

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ TAŞITLAR İÇİN ELEKTRONİK
DİFERANSİYEL TASARIMI VE KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melih GÜRMERİÇ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ TAŞITLAR İÇİN ELEKTRONİK
DİFERANSİYEL TASARIMI VE KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Melih GÜRMERİÇ
(518121018)**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 518121018 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Melih GÜRMERİÇ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ELEKTRİKLİ TAŞITLAR İÇİN ELEKTRONİK DİFERANSİYEL TASARIMI VE KONTROLÜ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ata MUĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Özgür Turay KAYMAKÇI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **27 Mayıs 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında bana her konuda yardımcı olan değerli danışmanım Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN'a teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca beni maddi ve manevi her konuda destekleyen, bugünleri görmemi sağlayan, her zaman benim yanımda olan ve onlar gibi bir aileye sahip olduğum için kendimi çok şanslı ve gururlu hissettiğim annem Ayla GÜRMERİÇ ve babam Ali GÜRMERİÇ'e çok teşekkür ederim.

Mayıs 2015

Melih GÜRMERİÇ
(Mekatronik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	2
2. ELEKTRİKLİ TAŞITLAR.....	7
2.1 Hibrit Taşıtlar	7
2.1.1 Paralel hibrit taşıtlar	8
2.1.2 Seri hibrit taşıtlar.....	9
2.1.3 %100 Elektrikli (%100ET - BEV)taşıtlar	10
3. ELEKTRİKLİ TAŞITIN MODELLENMESİ	11
3.1 Giriş.....	11
3.2 Mekanik Kısımların Modellenmesi.....	12
3.2.1 Bir taşıtın boyuna hareketi	13
3.2.1.1 Hava direnci	14
3.2.1.2 Yuvarlanma direnci.....	14
3.2.1.3 Yokuş direnci	16
3.2.1.4 İvmelenme direnci.....	17
3.2.1.5 Tekerlekten gelen boyuna tahrik kuvveti.....	18
3.2.2 Bir taşıtın yatay yönde hareketi.....	19
3.2.2.1 Düşük hızda viraj dönüşü.....	20
3.2.2.2 Yüksek hızda viraj dönüşü.....	22
3.2.3 Bir taşıtın düşey yöndeki hareketi.....	25
3.2.4 Aracın hareketi için gerekli koşullar	28
3.2.5 Tekerlek modeli	29
3.2.6 Dişli kutusu	31
3.3 Elektrik Kısımların Modellenmesi	32
3.3.1 Elektrik makinaları.....	32
3.3.2 Sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM)	33
3.3.3 SMSM motor modeli	34
3.3.4 Motor sürücünün modellenmesi.....	38
3.3.5 Bataryanın modellenmesi.....	40
3.3.6 Elektronik diferansiyelin modellenmesi	42
3.3.7 Çekiş kontrol sistemi.....	45
4. MOTOR KONTROLÜ VE SİMULASYON	47
4.1 SMSM Kontrolü	47

4.1.1 PI kontrolörlerinin ayarlanması.....	50
4.1.2 Alan (akı) zayıflatma yöntemi.....	51
4.1.3 PWM'lerin elde edilmesi	51
4.2 Simulasyon	52
4.3 Simulasyon Sonuçları.....	58
4.3.1 Elektronik diferansiyel simulasyonu sonuçları	58
4.3.2 Anahtarlama simulasyon sonuçları	64
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	69
KAYNAKLAR.....	71
EKLER.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	79

KISALTMALAR

ABS	: Antilock Braking System
AC	: Alternative Current
BEV	: Battery Electric Vehicle
DC	: Direct Current
DMK	: Doğrudan Moment Kontrolü
DTC	: Direct Torque Control
FDCM	: Fırçasız DC Motor
FOC	: Field Oriented Control
HD	: Hibritlik Derecesi
ICE	: Internal Combustion Engine
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
KVL	: Kirchhoff Voltage Law
KÜ	: Kontrol Ünitesi
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NEDC	: New European Driving Cycle
PMSM	: Permanent Magnet Synchronous Motor
PWM	: Pulse Width Modulation
SAE	: Society Automotive Engineers
SMSM	: Sabit Miknatıslı Senkron Motor
SOC	: State of Charge
TCS	: Traction Control System
%100ET	: %100 Elektrikli Taşıt

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Yuvarlanma direnci katsayıları [1].....	16
Çizelge A.1 : Kullanılan örnek taşıtın parametreleri.....	76
Çizelge A.2 : Kullanılan SMSM'lerin parametreleri.....	77
Çizelge A.3 : Kullanılan bataryaların parametreleri.....	78

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Paralel hibrit taşıt mimarisi.	8
Şekil 2.2 : Seri hibrit taşıt mimarisi.	9
Şekil 2.3 : Fuel-cell hibrit taşıt mimarisi.	9
Şekil 2.4 : %100 Elektrikli taşıt mimarisi.	10
Şekil 3.1 : Projedeki taşıtın mimarisi.	11
Şekil 3.2 : SAE taşıt koordinat sistemi.	12
Şekil 3.3 : Taşıt üzerine etkiyen boyuna direnç kuvvetleri [2].	13
Şekil 3.4 : Yuvarlanma direnci [2].	15
Şekil 3.5 : Sürtünme katsayısının kaymaya bağlı olarak değişimi[1].	19
Şekil 3.6 : Yatay yöndeki taşıt kinematikleri [2].	20
Şekil 3.7 : Ackermann geometrisi.	21
Şekil 3.8 : Tekerlek kayma açısı [2].	22
Şekil 3.9 : Yüksek hızlarda direksiyon açısı [2].	23
Şekil 3.10 : Sadece ön tekerleği dönen bisiklet modeli [3].	25
Şekil 3.11 : Taşıt üzerindeki kuvvetler [2].	26
Şekil 3.12 : Arka aks üzerinde yalpadan kaynaklı yük değişimi [4].	27
Şekil 3.13 : Dönen tekerleğin dinamik davranışları [19].	30
Şekil 3.14 : Örnek dişli [24].	32
Şekil 3.15 : Elektrik makina çeşitleri.	32
Şekil 3.16 : İki fazlı SMSM modeli [5].	34
Şekil 3.17 : Sabit durumdaki ve rotorun dönüş durumdaki $d - q$ eksenleri [5].	35
Şekil 3.18 : d eksenli eşdeğer devresi [5].	35
Şekil 3.19 : q eksenli eşdeğer devresi [5].	36
Şekil 3.20 : İki ve üç fazlı stator sarımları [5].	37
Şekil 3.21 : Eviricilerin temel blok şeması [7].	38
Şekil 3.22 : Üç fazlı tam köprü eviricinin temel devre şeması.	39
Şekil 3.23 : Batarya eşdeğer devresi [21].	40
Şekil 3.24 : Matlab batarya devre şeması [28].	41
Şekil 3.25 : Mekanik diferansiyel [29].	43
Şekil 3.26 : Ackermann geometrisi.	43
Şekil 3.27 : TCS'nin sisteme entegrasyonu.	46
Şekil 4.1 : V_q gerilimini elde edilmesi.	47
Şekil 4.2 : V_d gerilimini elde edilmesi.	48
Şekil 4.3 : Doğrudan vektör kontrol.	48
Şekil 4.4 : i_q akımının elde edilmesi.	49
Şekil 4.5 : i_d akımının elde edilmesi.	49
Şekil 4.6 : Dolaylı vektör kontrol.	50
Şekil 4.7 : Genel simülasyon bloğu.	53
Şekil 4.8 : Elektronik diferansiyel simülasyonu referans hız.	53
Şekil 4.9 : Anahtarlama motor kontrolü simülasyonu referans hız.	54

Şekil 4.10 : Elektronik diferansiyel modeli.	54
Şekil 4.11 : Direnç modeli.	55
Şekil 4.12 : Dişli oranı modeli.	55
Şekil 4.13 : SMSM modeli.	56
Şekil 4.14 : Batarya ve sürücü modeli.	56
Şekil 4.15 : Histeresiz özellikli orantılı akım kontrollü PWM.	57
Şekil 4.16 : Anahtarlama kontrol.	57
Şekil 4.17 : Anahtarlama motor kontrol.	58
Şekil 4.18 : Taşıt hızının referans hızı takibi.	58
Şekil 4.19 : Uygulanan senaryoya göre motor hızlarındaki değişimler.	59
Şekil 4.20 : Uygulanan senaryoya göre tekerlek hızlarındaki değişimler.	59
Şekil 4.21 : Uygulanan senaryoya göre motor tork değişimleri.	60
Şekil 4.22 : Uygulanan senaryoya göre motor tork değişimleri.	60
Şekil 4.23 : Tekerleklerdeki torklar.	60
Şekil 4.24 : Tekerleklerdeki torklar.	61
Şekil 4.25 : Dönüş anında taşıtın yüzme açısı.	61
Şekil 4.26 : Viraj anında taşıtın sapma oranı.	61
Şekil 4.27 : Viraj anında taşıta etkiyen yanal kuvvet.	62
Şekil 4.28 : Viraj anında sağ ve sol arka tekerleğe etkiyen yanal kuvvetler.	62
Şekil 4.29 : Taşıtın simulasyon süresince izlediği yol.	63
Şekil 4.30 : Simulasyonda taşıtın dönüş anı.	63
Şekil 4.31 : Taşıt hızının referans hızı takibi.	64
Şekil 4.32 : Motorların ürettikleri torklardaki değişimler.	65
Şekil 4.33 : Hız değişimlerine göre ön ve arka aksa etkiyen dikey kuvvetler.	65
Şekil 4.34 : 9 – 17sn aralığındaki hız değişimi.	66
Şekil 4.35 : 9 – 17sn aralığındaki motorların ürettikleri torklar.	66
Şekil 4.36 : 9 – 17sn arasında stator faz akım değişimleri.	67
Şekil 4.37 : Farklı zaman aralıklarında faz akımlarındaki sıra değişimleri.	67
Şekil 4.38 : 16 – 16.01 aralığındaki faz gerilimlerindeki değişim.	67
Şekil 4.39 : Simulasyon boyunca batarya şarj yüzdesindeki değişim.	68
Şekil 4.40 : Simulasyon boyunca bataryadaki akım değişimleri.	68
Şekil 4.41 : Simulasyon boyunca bataryadaki gerilim değişimleri.	68

ELEKTRİKLİ TAŞITLAR İÇİN ELEKTRONİK DİFERANSİYEL TASARIMI VE KONTROLÜ

ÖZET

Günümüzde otomobil teknolojisi her geçen gün gelişmektedir. Yaklaşık 100 yıldan beri araçlarda kullanılan içten yanmalı motorlar hem her alanda ilk enerji kaynağı olan fosil yakıtların tükenmesine aynı zamanda çevrenin kirlenmesine neden olmaktadır. Bu durum son 15-20 seneden günümüze uzanan periyotta otomotiv firmalarını, daha düşük hacimli daha az yakıt tüketen verimli motorlar tasarlamaya aynı zamanda araçlarda kullanılacak farklı yakıt arayışlarına itmiştir. Bu arayış bundan yaklaşık 150 sene önce düşünülen ancak zamanın teknolojisi yüzünden kullanımı sınırlı kalan elektrik motorlarını araçlara entegre etme fikrini yeniden canlandırmıştır. Sadece elektrik motoru kullanılarak yeterli menzil sağlanamamasından ötürü, ilk olarak elektrik motorları içten yanmalı motora ek olarak araçlara eklenmiştir ve ortaya hibrit araç çıkmıştır. Hibrit araçlar, bünyesinde iki farklı motor tipi bulunduran taşıtlardır. Taşıtın tahrik durumuna göre iki farklı mimari sahip olabilirler. Bu mimarilerden ilki paralel mimaridir. Paralel mimariye sahip hibrit taşıtlarda elektrik motoru ile içten yanmalı motor ayrı ayrı ya da aynı anda taşıtın tahrikinde yer alabilir. Genellikle bu mimariye sahip taşıtlarda elektrik motoru taşıtın en çok yakıt harcadığı dur kalk operasyonlarında devreye girer ve belli bir hızdan sonra yerini içten yanmalı motora bırakır. Bu sayede taşıtın yakıt sarfıyatı büyük ölçüde azaltılmış olur. Hibrit taşıtlar taşıtın tahrik durumuna göre ikinci olarak seri mimari kullanılarak tasarlanabilir. Seri mimaride paralel mimariden farklı olarak iki motor ayrı ayrı çalışmaz, motorlardan biri öbürünü için gerekli enerjiyi üretir. Genellikle seri mimarili araçlarda küçük hacimli içten yanmalı motor taşıtın akülerini şarj etmek için kullanılır. Bu sayede aracın menzili uzatılmış olur. Seri hibrit projelerde içten yanmalı motorun yerine fuel cell kullanılarak hidrojenle yararlanarak aküler şarj edilebilir. Batarya teknolojilerindeki gelişmeler ışığında günümüzde sadece elektrik motoru ile çalışan taşıtlarda üretilmektedir. Bu tür %100 Elektrikli taşıtlarda en önemli problem menzil problemidir. Menzil probleminin iyileştirilmesi aracın ağırlığının azaltılması ve daha uzun ömürlü bataryaların üretilmesi ile başarılabilir. Her geçen gün daha hafif daha uzun ömürlü, şarjedilebilir bataryalar üretilmektedir.

