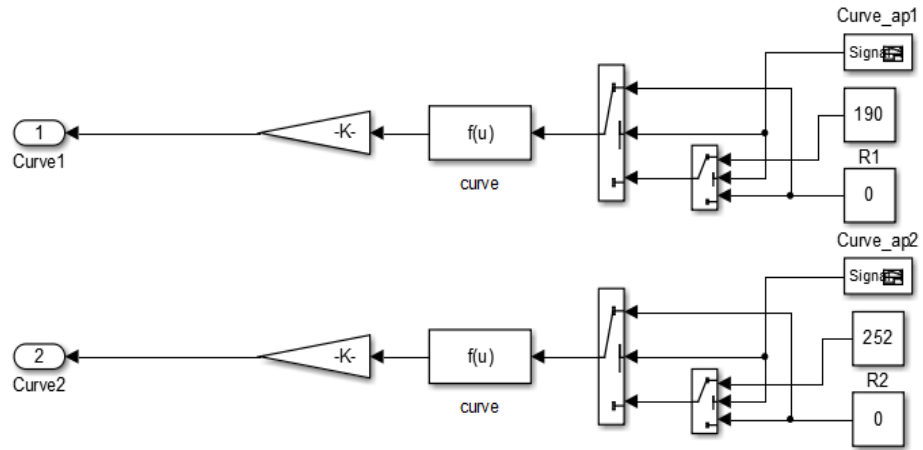
Kurp ve eğim direnç formülleri 3.10 ve 3.11 numaralı denklemlerde gösterilmiştir. Kullanılan eğim açısı ve kurp çapı hali hazırda Metro İstanbul bünyesindeki araçların çalıştığı M1 Yenikapı-Havaalanı metrosunda bulunan gerçek kurp ve eğim değerleridir.

Bu simülasyonda Yenikapı istasyonundan çıkan bir aracın Akasaray istasyonunu durmadan geçerek Emniyet-Fatih istasyonunda durması simüle edilmiştir.

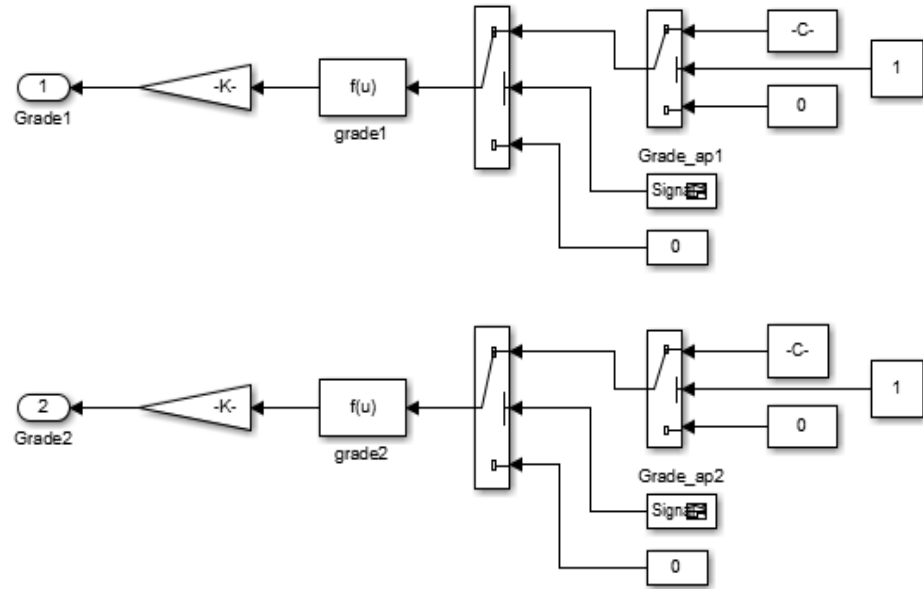
Araç Yenikapı istasyonundan hareket ettikten 46 m sonra 190 m çapında bir kurpa girmiş ve bu kurp 27 metre sonra bitmiştir. Harekete başladıktan 438 m sonra ise eğimi %5.7 olan yokuş tırmanılmaya başlanmış ve yokuş başlangıcından 10 metre sonra çapı 252 olan kurba girilir. Kurp 123 metre devam ettikten sonra düzleşir ve eğimde kurp bitiminden 43 metre sonra sonlanır, Aksaray istasyonunda düzlüğe çıkılır. Aksaray istasyonunda durmadan devam edilip Aksaray istasyonu geçildikten 186 metre sonra eğimi %1.1 tepe inilmeye başlanır. Bu eğim 153 metre boyunca inilir. Aracın Yenikapı istasyonundan ayrılışından 1600 metre sonra Emniyet-Fatih metro istasyonuna varılır.



Şekil 6.3 : M1 metro hattı Yenikapı-Fatih bölümü.



Şekil 6.4 : Karp direnci.