Tezin amacı %100 Elektrikli Taşıtlar için elektronik diferansiyel tasarlayıp, kontrolünü yapmaktır. Tasarlanan taşıtta, Elektrik motorları taşıtın arka tekerlekleri yerine kullanılmıştır. Bu tür taşıtlarda mekanik diferansiyel kullanılamayacağı için, taşıtın virajlarda sorun yaşamaması için diferansiyel yerine geçecek bir kontrol sistemi tasarlanmalıdır. Elektronik diferansiyel viraj anında taşıtın tekerlekleri için gerekli hızları hesaplar ve tekerlekleri yaklaşık aynı torkta döndürür. Böylece taşıt viraja girdiğinde virajı problemsiz alır.

Proje için oluşturulan taşıt modeli Matlab/Simulink programı kullanılarak simüle edilmiştir. Elektronik diferansiyel kontrolü ve anahtarlamalı kontrol olmak üzere, iki farklı senaryo için iki adet simulasyon hazırlanmıştır. Elektronik diferansiyel kontrolü simulasyonunda araç 0dan 50km/s hız çıkarılmış, 50km/s hızla giderken

direksiyonu 90 derece sağı kırılmıştır. Oluşturulan senaryoya göre taşıtın sağ ve sol motorlarındaki hız ve tork farklılıkları, taşıta etkiyen yanal kuvvetler ve taşıtın savrulma açısının zamana göre değişimi gözlenmiştir. Simulasyon hız ve tork değişimlerinin daha rahat gözlenebilmesi için evirici kullanılmadan anahtarlamaşız olarak oluşturulmuştur. Anahtarlamaşız kontrol simulasyonunda motor kontrolü evirici ve bataryalar ile birlikte yapılmıştır. Simulasyon için farklı hız senaryosu hazırlanmıştır. Mevcut senaryoya göre motorların referans hızı takibi, motorların üretmesi gereken torklar, stator faz akımları, faz gerilimleri ve bataryadaki değişimler gözlenmiştir. Simulasyon sonuçları dördüncü bölümde simulasyon sonuçları kısmında yorumlanmıştır.

ELECTRONIC DIFFERENTIAL DESIGN AND CONTROL FOR ELECTRIC VEHICLES

SUMMARY

Fossil fuels have been consumed day by day despite the world's high population. That situation starts to become a problem for the future of the world. At the same time, fossil fuels are commonly used as a source of energy in every aspects of life. For that reason, scientists try to find some alternative energy sources.

That situation affects automotive industry in a bad way. So, the automotive companies have begun to develop little volume motors with more powerful and efficient conditions in the last twenty years. Moreover, those companies have started to discover new energy types in order to use them with their own products. Actually, the idea of producing an electric vehicle was thought 150 years ago, but in that time it was impossible to produce it with a little technology. Besides, some companies began to work and research for the development of electric vehicles twenty years ago. They followed some steps to be able to reach their certain targets. Firstly, electric motors were integrated with conventional vehicles and they were used in order to support the internal combustion engines. Those types of vehicles are called as hybrid vehicles. The hybrid vehicles have two different types of engines. One has an internal combustion engine and the other has an electric engine. The engines can work together or separately in parallel hybrid vehicles. In parallel hybrid vehicles, the electric engine activates itself in the process of stop and go. By that way, the vehicle's fuel consumption is reduced easily. In addition, some parallel hybrid vehicles could work as Battery Electric Vehicles (BEV) till their batteries are empty. When their batteries are empty, the Internal Combustion Engine (ICE) activates itself. Generally, the series of hybrid architectures are used in special projects such as fuel-cell hybrid vehicles. Moreover, Battery Electric Vehicles (BEV) require some batteries for energy. Because, batteries are the most important part of the battery electric vehicles. They limit the range of the vehicle. Therefore, the future of battery electric vehicles depends on the development of battery technology. Besides, the battery technology progresses and battery electric vehicles may be realized on the streets nowadays. Electric motors can be placed as wheels of the vehicles. Thus, heavy powertrains do not have to be used in those type vehicles. But, mechanical differential cannot use in these type vehicles and system which works like differential have to design in order to cornering stability of the vehicle.

The aim of that thesis is modelling and control of electronic differential for Battery Electric Vehicle. There are two electric motors are located as rear wheels of the vehicle. Besides, mechanic differential cannot be used with those type of vehicles so, electronic differential is designed in order to control of speeds and torques of rear wheels. Designing electric vehicle consist of two parts. Those are mechanical design and electrical design.

First part is mechanical design. Mechanical design part includes vehicle dynamics, gearbox and differential in that Project. Moreover, longitudinal, lateral and normal

forces are calculated in mechanical design part. Longitudinal forces, which resist the vehicle, are acceleration resistance, aerodynamic drag force, rolling resistance force and incline resistance force. Aerodynamic drag force depends on the frontal area of the vehicle, aerodynamic drag coefficient, the mass density of air and the square of the vehicle speed. Rolling resistance force changes with weight of the vehicle and type of the road. Incline resistance force depends on the angle of incline and the weight of the vehicle. Lateral forces affect to vehicle in the process of cornering. Centrifugal force has an impact on the vehicle when vehicle negotiates with the bend. Normal force, which affects front and rear axes, changes traction and braking. At the same time, normal forces, which affect wheels, change the process of cornering. Gearbox are located between rotor of motor and wheels because, motors cannot generate the required torques. Gearbox enhances the torques which are generated by motors. Thus, torques, which are needed, also are provided. Ackermann geometry is used in order to design electronic differential. Besides, the speed differences of rear wheels are calculated by Ackermann steering geometry.

The second part of designing electric vehicle is electrical design. Electrical design part consist of electric motors, inverters and batteries in this project. Two Permanent Magnet Synchronous Motors are used for traction of the vehicle. Model of the PMSM occurs nonlinear equations and torque and flux cannot control separately. In addition, some of the methods such as Direct Torque Control (DTC) and Field Oriented Control (FOC) are constituted in order to control PMSMs. Field Oriented Control (FOC) or Vector Control are used in order to control PMSMs in that project. The aim of the vector control is to control torque and flux separately. Difference between variable speed and motor speed are converted torque by PI controller which is driver model. Thus, reference torque is generated. Then, torque value divided by torque constant of the motor and reference quadrature current is obtained. And then, difference between reference quadrature current and stator instantaneous quadrature current which is measured from the motor are converted voltage by PI controller. In simultaneously, reference direct current is generated in flux weakening model from vehicle angular velocity. Then, difference between reference direct current and stator instantaneous direct current which is measured from the motor are converted voltage by PI controller. Thus, two voltages which are V_q and V_d are obtained. V_q and V_d voltages are transformed into V_a , V_b , V_c voltages. These voltages are sinusoidal signals and these voltages compare to triangle voltage signal. Thus, PWMs are obtained in order to control gates of IGBTs which are in the inverter. And then, phase voltages are generated by inverter and PMSMs are controlled. There are three PI controllers in vector control system. One of them is driver model which is generate reference torques. Two of them is used for converting from currents to voltages. Firstly, voltages PIs are tuned. Then, driver model PI is tuned.

Vehicle model which is designed is simulated in Matlab/Simulink program. Two different scenarios are created and two simulations are built. The first simulation is created for electronic differential, motors are controlled without inverter and gates. The speed of the vehicle is increased from 0 km/h to 50 km/h and cornering starts at 50 km/h. Differences of speeds and torques between right and left motors, differences of speeds and torques between right and left wheels, sideslip angle of the vehicle, yaw rate of the vehicle and lateral forces which effects the vehicle are observed. Motors are controlled without inverter and gates in the first simulation. If the simulation simulates with inverter and gates, the torque results can not be observed easily. Torque differences between right and left motors small and cannot

be distinguished because of the oscillations. The second simulation is created for control with gates, special speed scenario are created. Motors are controlled with inverter and gates. Torques which are generated by motors, motor speeds, stator phase currents, phase voltages and the changes in battery are observed. The simulation results are given in the 4th chapter.

1. GİRİŞ

Günümüzde fosil yakıtların her geçen gün azalması ve buna karşın insan nüfusunun sürekli artması dünyanın geleceği açısından problem oluşturmaktadır. Fosil yakıtların her alanda enerji kaynağı olarak ilk sırada kullanılması aynı zamanda çevreye de zarar vermektedir. Bu durum bilim insanlarını farklı enerji kaynaklarını kullanmaya yöneltmiştir.

Pek çok sektörde olduğu gibi bu durum otomotiv sektörünü de etkilemiş, son 15-20 seneden günümüze uzanan periyotta otomotiv firmalarını, daha düşük hacimli daha az yakıt tüketen verimli motorlar tasarlamaya ve aynı zamanda araçlarda kullanılacak farklı yakıt arayışlarına itmiştir. Bu arayış bundan yaklaşık 150 sene önce düşünülen ancak zamanın teknolojisi yüzünden kullanımı sınırlı kalan elektrik motorlarını araçlara entegre etme fikrini yeniden canlandırmıştır. Sadece elektrik motoru kullanılarak yeterli menzil sağlanamamasından ötürü, ilk olarak elektrik motorları içten yanmalı motora ek olarak araçlara eklenmiş ve araçların en çok yakıt harcadığı dur kalk operasyonlarında kullanılmaya başlanmıştır. Bu sayede yakıt sarfiyatı azaltılmıştır. Her geçen gün batarya teknolojisi gelişmektedir ve bu durum son 5 yılda %100 elektrikli araçların piyasada yer almaya başlamasını sağlamıştır. Teknolojideki gelişmeler ışığında yakın gelecekte elektrikli araçlar içten yanmalı araçların yerini alacaktır.

Elektrik motorları, içten yanmalı motorlardan farklı olarak aracın tekerlekleri olarak konumlandırılabilir. Bu sayede taşıt, ağır güç aktarma organları ve mekanik diferansiyel sistemi olmadan tasarlanabilir. Ancak bu durumda taşıtın dönüş durumlarında problem yaşamaması için, mekanik diferansiyelin görevini yapacak bir sisteme ihtiyaç vardır. Bu sorun elektronik diferansiyel ile çözülür. Elektronik diferansiyel, taşıtın arka tekerlekleri olarak konumlandırılmış elektrik motorlarını kontrol ederek viraj anında farklı hızlarda ve yaklaşık aynı torklarda dönmesini sağlar. Böylece mekanik diferansiyelin görevi yerine getirilmiş ve taşıtın virajları sorunsuz alması sağlanmış olur.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez aşamasında, aracın arka iki tekerleği yerine konumlandırılmış iki adet elektrik motoruna sahip elektrikli taşıt için elektronik diferansiyel tasarlanıp, elektrik motorlarının kontrolü yapılmıştır. Elektronik diferansiyel tasarımı Ackermann geometrisi kullanılarak oluşturulmuştur ve direksiyon açısının değişimiyle arka tekerleklerin dönmeleri gereken hızlar hesaplanmıştır. Aracın boyuna hareketinde oluşan dirençler hesaplanıp motora yük olarak verilmiş, taşıta viraj anında etkiyen yanal kuvvetler ve hızlanma ve yavaşlama durumlarında taşıtın ön ve arka aksına etkiyen kuvvetler incelenmiştir. Tasarlanan taşıtta motor olarak iki adet Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun (SMSM) kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar Matlab Simulink programında simüle edilmiştir. Projede elektronik diferansiyel ve anahtarlama kontrol olmak üzere, iki adet senaryo oluşturulmuştur. Oluşturulan elektronik diferansiyel simülasyonunda; dönüş anında sağ ve sol motorlardaki hız ve tork değişimleri, sağ ve sol tekerleklerdeki hız ve tork değişimleri, taşıtın savrulma açısı, taşıta etkiyen yanal kuvvet ve taşıtın sapma oranı gözlemlenmiştir. Simülasyon sağ ve sol tekerleklerdeki tork farklılıklarının daha rahat görülebilmesi için $\alpha\beta$ yöntemi kullanılarak; evirici kullanılmadan, anahtarlama yapılmıştır. Anahtarlama simülasyonunda simülasyon 15dk (900sn) sürmektedir. 900snlik simülasyon süresince; bataryadaki değişimler, taşıt hızının referans hızı takibi, motorların ürettikleri torklar, hız değişimlerine göre ön ve arka aksa etkiyen dikey kuvvetler, stator faz akımlarındaki değişimler ve faz gerilimlerindeki değişimler gözlemlenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Literatürde pek çok elektronik diferansiyel çalışması vardır. Klasik mekanik diferansiyel tekerlekten motorlu elektrikli taşıtlarda kullanılamayacağı için, aracın dönüşlerde problem yaşamaması için elektronik diferansiyel tasarlanması gerekmektedir. Projede mekanik ve elektrik kısımlar modellenirken çeşitli kaynaklardan yararlanılmıştır. Mekanik kısımların modellenmesinde, araca etkiyen boyuna, yatay ve düşey kuvvetlerin hesaplanmasında ve elektronik diferansiyel tasarımında “MOTORLU TAŞITLAR Temel ve Tasarım Esasları, Yapı elemanları”[1], “Vehicle Dynamics and Control”[2], “Vehicle Dynamics Theory and Application”[3] ve “Fundamentals of Vehicle Dynamics”[4] kitaplarından

yararlanılmıştır. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Modellenmesinde ve kontrolünde “Permanent Magnet Synchronous and Brusless DC Motor Drives”[5] kitabından yararlanılmıştır. SMSM’nin vektör kontrolünde “ASENKRON MAKİNALAR VE KONTROLÜ”[6] kitabından ve evirici modellemesinde “GÜÇ ELEKTRONİĞİ Temel Analiz ve Sayısal Uygulamalar”[7] kitabından yararlanılmıştır.

Elektronik diferansiyel tasarımı ile ilgili akademik çalışmalar incelenmiş ve önemli olanları bu kısımda kaynak olarak belirtilmiştir. Guillermo A. Magall’an, Cristian H. De Angelo, Guillermo Bisheimer ve Guillermo Garcia, NEV(Neighborhood Electric Vehicle) adında elektrikli taşıt ön modeli oluşturmuş ve oluşturulan taşıtın elektronik diferansiyel kontrolünü yapmıştır. Elektronik diferansiyel tasarlanırken Ackermann geometrisinden yararlanılmıştır. Projede iki adet 6kW’lık Asenkron Motor kullanılmış ve motorlar dsp kullanılarak 2 adet evirici üzerinden kontrol edilmiştir. Motorların kontrolü için vektör kontrol yöntemi kullanılmış, kontrolör olarak PI kontrolör kullanılmıştır. Taşıtta 7 adet 6V’luk kurşun-asid bazlı bataryalar kullanılmış ve taşıtın maksimum hızı 50km/s olarak belirlenmiştir. Simulasyonda taşıtın 0.8-4.2 saniyeleri arasında ivmelenmesi sağlanmış, taşıtın bayır çıkma kabiliyeti ve uygunlanan dönüş senaryosuna göre manevra kabiliyeti incelenmiştir. Simulasyon sonuçlarında arka iki tekerleğin dönüş anındaki hız değişimleri ve motorunların stator akımlarındaki değişimler gözlemlenmiştir [8]. Hakan Kahveci, Halil İbrahim Okumuş ve Mehmet Ekici, aracın arkasına konumlandırılmış iki adet Fırçasız Doğru Akım Motoruna sahip araç için elektronik diferansiyel tasarlamış, Motorların kontrolü için vektör kontrol yöntemi kullanılmış, kontrolör olarak bulanık mantık PI kontrolör kullanılmıştır. Elektronik diferansiyel tasarlanırken direksiyon açısına ve taşıtın o anki hızına göre arka tekerleklerin hızlarını hesaplamak için Ackermann geometrisi kullanılmıştır. Sistem Matlab/Simulink programında simule edilmiştir. Simulasyonda direksiyon açısı 0.1nci saniyede 30 derece sola, 0.2nci saniyede 30 derece sağa kırılarak slalom senaryosu yaratılmıştır ve bu durumdaki motor hızlarındaki değişimler gözlenmiştir [9]. Anish Bahri, Aditya Gupta ve Febin Daya JL, tasarlanan aracın arkasına konumlandırılmış iki adet Fırçasız Doğru Akım Motoruna sahip araç için elektronik diferansiyel tasarlamış, motor kontrolü için Novel Wavelet kontrolü kullanmışlardır, kontrolör olarak PID kontrolör kullanılmıştır. Oluşturulan model Matlab/simulink programında simule edilmiştir

Simulasyon sonuçlarında motor hızlarındaki değişimler gözlemlenmiştir [10]. Rong Wan, Guohai Liu, Duo zhang ve Wensheng Gong, tasarlanan aracın arkasına konumlandırılmış iki adet 5 fazlı Fault Tolerant Sabit Mıknatıslı Motora sahip araç için elektronik diferansiyel tasarlamış, elektronik diferansiyel tasarlanırken direksiyon açısına ve taşıtın o anki hızına göre arka tekerleklerin hızlarını hesaplamak için Ackermann geometrisi kullanılmıştır. FTSM'lerin kontrolünde vektör kontrol yöntemi tercih edilmiştir [11]. K. Hartani, Y.Miloud ve A. Miloudi, aracın arkasına konumlandırılmış iki adet Sabit Mıknatıslı Senkron Motora sahip araç için elektronik diferansiyel tasarlamış, motorların kontrolü için Doğrudan Moment Kontrolü yöntemini tercih etmiştir. Elektronik diferansiyel tasarlanırken direksiyon açısına ve taşıtın o anki hızına göre arka tekerleklerin hızlarını hesaplamak için Ackermann geometrisi kullanılmıştır. Oluşturulan model Matlab/Simulink programı kullanılarak simule edilmiştir. Simulasyonda taşıt 80km/s hıza çıkarılmış ve bu hızda giderken taşıtın direksiyonu kırılmıştır. Senaryoya göre motorların ve tekerleklerin hızları arasındaki farklılıklar, motorların ürettikleri torklar ve stator akımları gözlemlenmiştir. Projede Motorların yeterli torku üretebilmeleri için dişli kutusu kullanılmış, dişli oranı 7.2 seçilmiştir. [12]. K. Vitols ve I. Galkin, elektrikli kartın arkasına konumlandırılmış iki adet 7kW'lık 20Nm tork üretebilen Sabit Mıknatıslı Doğru Akım Motoruna sahip araç için elektronik diferansiyel tasarlamıştır. Oluşturulan model Matlab/Simulink programında simule edilmiştir. Projede toplamda 72V gerilime sahip kurşun asid bazlı bataryalar kullanılmıştır. [13]. Li Zhai ve Shouquan Dong, 4 tekerlekten motorlu elektrikli araç için elektronik diferansiyel tasarlamıştır. Taşıtta elektrik motoru olarak 4 adet 2kW gücünde 1000rpm'lik Fırçasız Doğru Akım Motoru kullanılmıştır. Kullanılan motorların her biri 20Nm tork üretmektedir. Motor kontrolünde doğrudan moment kontrol yöntemi kullanılmıştır. Elektronik diferansiyel tasarlanırken direksiyon açısına ve taşıtın o anki hızına göre arka tekerleklerin hızlarını hesaplamak için Ackermann geometrisi kullanılmıştır. Oluşturulan model Matlab/Simulink programı kullanılarak simule edilmiştir [14]. Yong Zhou, Shengjin Li, Xunqi Zhou ve Zongde Fang, her biri aracın tekerlekleri olarak konumlandırılmış 4 adet Fırçasız Doğru Akım motoruna sahip elektrikli araç prototipi için elektronik diferansiyel tasarlamıştır. [15]. Gang Li, Wei Hong, Daming Zhang ve Changfu Zong, aracın arkasına konumlandırılmış iki adet Asenkron Motora sahip taşıt için elektronik diferansiyel tasarlamıştır. Motorların kontrolü için vektör kontrol yöntemi tercih edilmiş, oluşturulan model

Matlab/Simulink programı kullanılarak simule edilmiştir. Simulasyonda sağ ve sol tekerleklerin dönüş anında kayma oranları gözlemlenmiş ve taşıtın dönüş anında dengeli bir biçimde davranması sağlanmıştır. [16]. A. Haddoun, M. E. H. Benbouzid, D. Diallo, R. Abdessemed, J. Ghouili ve K. Srairi, aracın arkasına konumlandırılmış iki adet Asenkron Motora sahip araç için elektronik diferansiyel tasarlamıştır. Elektronik diferansiyel tasarlanırken direksiyon açısına ve taşıtın o anki hızına göre arka tekerleklerin hızlarını hesaplamak için Ackermann geometrisi kullanılmıştır. Motor kontrolünde vektör kontrol ve Adaptif kontrol yöntemleri tercih edilmiştir. Yapılan çalışmalar dSpace test düzeneğinde Matlab/Simulink programı kullanılarak simule edilmiştir. Simulasyonda hız referansı olarak Yeni Avrupa Seyir Çevrimi (NEDC) kullanılmış, tasarlanan adaptif gözlemleyicini referans değerleri takibi incelenmiştir. Motorların ürettiği tork değerleri ve akı değişimleri gözlemlenmiştir [17].

2. ELEKTRİKLİ TAŞITLAR

Bünyesinde taşıtın tahriğine katkı sağlayan bir yada daha çok elektrik motoru bulunduran taşıtları elektrikli taşıtlar olarak adlandırabiliriz. Elektrikli taşıtlar, taşıtta bulunan motor çeşitliğine göre hibrit yada %100 elektrikli (%100ET - BEV) olarak adlandırılırlar. Hibrit taşıtlarda tahrik iki farklı tip motorun paralel olarak yada seri olarak çalışmasından sağlanırken, %100ET'lerde tahrik sadece elektrik motorundan sağlanır.

2.1 Hibrit Taşıtlar

Hibrit kelimesi eski Yunancada iki kökenli anlamına gelmektedir [18]. Hibrit taşıtlar bünyesinde birden fazla farklı motor bulundurmaktadırlar. Bu motorlardan biri elektrik biri içten yanmalı motor ya da biri elektrik diğeri fuel cell olabilir.

Günümüzde hibrit araçların genelinde içten yanmalı motora ek bir elektrik motoru bulunmaktadır. İki motor aynı anda ve ayrı ayrı çalışabilir. Hibrit taşıtlar, araçta bulunan motorların çalışma şekillerine göre; birbirine bağımlı veya birbirinden bağımsız olmak üzere ikiye ayrılır;

- Paralel Hibrit Taşıtlar
- Seri Hibrit Taşıtlar

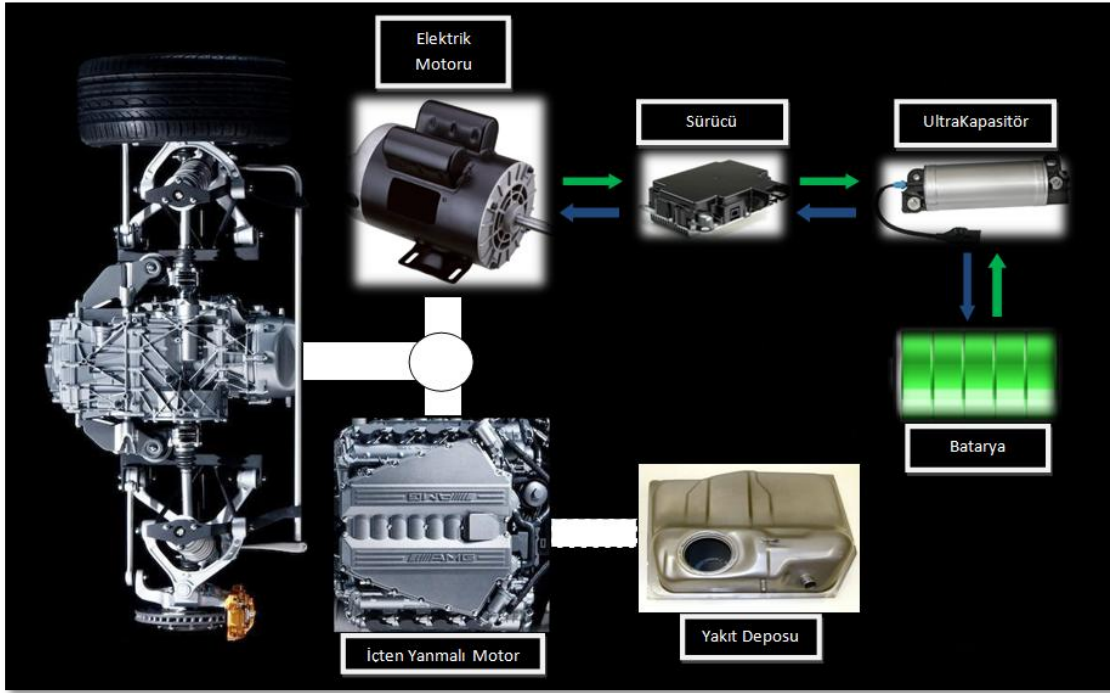
Hibrit taşıtların hibritlik derecesi denklem (2.1)'deki gibi ifade edilir.

$$HD = \frac{\text{elektrik motorunun gücü}}{\text{taşıttaki tüm motorların gücü}} \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de HD değeri büyüdükçe aracın hibritlik derecesi artar ve taşıtın hibritlik derecesi, araçta bulunan elektrik motorunun gücünü artırılması yada elektrik motoru dışındaki motorların gücünün azaltılmasıyla artırılabilir.