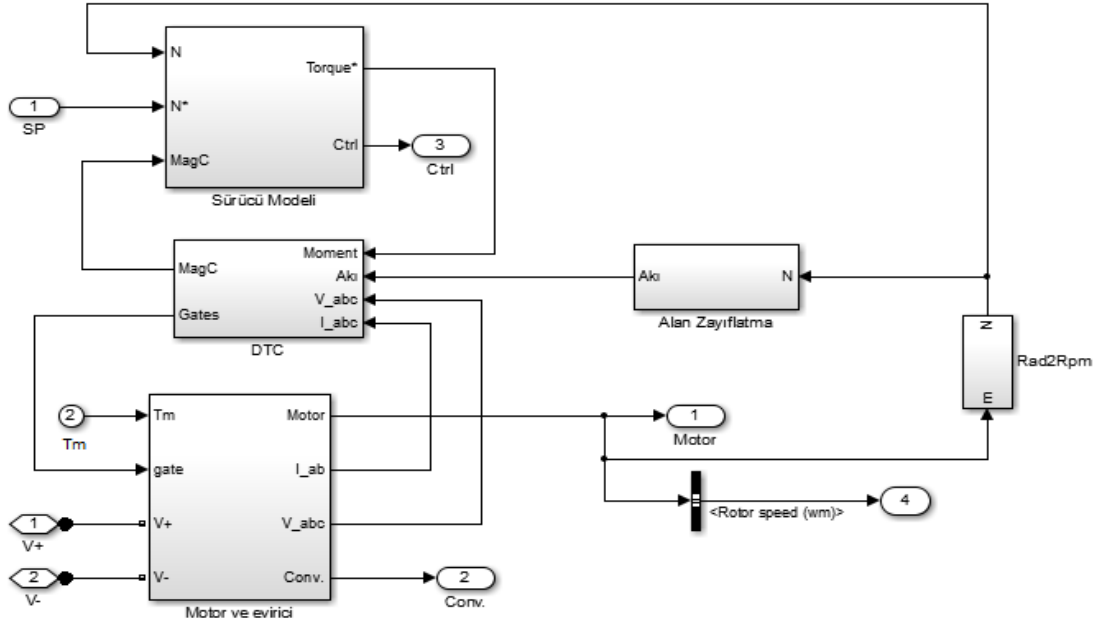


Şekil 6.5 : Eğim direnci.

6.1.4 Kontrol yapısı

Simülasyon kontrol yapısındaki asıl amaç motor geri beslemesinden alınan akı ve moment değerlerini ile referans akı ve moment değerleri arasındaki farkın uygulanan referans değer süresi boyunca kontrol edilerek minimum indirilmesidir.

Kontrol yapısı girişleri hız referansı, motor hızı, motor gerilimi ve akımıdır. Hız referansından akı ve moment referansları oluşturulur. Kontrol yapısı çıkışları ise motor invertöre uygulanan anahtarlama frekanslarıdır.



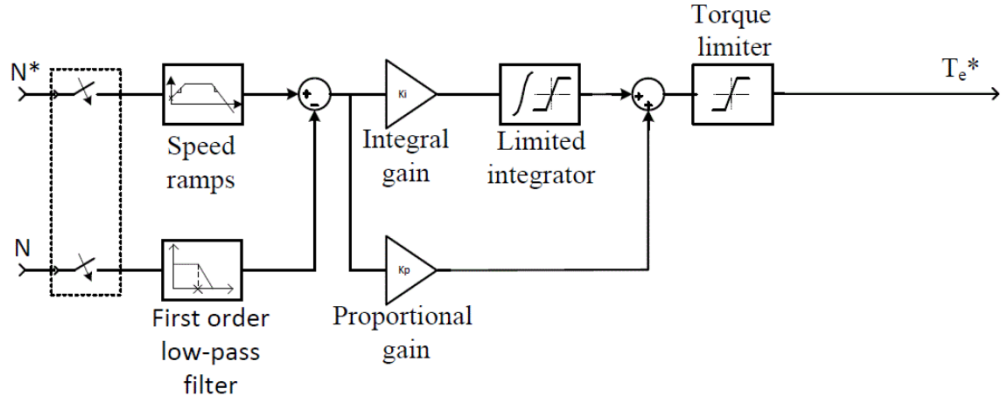
Şekil 6.6 : Kontrol yapısı.

Sürücü modeli bölümü girişleri motor geri beslemesinden gelen birimi rad/s olan hız, birimi rad/s olan referans olan hız ve manyetizasyon var yada yok bilgisinin geldiği girişlerdir.

Sürücü modeli bölümüne iki adet giriş gelir. Bunlar hız referansı ve motor hız sensöründen alınan hız bilgisidir. Bu iki değer gerekli filtrelemeler sonucunda referans hızdan motor hızı çıkartılarak aradaki hata bulunur. Bu hız farkına PI kontrol uygulanır ve doğrudan kontrol bloğu için moment referansına dönüştürülür.

Sürücü modelinde ani yavaşlama saniyede -900 rpm, ani hızlanma ise saniyede 900 rpm ile sınırlandırılmıştır. Ayrıca motora uygulanan moment alt sınır olarak -1200 Nm, üst sınır olarak 1200 Nm ile sınırlandırılmıştır. Bu sınırlandırmalardaki amaç simülasyonun gerçekçiliğini artırmaktır. Kullanılan PI katsayıları sırasıyla 90 ve 100 olarak deneysel yöntem ile belirlendi. Aşım ve yerleşme zamanı PI katsayıları belirlenirken gözlemlendi ve optimal değer seçildi.

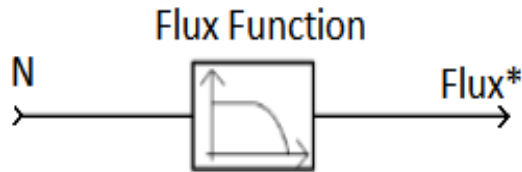
Makinist tramvay aracını sürücü paneli üzerinde bulunan ivme kolu ile sürer. Bu ivme kolu araç hareketi için ivme referansı üreterek motora gönderir. Sürücüsüz araçlarda ise sinyalizasyon sisteminin belirlemiş olduğu hız referansı araca gönderilir ve araç sürekli bu referansı takip eder. Smülasyonda yapılmış olan, sürücüsüz araçlarda kullanılan hız referansının takip edildiği sisteme benzemektedir.