2.1.1 Paralel hibrit taşıtlar

Paralel hibrit taşıtlarda, araçta bulunan iki motor birbirinden bağımsız olarak; aynı anda ve farklı zamanda çalışabilir. Genellikle bu tür taşıtlarda, elektrik motoru dur kalk operasyonlarında yani aracın en çok yakıt tükettiği anlarda devrede bulunur ve araç belirli bir hızın üzerine çıktığında yerini içten yanmalı motora bırakır. Paralel hibrit taşıt mimarisi Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

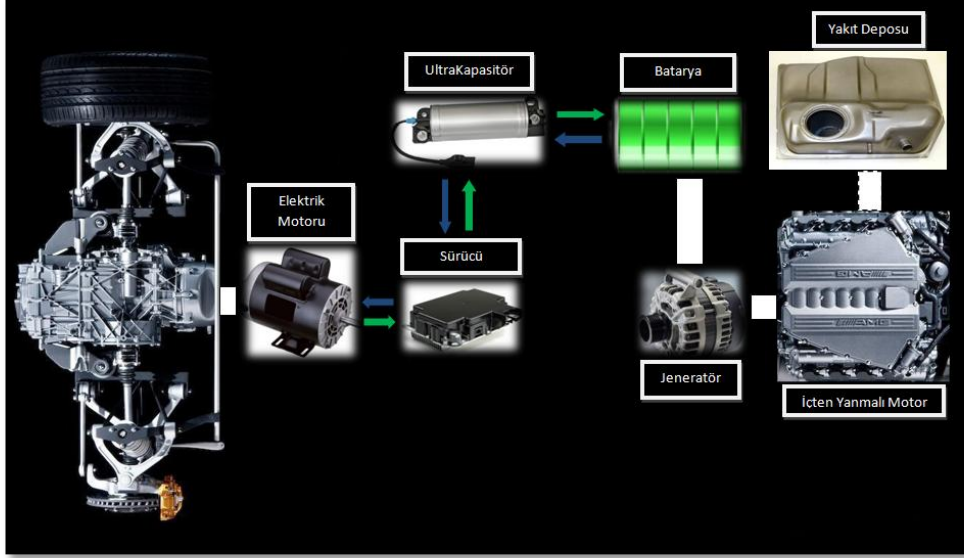


Şekil 2.1 : Paralel hibrit taşıt mimarisi.

Bazı Paralel hibrit taşıtlar, %100 Elektrikli olarak da kullanılabilir. Bu tür araçlarda bataryalar boşaldığında, taşıtta içten yanmalı motor devreye girer ve geleneksel taşıt gibi kullanılır. Mevcut araçların paralel hibrit araçlara dönüştürülmesi, seri hibrit mimariye göre kolaydır. Mevcut taşıta elektrik motoru, sürücü ve bataryalar eklenerek taşıt paralel hibrit araca dönüştürülebilir. Mevcut araçtaki güç aktarma organları kullanılabilir. Paralel hibrit araçlarda frenleme esnasında, elektrik motoru bataryaları şarj eder bu sayede bataryalar doldurulmuş olur. Bataryaların şarj edilebilmesi için araçta ultrakapasitörler kullanılır. Ultrakapasitörler kısa sürede şarj ve deşarj olabilirler bu sayede anlık enerji kolayca depolanabilir. Paralel hibrit taşıtlar yüksek fayda/fiyat oranına sahiptirler ve piyasada en çok tercih edilen hibrit araçlardır.

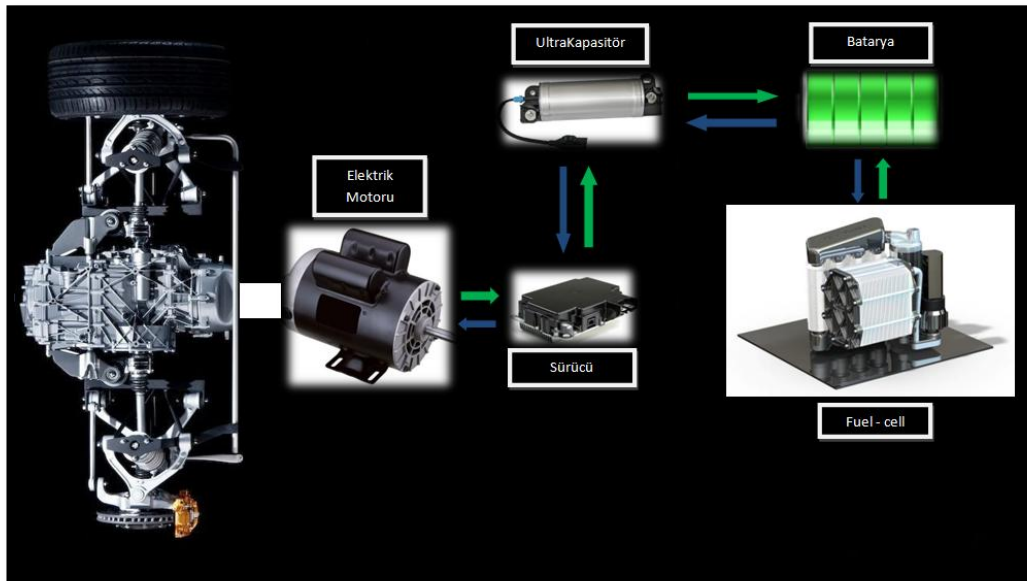
2.1.2 Seri hibrit taşıtlar

Seri hibrit taşıtlarda, araçta bulunan iki motor birbirine bağımlı olarak çalışmaktadır. İçten yanmalı motor bataryaları jeneratör üzerinden sarj etmek için kullanılır. Dolan bataryalardaki gerilim, sürücü üzerinden elektrik motoruna aktarılır. Elektrik motorları tekerleklerin tahriki için gerekli gücü sağlar. Bu sayede aracın hareketi sağlanmış olur. Seri hibrit taşıt mimarisi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Seri hibrit taşıt mimarisi.

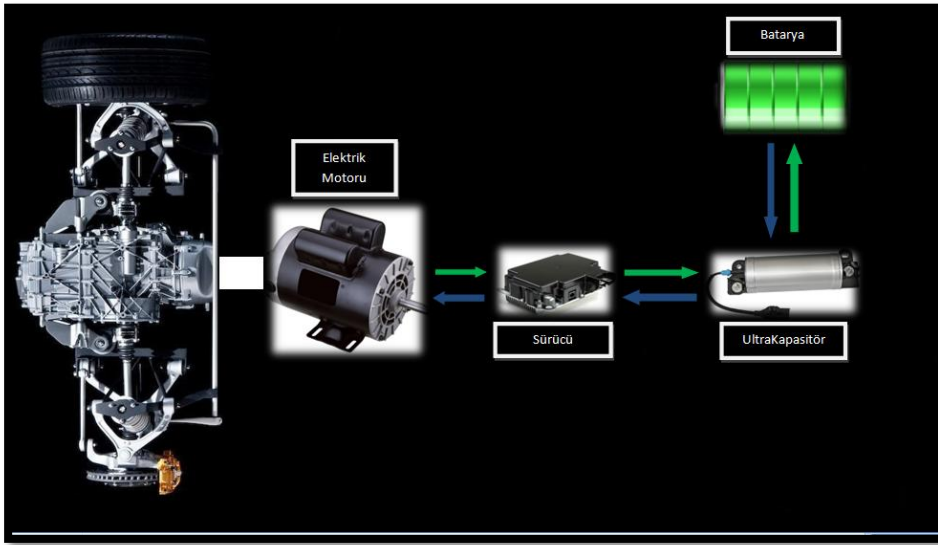
Seri hibrit araç mimarisi genellikle hidrojen (fuel-cell) hibrit taşıtlarda ve özel projelerde kullanılmaktadır. Fuel-cell hibrit taşıt mimarisi Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Fuel-cell hibrit taşıt mimarisi.

2.1.3 %100 Elektrikli (%100ET - BEV)taşıtlar

%100 Elektrikli Taşıtlar (%100ET) tekerlek tahrik gücünün tümünü elektrik motorundan alan taşıtlardır. Elektrik motorunun çalışması için gerekli gerilim bataryalardan sağlanır. Araç hızlanma durumundayken motor bataryalarda depolanmış olan elektrokimyasal enerjiyi kullanırken, frenleme durumunda motor jeneratör olarak çalışır ve ultrakapasitörler üzerinden bataryaları sarj eder. %100 Elektrikli taşıt mimarisi Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



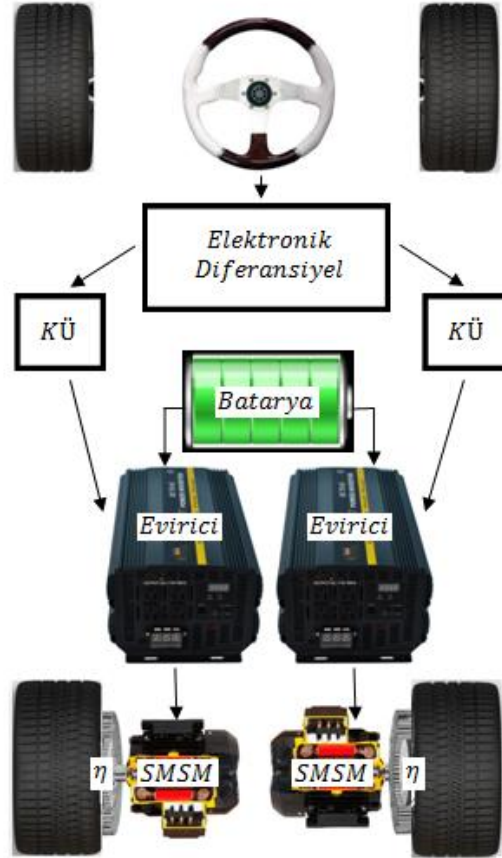
Şekil 2.4 : %100 Elektrikli taşıt mimarisi.

Bataryalar %100ET’lerin menzilini belirlediğinden taşıt için çok önemlidir. Bataryaların şarj kapasitesi ağırlığı gibi etmenler taşıtın menzilini doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden batarya teknolojileri üzerindeki araştırma ve geliştirme projeleri her geçen gün artmaktadır. %100ET’lerin bataryaları şebekeden sarj kablosu ile yada çeşitli yerlerde kurulan sarj ünitelerinden doldurulabilmektedir. Buda %100ET’lerin yaygınlaşması önünde büyük bir problemdir. Bataryalar çok kısa sürede doldurulamadığından bu durum benzinli araçlar karşısında çok büyük bir dezavantajdır. Gelişen teknolojiler ışığında, günümüzde sokaklardaki %100ET’lerin sayısı her geçen gün artış göstermektedir. Batarya teknolojisindeki gelişmeler sayesinde gelecekte, elektrikli taşıtlar içten yanmalı motor kullanan fosil yakıtlı taşıtların yerini alacaktır.

3. ELEKTRİKLİ TAŞITIN MODELLENMESİ

3.1 Giriş

Projede tasarlanan elektrikli aracın tahriki, aracın arka tekerlekleri yerine konumlandırılmış iki adet Sabit Mıkanatıslı Senkron Motor (SMSM) tarafından sağlanmaktadır. Projedeki taşıtın mimarisi Şekil 3.1'deki gibidir.



Şekil 3.1 : Projedeki taşıtın mimarisi.

Elektronik diferansiyel anlık hız bilgisi ile direksiyondan gelen açı bilgisini kullanarak, o anki hız ve direksiyon açısına göre arka tekerleklerin dönmesi gereken hızları hesaplar. Hesaplanan anlık hızlar kontrol ünitelerine (KÜ) aktarılır. Daha sonra eviriciler üzerinden motorların kontrolü yapılır. Eviriciler çalışmaları için gerekli gücü bataryalardan sağlamaktadır. Motorların ihtiyacı olan gerilim eviriciler

tarafından sağlanmaktadır. Motorlar ile tekerleklerin arasında aracın hareketi için gerekli torkların elde edilebilmesi için dişli kutusu kullanılmıştır.

Elektrikli Taşıtın modellenmesini iki ana kısımda inceleyebiliriz;

- Mekanik Kısımların Modellenmesi
- Elektrik Kısımların Modellenmesi

3.2 Mekanik Kısımların Modellenmesi

Aracın mekanik kısım modellenmesinde aracın boyuna, yanal ve düşey hareketleri incelenmiş, bu sayede taşıtın dinamik denklemleri oluşturulmuştur. Taşıt koordinat sistemi Şekil 3.2'deki gibidir.



Şekil 3.2 : SAE taşıt koordinat sistemi.

SAE taşıt koordinat sistemi aracın x, y ve z eksenlerindeki hareketlerini göstermektedir. SAE'ye göre araç koordinatları [4];

- x – aracın boyuna hareketini,
- y – aracın yan yönde hareketini,
- z – aracın düşey yönde hareketini

temsil etmektedir.

- p – yalpa hareketi aracın x ekseni etrafındaki hareketini,

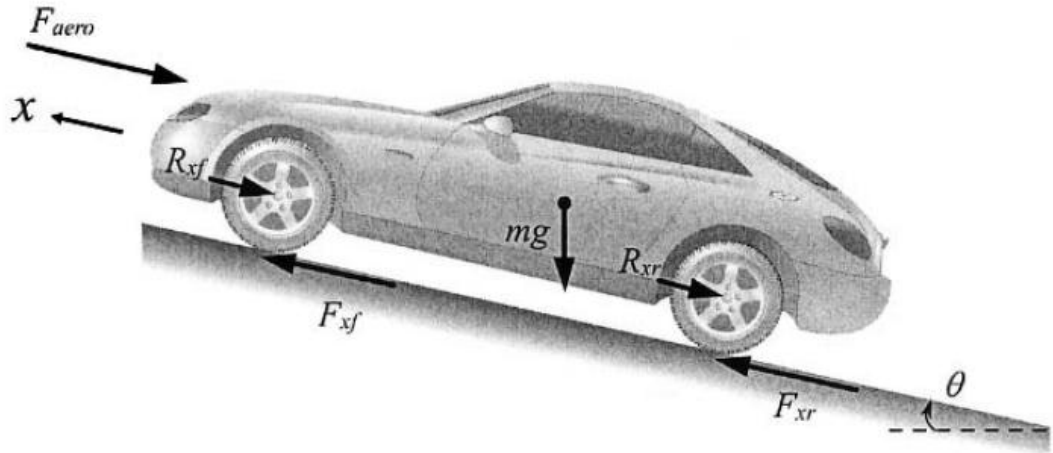
- q – kafa vurma aracın y eksenini etrafındaki hareketini,
- r – sapma hareketi aracın z eksenini etrafındaki hareketini temsil eder.

3.2.1 Bir taşıtın boyuna hareketi

Bir taşıtın boyuna yani x ekseninde hareket edebilmesi için motor gücü tarafından aşılması gereken seyir dirençleri vardır. Bu dirençlerin toplamı aracın hareketi için gerekli olan tahrik kuvvetini belirler. Taşıt üzerindeki kuvvetler;

- Hava Direnci
- Yuvarlanma Direnci
- Yokuş Direnci
- İvmelenme direnci
- Tekerlekten gelen boyuna tahrik kuvveti

olarak sıralanabilir. Taşıt üzerine etki eden kuvvetler Şekil 3.3'deki gibidir.



Şekil 3.3 : Taşıt üzerine etkiyen boyuna direnç kuvvetleri [2].

$$m\ddot{x} = F_{xf} + F_{xr} - F_{aero} - R_{xf} - R_{xr} - mg \sin \theta \quad (3.1)$$

Taşıt üzerindeki boyuna kuvvetler denklem (3.1)'deki gibidir. Denklem (3.1)'de;

F_{xf} , ön tekerleklerden gelen boyuna tahrik kuvvetini,

F_{xr} , arka tekerleklerden gelen boyuna tahrik kuvvetini,

F_{aero} , aerodinamik direnci,

R_{xf} , ön tekerleklerden gelen yuvarlanma direncini,

R_{xr} , ön tekerleklerden gelen yuvarlanma direncini,

$mg \sin \theta$, yokuş direncini,

$m\ddot{x}$, ivmelenme direncini göstermektedir.

3.2.1.1 Hava direnci

Cisimler akışkan içerisinde hareket ederken, hareket yönünün tersine dirençle karşılaşır. Havanın bir akışkan olduğu düşünülürse; araç hava içerisinde hareket ederken hava direnci ile karşılaşır. Hava direnci aracın aerodinamik yapısına, havanın yoğunluğuna, aracın hareket yönündeki dik kesit alanına ve aracın hızına bağlıdır [1].

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_d A (V + V_{rüzgar})^2 \quad (3.2)$$

Hava direnci kuvveti denklem (3.2)'deki gibidir. Denklem (3.2)'de;

ρ , havanın yoğunluğunu ,

C_d , rüzgar direnci katsayısını ,

A , aracın hareket yönündeki dik kesit alanı,

V , aracın hızını ,

$V_{rüzgar}$, rüzgar hızını ifade eder.

Hareket halindeyken araca etkiyen hava direnci aracın hızının karesi ile doğru orantılıdır. Hava direnci katsayısı aracın aerodinamik yapısına bağlıdır ve hesaplama yöntemi ile belirlenemez ancak rüzgar tüneline ölçülerek hesaplanabilir.

3.2.1.2 Yuvarlanma direnci

Yuvarlanma direnci tekerleklerin dönmesi esnasında yol ve lastiklerdeki şekil değişimlerinden kaynaklanır. Yuvarlanma direnci yol ile tekerleğin dört değişik durumu için farklı biçimde incelenir [1].

- Katı tekerlek – katı yol (demiryolu)
- Katı tekerlek – kendini değiştirebilen yol (toprak zeminde hareket eden at arabası)

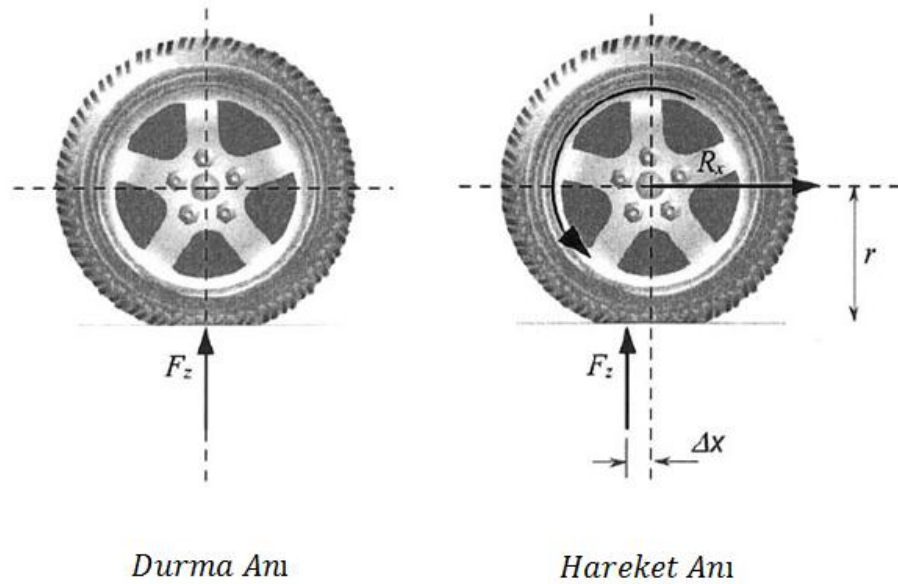
- Elastik tekerlek – katı yol (günümüzde binek araçların en çok karşılaştığı gibi)
- Elastik tekerlek – şekil değiştirebilen yol (off – road araç)

Araç modelimiz için günümüzdeki araçların en çok karşılaştığı elastik tekerlek – katı yol durumu ele alınacaktır. Sert zemindeki yuvarlanma direncinin oluşmasındaki ana etken, tekerleğin yuvarlanması sırasındaki lastiğin karkas yapısında oluşan şekil değişimidir. Başka bir deyişle lastiğin dönmesi için aktarılan enerjinin tamamı kullanılmaz.

Yuvarlanma direnci;

- lastiğin yapısına,
- yol şartlarına,
- taşıtın cinsine,
- aracın ivmelenmesine ve frenlemesine,
- lastiğin çalışma sıcaklığına göre değişim gösterir.

Şekil 3.4’de yuvarlanma direnci gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Yuvarlanma direnci [2].

$$R_x = \frac{\Delta x}{r} * F_z \quad (3.3)$$

Yuvarlanma direnci denklem (3.3)'deki gibidir. Denklem (3.3)'de;

r , tekerlek yarıçapını ,

Δx , kayma miktarını ,

F_z , taşıt ağırlığını ifade eder.

Denklem (3.3)'deki $\frac{\Delta x}{r}$ değerini;

$$\frac{\Delta x}{r} = f_r \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)'de olduğu gibi yuvarlanma direnci katsayısı olarak (f_r) ifade edebiliriz. Çizelge 3.1'de lastik tipi, yüzeye ve taşıt şekline göre yuvarlanma direnci katsayıları verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Yuvarlanma direnci katsayıları [1].

Lastik Tipi	Beton Yüzey	Sert Toprak Yüzey	Kum Yüzey
Binek Otomobil	0.015	0.08	0.30
Kamyon	0.010	0.06	0.25
Traktör	0.020	0.04	0.20

Denklem (3.3)'deki denklemi denklem (3.4)'deki ifadeyi kullanarak;

$$R_x = f_r mg \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)'deki gibi yuvarlanma direnci katsayısı ve kütle cinsinden yazılabilir.

Denklem (3.5)'de tüm taşıta etkiyen yuvarlanma direnci görülmektedir.

3.2.1.3 Yokuş direnci

Yokuş direnci; aracın eğimli yolda, araç ağırlığının paralel bileşeninden kaynaklanan dirençtir [1].

$$F_{yokuş} = mg \sin \theta \quad (3.6)$$

Yokuş direnci denklem (3.6)'daki gibi taşıt ağırlığı ve yokuş açısı cinsinden ifade edilir.

3.2.1.4 İvmelenme direnci

İvmelenme direnci aracın ivmelenmesi sırasında oluşan dirençlerdir. Araca etkiyen iki tip ivmelenme direnci vardır;

- Öteleme yapan kütlelerden kaynaklanan
- Dönen kütlelerden kaynaklanan

$$F_{ik} = m\ddot{x} \quad (3.7)$$

Öteleme yapan kütlelerden kaynaklanan ivmelenme direnci denklem (3.7)'deki gibidir.

$$F_{id} = \frac{\sum I \dot{\omega}}{r} \quad (3.8)$$

Dönen kütlelerden kaynaklanan ivmelenme direnci denklem (3.8)'deki gibidir. Denklem (3.8)'de;

$\sum I$, tahrik sistemindeki dönen kütlelerin tekerlek eksenine indirgenmiş atalet momentini,

ω , tekerlek açısal ivmesini,

r , aracın tekerlek çapını ifade eder.

Tekerleğin açısal ivmesi $\dot{\omega}$, denklem (3.9)'daki gibi öteleme ivmesi şeklinde yazılabilir.

$$\dot{\omega} = \frac{\ddot{x}}{r} \quad (3.9)$$

Denklem (3.9)'daki ifadeyi, denklem (3.8)'de yerine yazılırsa;

$$F_i = \left(m + \frac{\sum I}{r^2} \right) \ddot{x} \quad (3.10)$$

Denklem (3.10) elde edilmiş olur [1]. Dönen kütlelerin toplam atalet momenti denklem (3.11)'deki gibidir.

$$\sum I = I_{4t} + 2J_m \eta^2 \quad (3.11)$$

Denklem (3.11)'de;

I_{4t} , tekerleklerden gelen atalet momentini,

J , elektrik motorunun atalet momentini,

η , dişli oranını ifade eder.

$$\lambda = 1 + \frac{\sum I}{mr^2} \quad (3.12)$$

Denklem (3.12) dönen kütlelerin etki faktörünü göstermektedir. Taşıta etkiyen toplam ivmelenme direncini denklem (3.13)'deki gibi yazabiliriz.

$$F_i = m\ddot{x}\lambda \quad (3.13)$$

3.2.1.5 Tekerlekten gelen boyuna tahrik kuvveti

Tekerlekten gelen boyuna tahrik kuvveti yoldan tekerleklere etki eden sürtünme kuvveti olarak adlandırılır. Tekerleklerden üretilen boyuna tahrik kuvvetleri;

- Kayma oranı,
- Tekerlekteki dikey yük,
- Lastik ile yol arasında kalan yüzeyin sürtünme katsayısı,

parametrelerine bağlıdır.