Şekil 6.7 : Sürücü modeli.

Asenkron motorlarda yüksek hızlara çıkılmak için iki seçenek vardır. Bunlardan birincisi frekansı arttırmaktır fakat frekansın arttırılması ile motorda aşırı ısınma ve zaman içinde bobinlerin işlevini yitirmesi gibi istenmeyen olaylar gerçekleşebilir. Bu nedenle motorun yüksek hızlara çıkması için alan zayıflatma yöntemi kullanılmaktadır. Alan zayıflatma yönteminde akı azaltılarak hız arttırılırken moment azaltılır.

Nominal hızın altında ve nominal hız değerindeki tüm hızlar için nominal akı referans değeri uygulanırken nominal hızın üstündeki akı referansının uygulanması için hız ile orantılı olarak akı azaltılır.



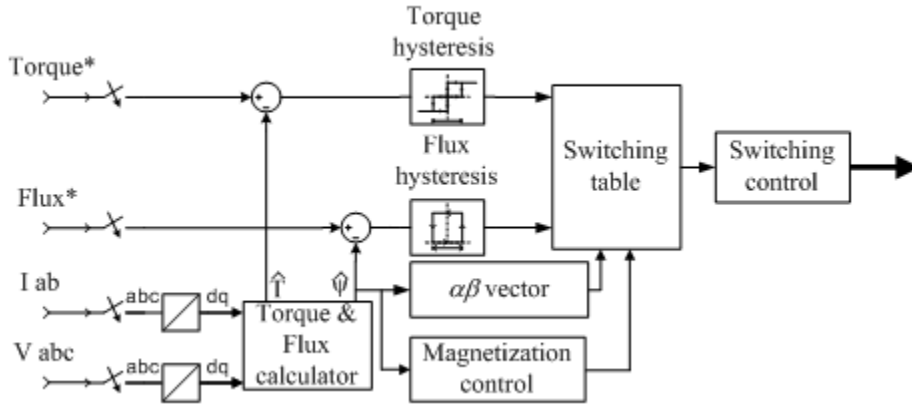
Şekil 6.8 : Alan zayıflatma modeli.

Doğrudan kontrol bloğu girişleri akı referansı, moment referansı, motorda ölçülen akım ve gerilim değerleridir. Motordan gelen akım ve gerilim değerleri Clarke-Park dönüşümleri yapılarak ayrı ayrı d-q eksenlerine dönüştürülür. Bu dönüşümler sonucunda motor moment değeri, akı açısı ve akı genliği hesaplanır.

Referans akı değerinden kestirim yolu ile bulunan akı değeri moment değerlerinden kestirim yolu ile hesaplanan moment değeri çıkarılarak akı ve moment için hatalar ayrı ayrı hesaplanır. 5.3 doğrudan moment kontrol bölümünde anlatıldığı gibi histerisiz bandı kullanılır. Akı histerisizi iki seviyeli karşılaştırma yaparken moment kontrol çevrimi üç seviyeli karşılaştırma yapar. Akı histerisizi akı hatasını kendi

bandı içinde tutmaya çalışırken, moment histerisizi moment hatasını kendi bandı içerisinde tutmaya çalışır. Moment band genişliği 10 Nm olarak belirlenmişken akı band genişliği ise 0.02 Wb olarak belirlenmiştir. Histerisiz bant genişliği nominal motor momentinin %2'si gibi küçük bir değerdedir. Anahtarlama için akının uzandığı vektör bulunmalıdır. Bu vektör bölgesi 6'ya bölünmüştür ve akı açısından bulunur.

Motorun ilk manyetizasyonu için belirli bir anahtarlama kullanılarak akı ve momentin histerisiz bandlarına yerleştirilmesi sağlanır. Manyetizasyon bu kontrolü bu aşamada devredeyken daha sonrasında devreden çıkar. Moment histerisizi, akı histerisizi ve akı açısından bulunan sektör değeri ile anahtarlama tablosu üzerinden karşılık gelen anahtarlama bilgisi invertere gönderilerek anahtarlama işlemi yaptırılır.



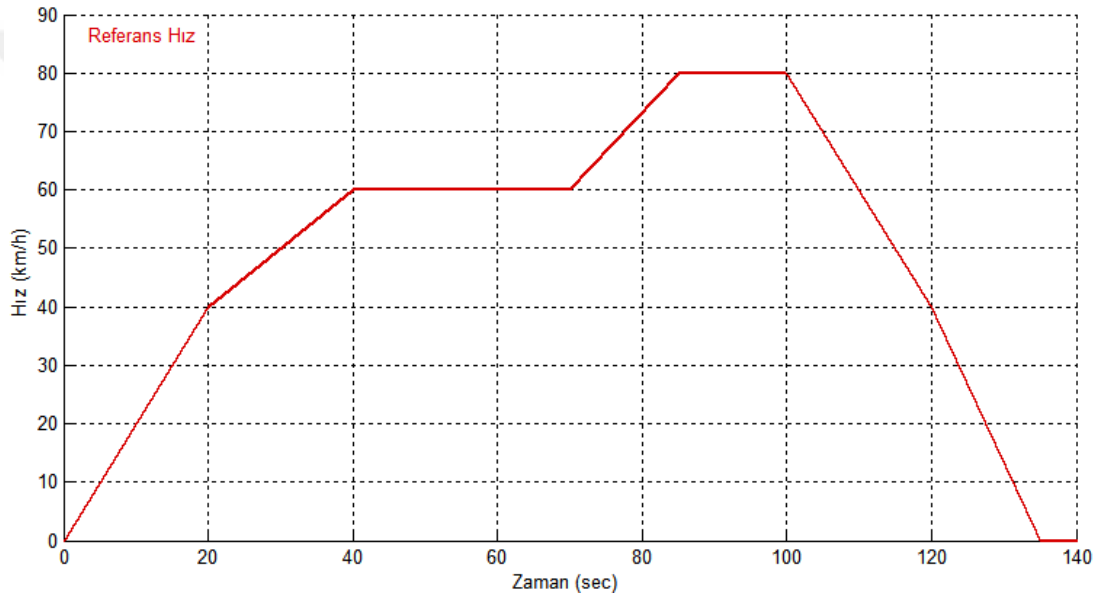
Şekil 6.9 : Doğrudan moment kontrolü.