Kayma oranı (σ_x) , taşıtın hızı (V_x) ile tekerleğinin hızı ($r\omega_t$) arasındaki farktır. Boyuna kayma denklem (3.14)'deki gibidir.

$$\sigma_x = r\omega_t - V_x \quad (3.14)$$

Kayma oranı [%] araç yavaşlarken, denklem (3.15)'deki gibi, hızlanırken denklem (3.16)'daki gibi olur.

$$\sigma_x = \frac{r\omega_t - V_x}{V_x} \times 100 \text{ [%]} \quad (3.15)$$

$$\sigma_x = \frac{r\omega_t - V_x}{r\omega_t} \times 100 \text{ [%]} \quad (3.16)$$

Denklem (3.15) ve denklem (3.16)'da;

r , aracın tekerlek yarıçapını,

ω_t , tekerleğin açısal hızını ifade eder.

Tekerlekteki dikey yük, tekerleğe düşen araç ağırlığından gelir ve yük değeri aracın ağırlık merkezinin yeri, aracın boyuna tahriği, rüzgar direnci ve yokuş direncinden

etkilenir. Tekerlekteki dikey yükler, taşıtın düşey yönde hareketi kısmında detaylı incelenecektir.

Tekerlekteki boyuna tahrik kuvveti ile lastik yol arasında kalan yüzeyin sürtünme katsayısı arasındaki ilişki denklem (3.17)'deki gibidir. Denklem (3.17)'den tekerlekten yola aktarılabilecek maksimum tahrik kuvveti hesaplanabilir.

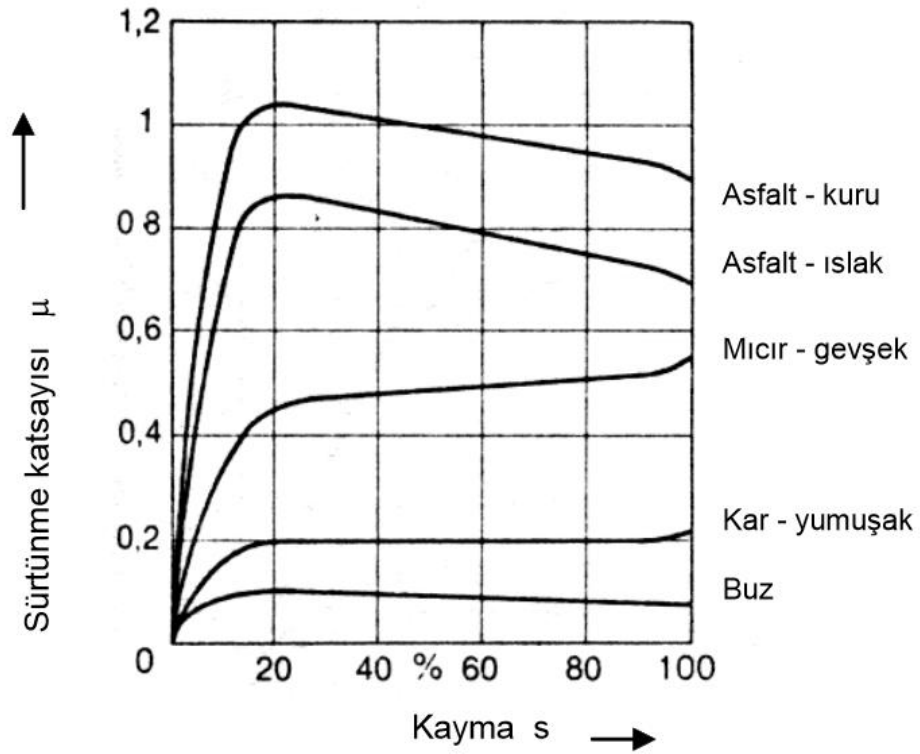
$$F_x = \mu W \quad (3.17)$$

Denklem (3.17)'de;

μ , lastik ile yol arasında kalan yüzeyin maksimum sürtünme katsayısını,

W , tekerleklere etkiyen ağırlığı ifade eder.

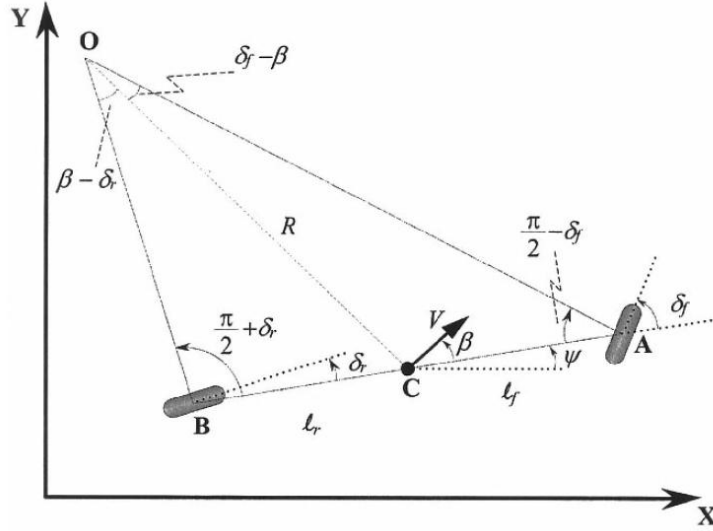
Sürtünme katsayısının farklı yol yüzeylerinde kaymaya bağlı olarak değişimi Şekil 3.5'deki gibidir.



Şekil 3.5 : Sürtünme katsayısının kaymaya bağlı olarak değişimi[1].

3.2.2 Bir taşıtın yatay yönde hareketi

Viraj anında taşıtın ön tekerlekleri kırıldığında, taşıtın arka tekerlekleri de az bir miktar döner. Viraj anında taşıt bir miktar savrulur. Taşıtın yatay yöndeki kinematikleri Şekil 3.6'daki gibidir.



Şekil 3.6 : Yatay yöndeki taşıt kinematikleri [2].

Şekil 3.6’da;

δ_f , ön tekerleğin dönüş açısını

δ_r , arka tekerleğin dönüş açısını

β , taşıtın boyuna hareket eksenine ile taşıtın hız vektörü arasında kalan açığı (yüzme açısını) ifade eder.

Üçgende benzerlik kullanılarak, taşıtın yüzme açısı denklem (3.18)’deki gibi bulunur.

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{l_f \tan \delta_r + l_r \tan \delta_f}{l_f + l_r} \right) \quad (3.18)$$

Denklem (3.18)’de;

l_f , aracın ağırlık merkezi ile ön aksı arasındaki mesafeyi

l_r , aracın ağırlık merkezi ile arka aksı arasındaki mesafeyi

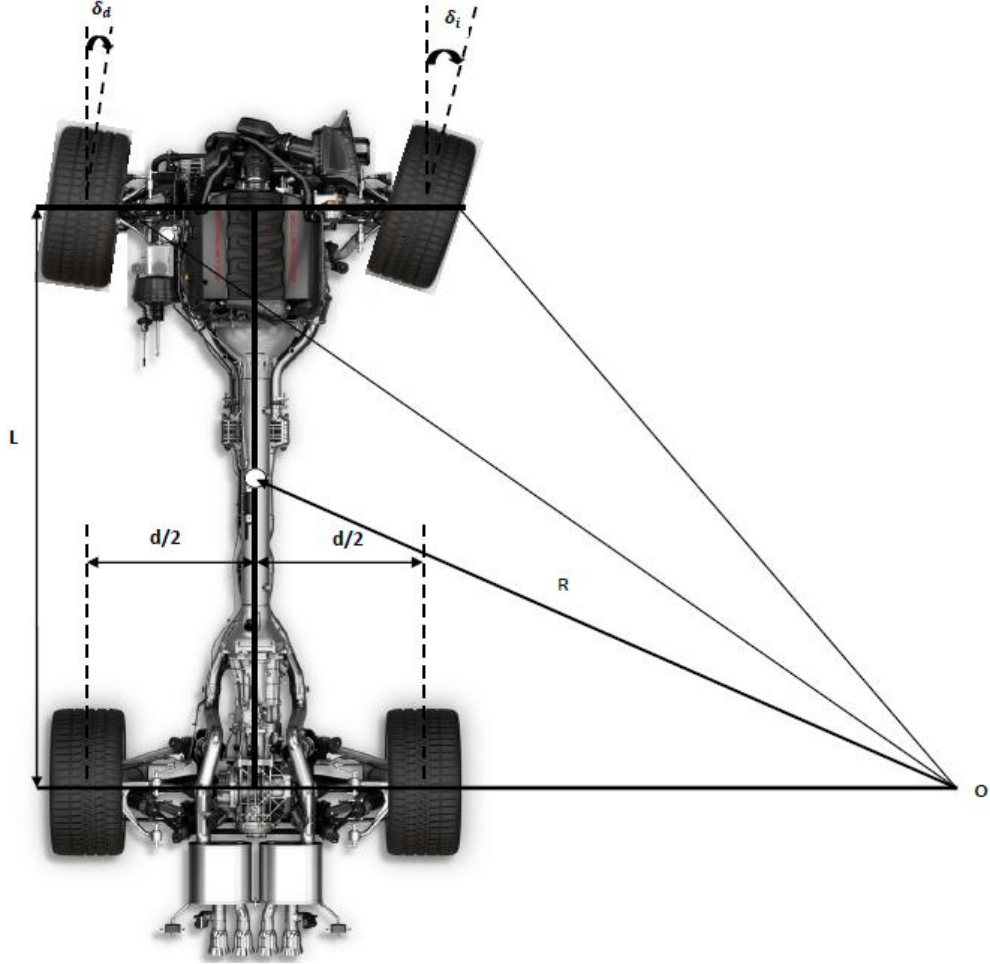
Aracın sapma oranı denklem (3.19)’daki gibidir.

$$\psi = \frac{V \cos \beta}{l_f + l_r} (\tan \delta_f - \tan \delta_r) \quad (3.19)$$

3.2.2.1 Düşük hızda viraj dönüşü

Düşük hızda viraj dönüşünde tekerlekler yanal kuvvetler üretmezler. Böylece tekerlekler kaymadan yuvarlanırlar. Bu duruma ideal dönüş geometrisi diğer adıyla

Ackermann Geometrisi adı verilir. Ackermann Geometrisinde tekerleklerin taradıkları yayların merkezi, yani ani dönme merkezinin çakışıktır. Diğer bir deyişle, ani dönme merkezinden tekerleklerin izdüşümüne gelen ışınların tekerlek izdüşümüne diktir. Ackermann geometrisi Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Ackermann geometrisi.

Ackermann geometrisinden ön tekerleklerin dönüş açıları; içteki tekerlek için denklem (3.20)’deki gibi, dış tekerlek için denklem (3.21)’deki gibidir. Ön tekerleklerin dönüş açılarının ortalamaları (δ) , denklem (3.22)’deki gibidir.

$$\tan(\delta_i) \equiv \frac{L}{R - \frac{d}{2}} \quad (3.20)$$

$$\tan(\delta_d) \equiv \frac{L}{R + \frac{d}{2}} \quad (3.21)$$

$$\delta = \frac{\delta_d + \delta_i}{2} \equiv L/R \quad (3.22)$$

Denklem (3.22)'deki δ , Ackermann Açısı olarak da adlandırılır.

3.2.2.2 Yüksek hızda viraj dönüşü

Yüksek hızda viraj dönüşü esnasında yanal ivme oluşur. Yanal ivme yüzünden tekerlekler yanal kuvvetler üretirler ve tekerleklerde kaymalar oluşur. Tekerlek kayma açısı Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Taşıta etkiyen y eksenindeki kuvvetler denklem (3.23)'deki gibidir.

$$ma_y = F_{yf} + F_{yr} \quad (3.23)$$

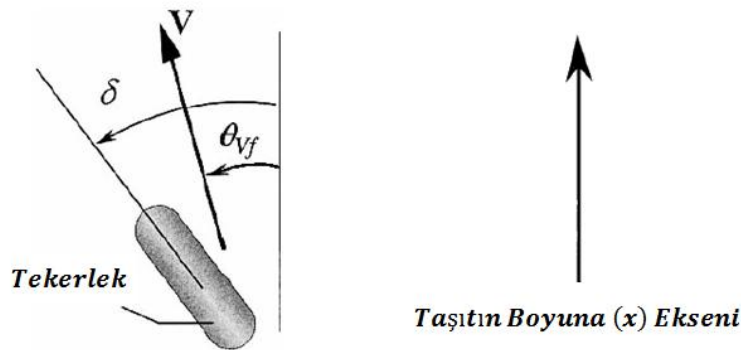
Denklem (3.23)'de;

m , taşıtın kütlesini,

a_y , yanal ivmeyi,

F_{yf} , ön tekerleklere etki eden yanal kuvveti,

F_{yr} , arka tekerleklere etki eden yanal kuvveti,



Şekil 3.8 : Tekerlek kayma açısı [2].

Ön tekerleklere etki eden yanal kuvveti (F_{yf}) denklem (3.24)'de, arka tekerleklere etkiyen yanal kuvvet (F_{yr}) denklem (3.25)'de gösterilmiştir.

$$F_{yf} = 2C_{\alpha f}\alpha_f = 2C_{\alpha f}(\delta - \theta_{Vf}) = 2C_{\alpha f}\left(\delta - \beta - \frac{l_f\dot{\psi}}{V}\right) \quad (3.24)$$

$$F_{yr} = 2C_{\alpha r}\alpha_r = 2C_{\alpha r}(-\theta_{Vr}) = 2C_{\alpha r}\left(-\beta + \frac{l_r\dot{\psi}}{V}\right) \quad (3.25)$$

Denklem (3.24) ve denklem (3.25)'de;

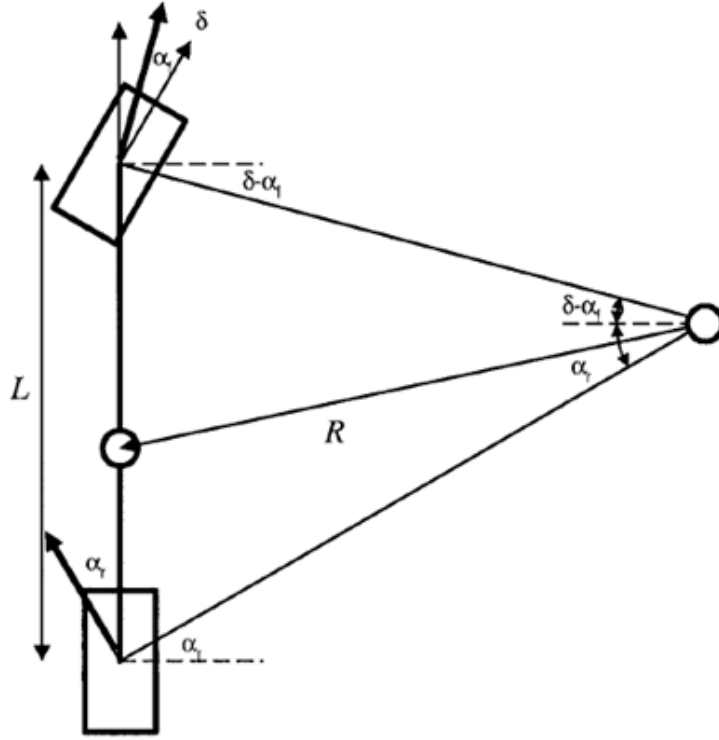
$C_{\alpha f}$, her bir ön tekerleğin çapraz hareket sertliğini,

C_{ar} , her bir arka tekerleğin çapraz hareket sertliğini,

δ , ön tekerlek dönüş açısını,

θ_{Vf} , ön tekerlek hız açısını,

θ_{Vr} , arka tekerlek hız açısını ifade eder.



Şekil 3.9 : Yüksek hızlarda direksiyon açısı [2].

Şekil 3.9’da yüksek hızda viraj dönüşünde ön tekerleklerin dönme açısı (δ) denklem (3.26)’daki gibidir.

$$\delta = \frac{L}{R} + \alpha_f - \alpha_r \quad (3.26)$$

Denklem (3.26)’da;

α_f , ön tekerleklerdeki çapraz hareket açısını,

α_r , arka tekerleklerdeki çapraz hareket açısını ifade eder.

Ön tekerleklerdeki çapraz hareket açısı (α_f) denklem (3.27)’de, arka tekerlekteki çapraz hareket açısı (α_r) denklem (3.28)’de gösterilmiştir.

$$\alpha_f = \frac{m_f}{2C_{\alpha_f}} \frac{V^2}{R} \quad (3.27)$$

$$\alpha_r = \frac{m_r}{2C_{ar}} \frac{V^2}{R} \quad (3.28)$$

Denklem (3.27) ve denklem (3.28)'de;

m_f , taşıtın ön aksının taşıdığı taşıt kütleini,

m_r , taşıtın arka aksının taşıdığı taşıt kütleini ifade eder.

Taşıtın ön aksının taşıdığı taşıt kütlesi (m_f) denklem (3.29)'daki gibi, arka aksının taşıdığı taşıt kütlesi (m_r) denklem (3.30)'daki gibidir.

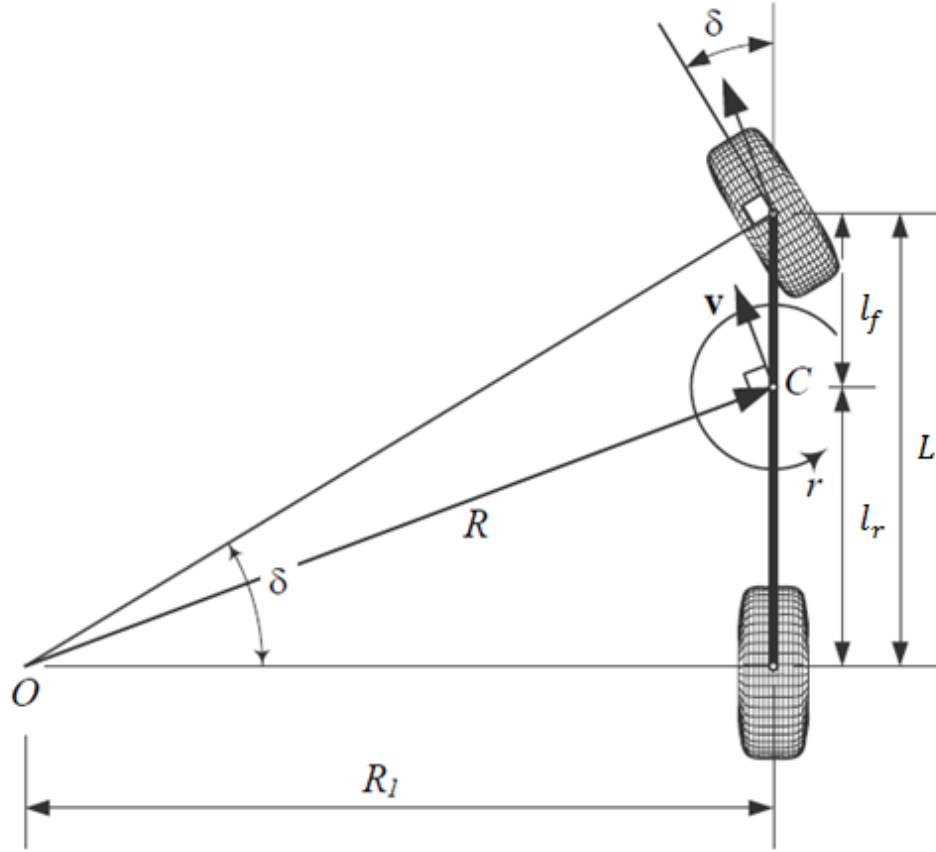
$$m_f = \frac{l_r}{L} \quad (3.29)$$

$$m_r = \frac{l_f}{L} \quad (3.30)$$

Yüksek hızda viraj esnasında araca yanal eksende etkiyen kuvvetlerin toplamı merkezkaç kuvveti eşittir. Denklem (3.23)'deki toplam yanal kuvveti denklem (3.31)'deki gibi merkezkaç kuvvetine eşit olarak yazabiliriz.

$$ma_y = F_{yf} + F_{yr} = \frac{mV^2}{R} \quad (3.31)$$

Viraj anında taşıta etkiyen toplam yanal kuvvetin hesaplanması için virajın yarıçapının bilinmesi gerekmektedir. Eğer taşıtın arka aksının dönemeçlerde dönmeyip sabit duracağı varsayımı yapıldığında, Şekil 3.10'daki arka tekerlek sabit bisiklet modelini kullanabiliriz.



Şekil 3.10 : Sadece ön tekerleği dönen bisiklet modeli [3].

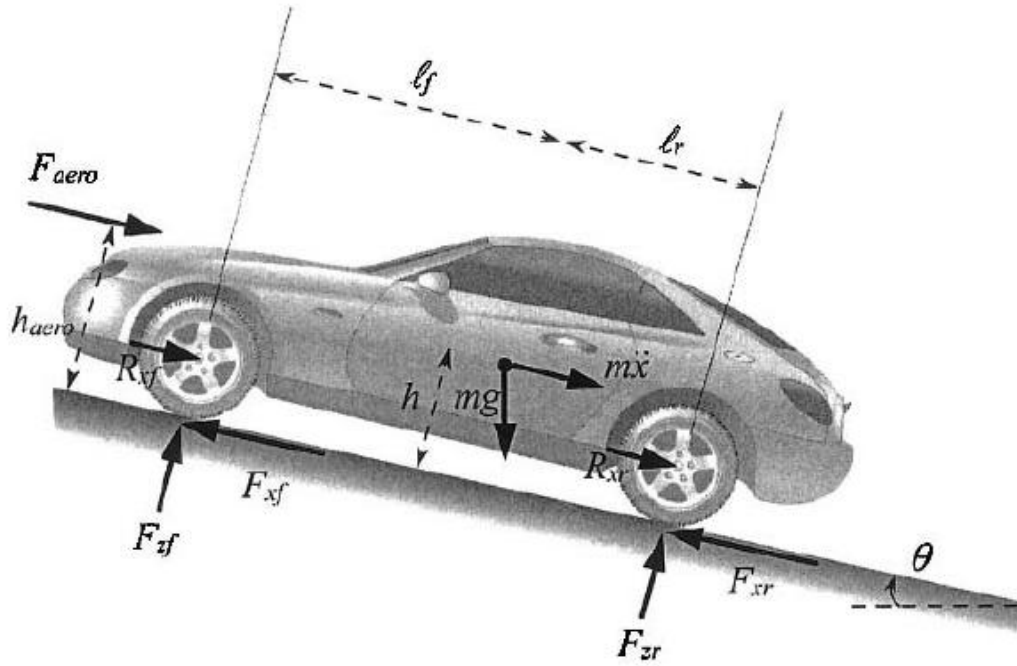
Şekil 3.10'daki viraj yarı çapını, denklem (3.32)'deki gibi ifade edebiliriz.

$$R = \sqrt{l_r^2 + L^2 \cot^2 \delta} \quad (3.32)$$

Denklem (3.32)'yi kullanarak, viraj anındaki toplam yanal kuvveti merkezkaç kuvveti formülünden hesaplayabiliriz.

3.2.3 Bir taşıtın düşey yöndeki hareketi

Bu bölümde taşıtın düşey yöndeki hareketi, taşıtın hızlanma, yavaşlama ve viraj alma esnasında ön ve arka aksa etki eden değişken yükler cinsinden incelenmiştir.



Şekil 3.11 : Taşıt üzerindeki kuvvetler [2].

Şekil 3.11’de taşıtın üzerindeki kuvvetler görülmektedir. Şekil 3.11’de;

F_{zf} , ön aksa etki eden taşıt ağırlığını ,

F_{zr} , arka aksa etki eden taşıt ağırlığını ,

h , taşıtın ağırlık merkezinin yerden yüksekliğini ,

h_{aero} , aerodinamik direncin taşıta etki ettiği noktanın yerden yüksekliğini ,

l_f , ön aks ile ağırlık merkezinin arasındaki uzaklığı ,

l_r , arka aks ile ağırlık merkezinin arasındaki uzaklığı ,

r , taşıtın lastik yarı çapını ifade eder.

Arka tekerleğin yere temas ettiği noktadan moment alındığında, denklem (3.33) elde edilir.

$$F_{zf}(l_f + l_r) + F_{aero}h_{aero} + m\ddot{x}h + mgh \sin \theta - mgl_r \cos \theta = 0 \quad (3.33)$$

Denklem (3.33)’den F_{zf} çekilirse, denklem (3.34) elde edilir. Bu sayede ön aksa etki eden taşıt ağırlığı bulunur.

$$F_{zf} = \frac{-F_{aero}h_{aero} - m\ddot{x}h - mgh \sin \theta + mgl_r \cos \theta}{l_f + l_r} \quad (3.34)$$

F_x , akstaki tahrik kuvvetini ,

r , tekerlek yarıçapını ,

η , dişli oranını ,

$K_{\phi f}$, ön süspansiyonun yalpa sertliğini ,

K_{ϕ} , süspansiyonun yalpa sertliğini ifade eder.

Denklem (3.46) kullanılarak taşıtın viraj anında sağ ve sol tekerleklerine binen yükler hesaplanabilir.