6.1.5 Hız Referansı

Tramvay araçlarında referans girişi sürücü panelinde bulunan ivme kolu vasıtasıyla, enkoder üzerinden analog ya da enkoderin kendi içinde bulunan dijital dönüştürücü tarafından dijitalle çevrilerek tren kontrol ünitelerine gönderilmektedir. Tren kontrol ünitesi TCMS olarak adlandırılır ve bu ünite tren kontrolü ve izlenmesinde görevlidir. İvme kolundan gelen ivme isteği tren kontrol ünitesinde değerlendirilir. Tramvaylarda cer kontrol ünitesi gelen referansın çözülmesi, gelen referansa göre motorların kontrolü ve kayma-kızaklama gibi durumların izlenmesi ve kayma-kızaklama etkisinin ortadan kaldırılması gibi görevleri bulunmaktadır. Her cer kontrol ünitesi 2 adet motoru kontrol etmektedir. İvme referansı TCMS tarafından cer kontrol üniteler gönderilir. Cer kontrol ünitelerinde ikinci bir kontrolden sonra inverterlere gerekli anahtarlama yapılarak istenilen ivme referansına ulaşılması

sağlanmaktadır. Simülasyonda hız referansı sürücü modeli üzerinden uygulanır. Hız referansının doğrudan uygulanması sürücüsüz metro araçlarında görülmektedir. Sürücüsüz metro araçlarında referans değeri, sürücü yerini tutan yazılım ve donanımlar vasıtasıyla uygulanır. Yazılımlar içerisinde kullanılan algoritma çevresel etkileri göz önünde bulundurarak araç kontrol ünitelerine hız referansı gönderir ve aracın gönderilen hız referansında gidip gitmediği kontrol edilir.

Simülasyonda uygulanan hız referansı sürücüsüz araçlarda uygulanan mantıktadır. Yenikapı-Emniyet/Fatih istasyonları arasında kalan hat yapısı ve makinist davranışları göz önüne alınarak referans hız değeri ortaya çıkartılmıştır. Şekil 6.9'da hız referansı görülmektedir.

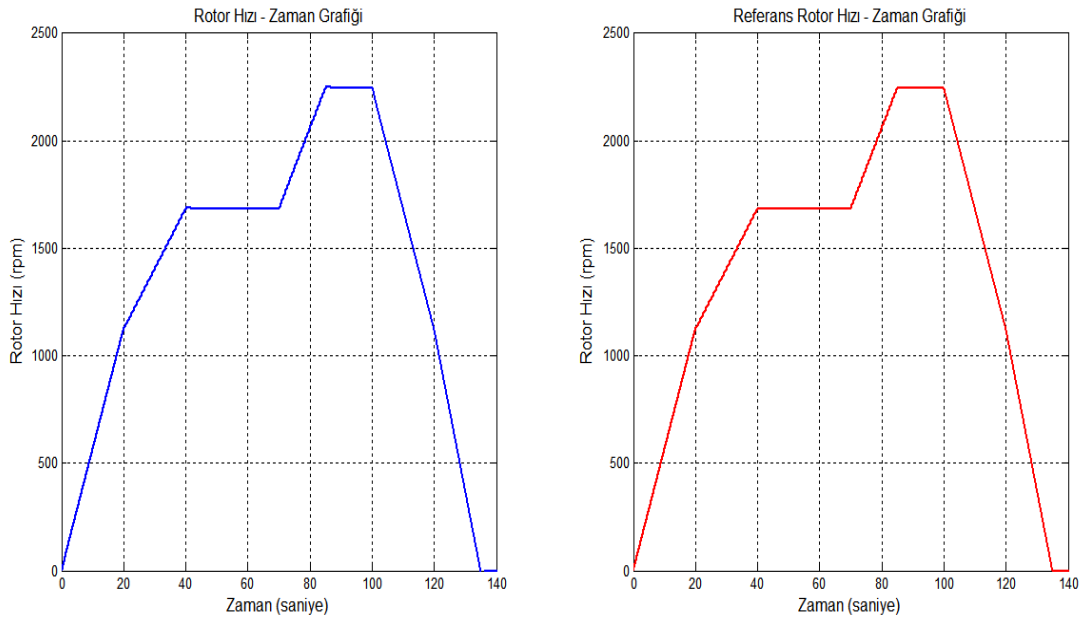


Şekil 6.10 : Uygulanan hız referansı.

Harekete başladıktan sonraki 0-20 saniye arasındaki süre boyunca 0.55 m/s^2 ivme ile 40 km/h hıza kadar hızlanır. 20. saniye ile 40. saniye arasında ivme yarıya düşürülerek 60 km/h'a kadar hızlanmaya devam edilir. 40. Saniyede ivmelenmeye son verilerek 60 km/h sabit hızda yola devam edilir. 60 km/h sabit hızla gidilirken 5.7 derecelik eğim tırmanılır ve 252 metre çaplı kurp dönülür. Eğim ve kurp geçildikten sonra hızın 80 km/h çıkarılmak üzere 70. saniyede 0.37 m/s^2 'lik ivme verilir. 85. Saniyede ivme sonlandırılarak 15 saniye boyunca aracın 80 km/h ile sabit hızda gitmesi sağlanır. 100. saniyede 0.55 m/s^2 lik frenleme ile hızın 80 km/h'den 40 km/h'a düşürülmesi sağlanır. 120 ile 135 saniyeleri arasında ivme 0.74 m/s^2 ivme ile aracın 40 km/h hızdan 15 saniyede duruşu sağlanır.

6.2 Simülasyon Sonuçları

Hız referansında anlatıldığı üzere motor için bir referans uygulanmıştır. Şekil 6.10’da rotor dönüş hızının zamanla değişim grafiği görülmektedir. Mavi ile çizilmiş olan eğri ölçülen motorun rotorunun hızı iken sağ tarafta kırmızı ile çizilmiş olan eğri referans rotor hız eğrisidir. Hız referansı ile simülasyonda motorun rotorunda ölçülen hız karşılaştırıldığında çok küçük aşım ve yerleşme zamanı ile referansın takip edildiği görülmektedir.



Şekil 6.11 : Referans hız ve gerçekleşen hız grafikleri.

Şekil 6.11’de moment zaman grafiği görülmektedir. Bu grafikten görüldüğü üzere motorun referans hıza gelebilmesi için direnç kuvvetleri ve yüke göre moment üretmesi gerekmektedir. Motorun üzerine düşen atalet 148 kg.m^2 olarak alınmıştır. Aracın ilk hareketine 0.55 m/s^2 ivme ile başladığı, 1 saniye içerisinde motorun uyguladığı momentin 970 Nm. 'ye kadar çıktığı görülmektedir. Bunun nedeni aracın ilk hareketi esnasında ataletin ve araca etki eden dirençlerin yüksek moment gerektirmesinden kaynaklanmaktadır. Kontrolcünün hız referansını takip etmeye çalışması nedeni ile moment değeri 970 Nm. 'ye kadar çıkıp ardından azalarak sabit bir değerde devam etmiştir. Bu sürücü modelimizde bulunan PI katsayıları ile istenilen şekilde ayarlanabilmektedir. Aşım ve yerleşme zamanının azaltılabilmesi için oransal katsayı ile integrator birbirine yakın seçilmiştir.

Aracın hareketinden 20. saniyeye kadar 0.55 m/s^2 'lik ivme devam ederken 9 ve 13. saniye arasında 190 metre çaplı kurba girilmiştir. Bu kurbun etkisi grafikte görülmekle birlikte etkisinin 10 Nm gibi bir değerde sınırlı olduğu anlaşılmaktadır. 20. saniyeye kadar araç hızının artması, hava sürtünme ve yuvarlanma dirençlerinin etkisini arttırması nedeni ile motorun uyguladığı moment artmaktadır.

Hızın 40 km/h'e geldiği 20. saniye ile 40. saniye arasında kalan sürede ivme yarıya düşürülerek hızlanmaya devam edilmiştir. Şekil 6.11'de görüldüğü gibi bu süre boyunca motor yaklaşık 500 Nm moment uygulayarak yoluna devam etmektedir.

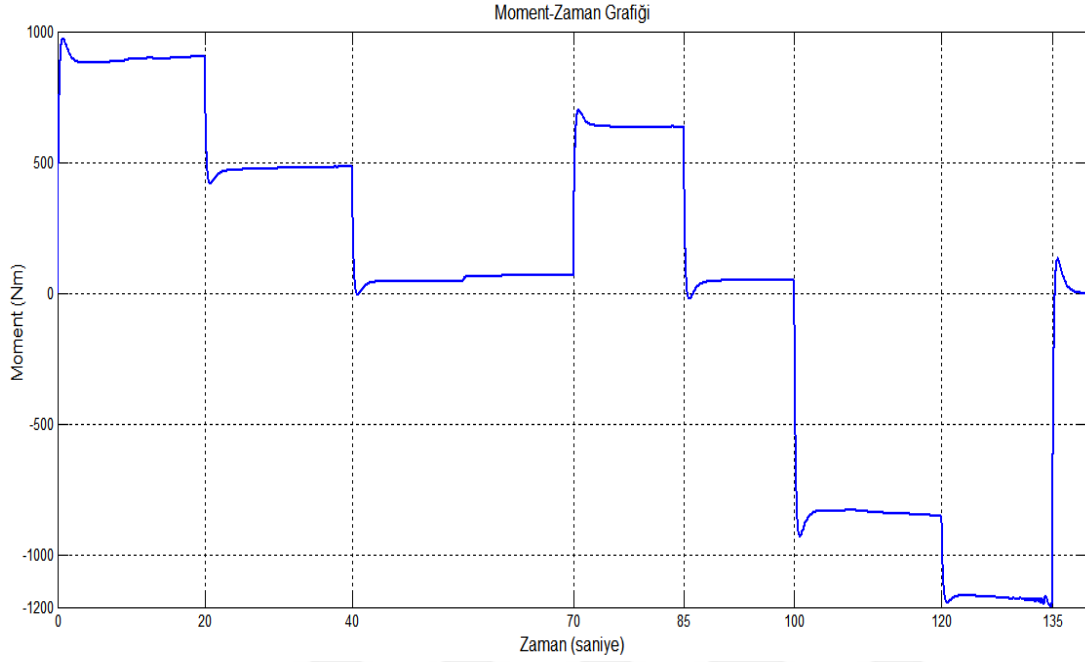
Hızın 60 km/h'e ulaştığı 40. ile 70. saniye arasında ivme 0'a düşürülerek aynı hız korunmuştur. İvmenin 0'a düşmesi nedeniyle moment 0'a kadar düşsede araç hızının korunmak istenmesi nedeniyle moment 40 Nm'de sabit kalmıştır. 55. saniyede 5.7 derecelik eğim tırmanmaya başlanması nedeniyle motor momentinin arttığı görülmektedir. Eğimin başlamasından 5 saniye sonra 253 m çaplı kurba girilmesi grafik üzerinde etki yapmasına neden olmuştur.

70. saniyede eğim sonlanırken 0.37 m/s^2 'lik ivme ile hızlanılmaya başlanır ve bu nedenle motor moment 700 Nm'ye kadar çıkar. 75. saniyede 253 m çaplı kurp sona erer ve 85. saniyeye kadar araç ivmelenerek 80 km/h hıza ulaşır.

85. saniyede araç 80 km/h hıza ulaşmıştır ve 1.1 derecelik eğimi inmeye başlar. Araç ivmesi 0'a getirilmesi nedeniyle 80 km/h hızı korumak için önce fren yaparak ters yönde moment uygular daha sonrasında ise dirençler nedeni ile moment 700 Nm'ye arttırılmıştır. Eğim 90. saniyede sonlanır ve motor referans hızını korumaya çalışmak için bir miktar 50 Nm'ye kadar moment arttırır.

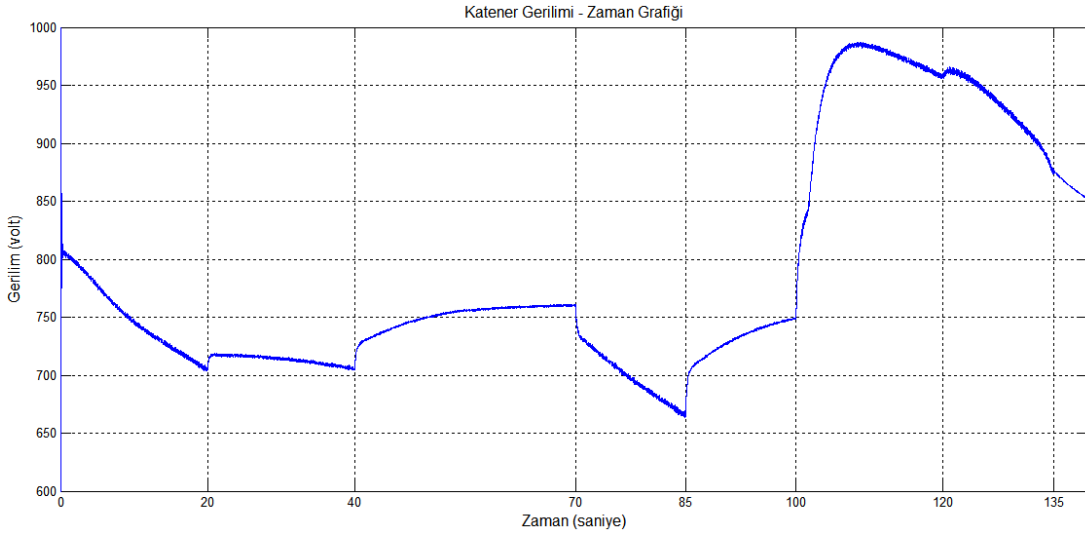
100. saniyede araç 0.55 m/s^2 ile frenleme yapmaya başlar. Aracın ataleti nedeni ile motorun ters yöne doğru döndürülmek istenmesi, ters yönde moment uygulanması anlamına gelir. Ters yönde uygulanan moment ile motor ters yönde çalışarak statörde enerji endüklenir. Bu frenlemeye rejeneratif frenleme adı verilir. 120. saniyeye kadar aynı ivme ile frenlemeye devam edilirken ters yönde 830 Nm moment uygulanır. Bu esnada motor gücü 15 saniye boyunca olması gerekenden bir miktar daha fazla güç uygulamıştır. Raylı sistem araçlarında tasarımsal olarak maksimum servis fren ve acil fren ivmeleri değişmektedir. Simülasyonda örnek almış olduğumuz araç için maksimum frenleme ivmesi 1.2 m/s^2 olarak verilmektedir.

120. saniyede frenleme ivmesi 0.74 m/s^2 'ye kadar arttırılarak aracın peronda durması sağlanır. Bu frenleme ile 40 km/h hızdan 0 km/h'a 15 saniyede inilmiştir. Frenleme sırasında, ters yönde yaklaşık 1150 Nm moment uygulanmıştır.



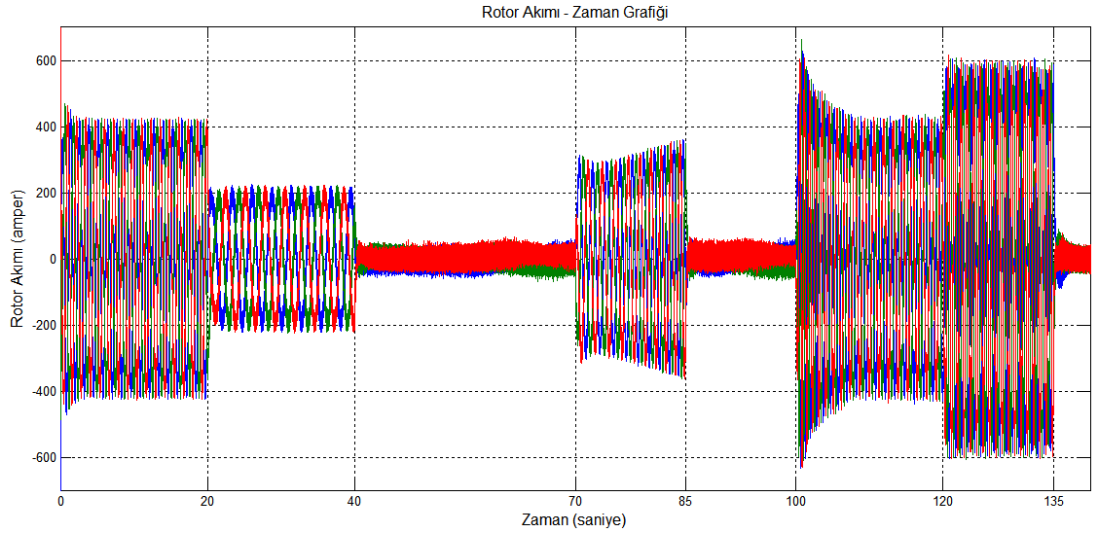
Şekil 6.12 : Moment-zaman grafiği.

Şekil 6.11'deki moment grafiği ile uyumlu olarak, şekil 6.12'de motora ileri yönde moment uygulandığında gerilim düşerken, ters yönde uygulanan moment ile motor enerji üreterek katener hattına enerji basılır.



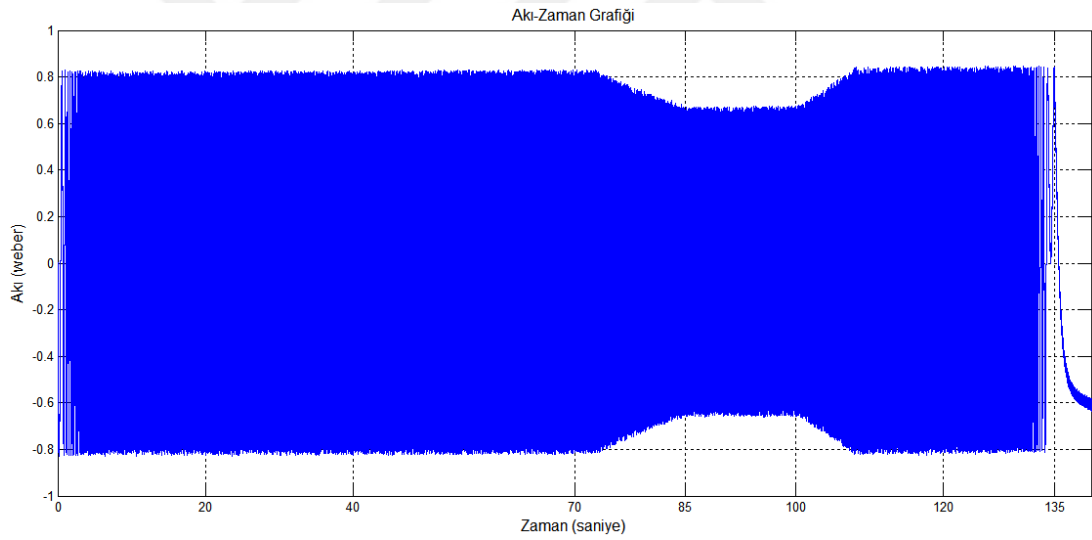
Şekil 6.13 : Katener gerilimi - zaman grafiği.

Şekil 6.13'te, abc olmak üzere 3 fazlı rotor akımının zamanla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6.14 : Rotor akımı - zaman grafiği.

Şekil 6.15'te akı zaman grafiği görülmektedir. Kontrol yapısı bölümünde anlatıldığı gibi akı azaltılarak motorun yüksek hızlara çıkması sağlanır. Akının azaltılmaya başladığı hız yaklaşık olarak 60 km/h olarak görülmektedir.



Şekil 6.15 : Akı-zaman grafiği.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Doğrudan moment kontrol yöntemi, referans hızın değişimine karşı asenkron motor rotorunda görülen cevabın çok hızlı olduğu ve karmaşık motor parametrelerinin çok fazla sistemimizde önem arz etmediği simülasyon ile görülmüştür. Doğrudan moment kontrol yöntemi raylı sistem araçları motor kontrolü için uygun bir kontrol yöntemidir.

Simülasyonda 80 km/h hızdan 0.55 m/s^2 ile yavaşlamaya başlandığında maksimum motor gücünün %66 civarı üzerine çıkılarak 15 saniye boyunca istenilen güç azalsa bile maksimum gücün üstünde kalmıştır. Bu süre boyunca nominal gücün üzerine çıkılması sistem için sorun yaratmayacağı düşünülse bile pratikte bu durum test edilmelir. Simülasyon parametrelerinin alındığı İTA aracı için maksimum servis fren ivmesi 1.2 m/s^2 olarak verilmektedir. Bu değer yakalanması için motorun çok yüksek güçlerde kullanılması anlamına gelirken, bu ivmenin gerçekleşmesi için farklı bir rejeneratif frenleme algoritmasının kullanılmış olması akla gelmektedir.

Simülasyonda ilgimi çeken bir diğer olay frenleme sonucu geri kazanılan enerjinin neredeyse 1000 V'a kadar yükselmesidir. Gerçek durumlar için katener hat gerilimi hiç bir zaman 900 V üstüne çıkamaz, 900 V üstündeki durumlar için fren rezistörleri ile fazla enerji yakılır. Kullanılan batarya sürekli 750 V enerji verirken hatta tek araç var olduğu düşünülürse ciddi enerji kaybının yaşandığı görülmektedir.

Uygulanan hız referansına karşı, rotor hızı doğru şekilde kontrol edilmiştir. Moment aşım ve yerleşme zamanı sürücü modeli yardımı ile istenilen seviyede tutulmuştur.

Raylı sistem araçlarında gelişen teknoloji ile birlikte kullanılan ekipmanlar küçülüp hafiflemekte, sistemler otonom hale gelmekte ve enerji verimliliği ön plana çıkmaktadır. Özellikle raylı sistemlerde enerji verimliliği konusunda farklı ülkelerde pek çok çalışma yapılmaktadır. Yapmış olduğumuz simülasyon geliştirilerek daha gerçekçi tasarımların yapılabileceği gibi enerji verimliliği için aksiyon alınabilir.

Bu aksiyonlardan biri sürücüsüz araçların kendi sunucularında bulunan algoritmalar sayesinde sürekli olarak frenleme ve hızlanma eğrilerinin oluşturulması sonucu araç hareketinin sağlanmasıdır. Bu simülasyonda araç hareketi sonucu katener hattından alınan ve katener hattına verilen enerji net bir şekilde görülmüştür. Bu veriler neticesinde enerji verimliliğini sağlayabilecek araç hareket algoritmaları geliştirilebilir.

Farklı sistemler ve ya farklı durumlar için kontrol teknikleri, algoritmalar kullanılarak enerji verimliliği ile ilgili çalışmalar yapılabilir. Kontrol sistemleri enerji verimliliği göz önüne alınarak tekardan tasarlanabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Seimbille, D.** (2014). *Design of power supply system in DC electrified transit railways- Influence of the high voltage network* (Degree Project). KTH Royal Institute of Technology, Electrical Engineering, Stockholm.
- [2] **Uyulan, Ç.** (2017). *Demiryolu araçları için yeniden tutunma kontrolünün ve kararlılık analizlerinin yapılması* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Gökaşan, M.** (2016). *Demiryolu Araçları CER Sistemleri* (ders notları). İstanbul Teknik Üniversitesi, Raylı Sistem Mühendisliği Yüksek Lisans Programı, İstanbul.
- [4] **De Filippo, G., Marano V. & Sioshansi R.** (2013). *Simulation of an Electric Transportation System at The Ohio State University*. Ohio State University, Applied Energy, Ohio.
- [5] **Lozano, J.A. Felez, J. De Dios Sanz & J. Mera, J.M.** (2012). *Railway Traction, Reliability and Safety in Railway*, Dr. Xavier Perpinya (Ed.), ISBN: 978-953-51-0451-3
- [6] **Bose, B.K.** (2001). *Modern Power Electronics and AC Drivers* (Chapter . 8, pp.333-439). , ISBN: 0-13-016743-6
- [7] **Behera, P. K. Behera, M. K. & Sahoo, A. K** (2001). (2000). Speed Control of Induction Motor using Scalar Control Technique, *International Journal of Computer Applications*, 0975-8887.
- [8] **Boylu, M.** (2010). *Asenkron Motor Hız Kontrolü* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] **Yiğit, T.** (2011). *Elektrikli CER Sürücü Sistemlerinin Modellenmesi, Kontrolü ve Simülasyonu* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] **Sarioğlu, M.K. Gökaşan, M. Boğosyan, S.** (2003). *Asenkron Makinalar ve Kontrolü* (Bölüm . 8, pp.272-326). , ISBN: 975-511-343-6
- [11] **Bhugul, S. A. & Thosar, A. G.** (2014). Simulation of Direct Torque Control of Induction motor using Space Vector Modulation Methodology, *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, Vol.4 Iss.5, 2249-6645.
- [12] **Alnasir, Z. A. & Almarhoon, A. H.** (2012). Design of Direct Torque Controller of Induction Motor (DTC), *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, Vol.4 No 2, 0975-4024.

- [13] **Patil, U. V. Suryawanshi, M. H. & Renge, M. M.** (2012).Performance Caomparision of DTC and FOC Induction Motor Drive in Five Level Diode Clamped Inverter, IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science and Management (ICAESM-2012),*March 30,31, 2012 page no.227-230.*
- [14] **Takahashi, I. & Noguchi, T.** (1986). A new quick-response and high efficiency control strategy of an induction machine, IEE Trans. Ind. Application 22,820–827.
- [15] **Allirani, S. & Jagannathan, V.** (2010). High Performance Direct Torque Control of Induction Motor Drives Using Space Vector Modulation, IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol 7, Issue 6, November 2010 pp. 178-186.
- [16] **Pillay, P.** (1995). Mathematical models for Induction Machines, IEEE,0-7803-3008-0195.
- [17] **Url-1** <<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ug/simulating-an-ac-motor-drive.html#f4-7795>> , date retrieved 12.10.2017.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Fatih Tuna Cerrah
Doğum Tarihi ve Yeri : 21 Nisan 1990, Eminönü
E-posta : tuna.cerrah@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2014 Mart ayında Metro İstanbul A.Ş. şirketinde başlamış olduğu Ar-Ge Mühendisliği görevini sürdürmektedir.