3.2.4 Aracın hareketi için gerekli koşullar

Taşıta etkiyen kuvvetler denklem (3.38)'deki gibidir.

$$m\ddot{x}\lambda = F_{xf} + F_{xr} - F_{aero} - R_{xf} - R_{xr} - mg \sin \theta \quad (3.38)$$

Denklem (3.38)'den tahrik kuvvetlerini çektiğimizde denklem (3.39) elde edilir.

$$F_{xf} + F_{xr} = F_T = F_{aero} + R_{xr} + mg \sin \theta + m\ddot{x}\lambda \quad (3.39)$$

Aracın tahrik tipine göre araç önden yada arkadan tahrikli olabilir. Tahrik tipine göre yuvarlanma dirençleri farklılık gösterir. Bunun için tekerlek dinamik yüklerinin hesaplanması gerekmektedir.

Bir taşıtın düşey yöndeki hareketi bölümünde moment alarak bulduğumuz denklem (3.34) ve denklem (3.36)'ya göre, taşıtın ön aksına etkiyen kuvvet denklem (3.34)'deki gibi, arka aksına etki eden kuvvet denklem (3.36)'daki gibidir.

$$F_{zf} = \frac{-F_{aero}h_{aero} - m\ddot{x}h - mgh \sin \theta + mgl_r \cos \theta}{l_f + l_r} \quad (3.34)$$

$$F_{zr} = \frac{F_{aero}h_{aero} + m\ddot{x}h + mgh \sin \theta + mgl_r \cos \theta}{l_f + l_r} \quad (3.36)$$

Aracın ön akstan tahrik edilmesi durumunda, arka tekerleklere sadece yuvarlanma direnci teğetsel kuvvet olarak etki eder [1]. Bu durumda denklem (3.39), denklem (3.40)'daki gibi olur.

$$F_{xf} = F_{aero} + f_r F_{zr} + mg \sin \theta + m\ddot{x}\lambda \quad (3.40)$$

$$\frac{F_{xf}}{F_{zf}} \leq \mu$$

Eğer araç projedeki gibi arka akstan tahrik edilyorsa, bu durumda ön tekerleklerle sadece yuvarlanma direnci teğetsel kuvvet olarak etki eder [1] ve Bu durumda denklem (3.39), denklem (3.41)'deki gibi olur.

$$F_{xr} = F_{aero} + f_r F_{zf} + mg \sin \theta + m\ddot{x}\lambda \quad (3.41)$$

$$\frac{F_{xr}}{F_{zr}} \leq \mu$$

Aracın hareket edebilmesi için; tekerleklerden gelen boyuna tahrik kuvvetinin, direnç kuvvetleri ve ivmelenmeden oluşan kayıpların toplamında oluşan kuvvetleri karşılaması gerekmektedir.

3.2.5 Tekerlek modeli

Tekerlekten gelen tahrik kuvveti tekerlek modelleri kullanılarak modellenir. Lastik modelleri pnömatik tekerleğin diagonal hareketinin modellenmesi için oluşturulmuştur. Tekerleğin diagonal hareketinin modellenmesi için pek çok lastik modeli oluşturulmuştur. Bunlardan en önemli olanları;

- PacejkaTekerlek Modeli
- HSRI Tekerlek Modeli
- Dugoff Tekerlek Modeli
- FTire Tekerlek Modeli

olarak gösterilebilir.

Tekerlek modeli kullanılarak taşıtın lastiğinin boyuna ve yanal hareketleri incelenebilir. Pacejka Tekerlek Modeli günümüzde en çok tercih edilen lastik modellerinin başında gelir. Pacejka tekerlek modelinin genel formülü denklem (3.42)'deki gibidir [23].

$$F = D \sin\left(C \tan^{-1}\left(Bx1 - E(Bx1 - \tan^{-1}(Bx1))\right)\right) + V \quad (3.42)$$

Denklem (3.42)'deki formül parametrelerin hesaplandığı parametrelerin değişimi ile hem boyuna hemde yanal kuvvetin hesaplanmasına yarar. Boyuna kuvvet hesaplanırken b0'dan b13'e kadar 14 farklı parametre kullanılırken, yanal kuvvet hesaplanırken a0'dan a17'ye kadar 18 parametre kullanılır.

Denklem (3.42)'de;

C , kesit faktörünü,

D , tepe faktörünü,

BCD , sertliği,

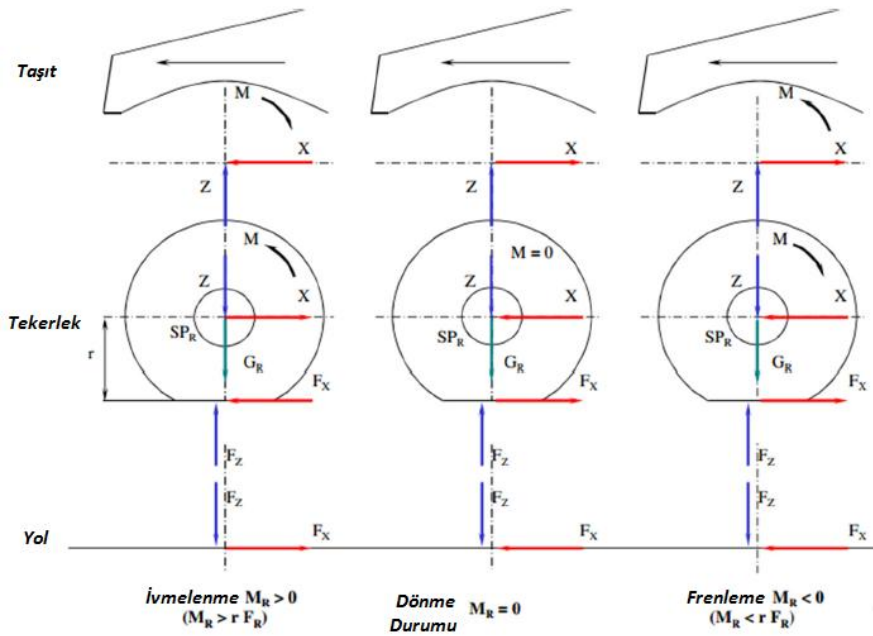
B , sertlik faktörünü,

E , bükülme faktörünü,

H , yatay kaymayı,

V , dikey kaymayı,

$Bx1$, kompoziti ifade eder.



Şekil 3.13 : Dönen tekerleğin dinamik davranışları [19].

Şekil 3.13’de dönen tekerleğin ivmelenme, sabit hız (dönme durumu) ve frenleme durumlarındaki dinamik davranışları görülmektedir.

Tekerleğin dönüş hızı denklem (3.43) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\dot{\omega} = \frac{M_{net} - R_x r}{J_{t,m}} \quad (3.43)$$

Denklem (3.43)’deki M_{net} momenti denklem (3.44)’deki gibi yazılabilir.

$$M_{net} = (M_{ivmelenme} - M_{frenleme}) - F_x r \quad (3.44)$$

Denklem (3.43) kullanılarak tekerlekteki boyuna kaymalar, tekerlekteki boyuna takrih kuvveti bölümünde bahsedilen denklem (3.15) ve denklem (3.16) kullanılarak bulunur.

$$\sigma_x = \frac{r\omega_t - V_x}{V_x} \times 100 [\%] \quad (3.15)$$

$$\sigma_x = \frac{r\omega_t - V_x}{r\omega_t} \times 100 [\%] \quad (3.16)$$

Tekerlekteki yanal kaymalar, yüksek hızda viraj dönüşünde bahsedilen denklem (3.25) kullanılarak elde edilir.

$$F_{yr} = 2C_{ar}\alpha_r = 2C_{ar}(-\theta_{vr}) = 2C_{ar}\left(-\beta + \frac{l_r\dot{\psi}}{V}\right) \quad (3.25)$$

Denklem (3.25)'den α_r değeri çekilerek, denklem (3.45) elde edilir.

$$\alpha_r = \left(-\beta + \frac{l_r\dot{\psi}}{V}\right) \quad (3.45)$$

Denklem (3.15) ve denklem (3.16) kullanılarak tekerlekteki boyuna kaymalar, denklem (3.45) kullanılarak viraj anında arka tekerlekteki yanal kaymalar hesaplanır. Hesaplanan değerler kullanılarak pacejka tekerlek modeli için gerekli S değeri bulunmuş olur.

Tezde simülasyonda tekerlek modeli kullanılmamış, tekerlekteki tahrik kuvveti motorlar tarafından oluşturulmuştur.

3.2.6 Dişli kutusu

Elektrik motorunun ürettiği tork aracın belirli hızlara ulaşması için gereken torku karşılayamamaktadır. Bu yüzden motorun rotoru ile tekerleklerinin arasına dişli kutusu yerleştirme gereksinimi vardır. Dişli kutusu farklı diş sayısına sahip dişilerden oluşmaktadır.

$$\text{Dişli Oranı} = \frac{\text{Hareketi alan dişlinin diş sayısı}}{\text{Hareketi veren dişlinin diş sayısı}} \quad (3.46)$$

Denklem (3.46)'da görülen dişli oranı sayesinde hareketi veren dişli ile hareketi alan dişli farklı hızda döner. Bu sayede motorun devir sayısı azaltılırken, aynı oranda motor torku arttırılmış olur ve taşıtın belirli hızlara ulaşması için gerekli döndürme momenti sağlanmış olur. Şekil 3.14'de örnek dişli şekli görülmektedir.

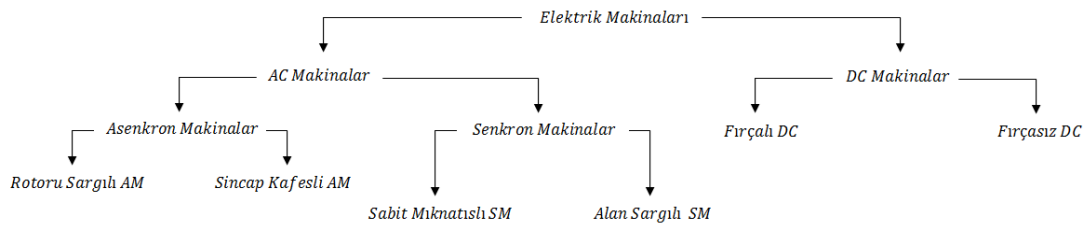


Şekil 3.14 : Örnek dişli [24].

3.3 Elektrik Kısımların Modellenmesi

3.3.1 Elektrik makinaları

Elektrik makinaları elektrik enerjisini mekanik enerjiye aynı zamanda mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirebilen makinalardır. Elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirdikleri durumda elektrik motoru olarak, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirdikleri durumda ise jenaratör olarak adlandırılırlar. Elektrik makinaları rotor ve stator olarak adlandırılan iki kısımdan oluşurlar. Makinanın dönen kısmı rotor, dönmeyen (sabit) kısmı ise stator olarak adlandırılır. Elektrik makinaları beslendikleri kaynağa göre Doğru Akım Makinası ve Alternatif Akım Makinası olarak ikiye ayrılırlar. Elektrik Makina çeşitleri genel olarak Şekil 3.15’deki gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 3.15 : Elektrik makina çeşitleri.

Doğru akım motorları DC kaynaktan beslenen motorlardır. Fırçalı DC motorlarda moment ve manyetik akı birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilir. Bu sayede kontrolleri kolaydır.

Alternatif akım motorları AC kaynaktan beslenen motorlardır. AC motorlarda moment ve manyetik akı birbirine bağımlı nonlinear denklemler ile ifade edilir. Bu yüzden kontrolleri DC motorlarda olduğu gibi kolaylıkla yapılamaz. Kontrolleri için vektör kontrol yöntemleri geliştirilmiştir.

Alternatif akım motorları, stator sargılarında oluşan manyetik alanın dönme hızı ile rotorun dönme hızı arasındaki ilişkiye göre ikiye ayrılırlar. Stator sargılarında oluşan manyetik alanın dönme hızı ile rotorun dönme hızının farklı olduğu durumda asenkron motor olarak, eşit olduğu durumda ise senkron motor olarak adlandırılırlar.

Asenkron motorlar tek fazlı yada üç fazlı olarak üretilebilirler. Üç fazlı Asenkron Motorlarda, stator sargılarına gerilim verildiğinde makinada döner manyetik alan oluşur ve oluşan manyetik alan senkron hızda döner. Oluşan manyetik alan sayesinde rotor iletkenlerinde gerilim indüklenir ve daha sonra rotor dönmeye başlar. Rotorun hızı senkron hızdan yavaştır ve hiçbir zaman senkron hıza ulaşamaz. Asenkron motorlar çalışma sırasında ark yapmazlar, yük altında devir sayıları az değişir, sağlam ve ucuzdurlar. Bu özellikleri sayesinde sanayide en çok tercih edilen motor çeşididir. Asenkron motorlar çok farklı güçlerde ve büyüklüklerde üretilebilirler. [25]

Senkron motorlarda manyetik alan hızı ile rotor hızı aynıdır ve motor yükü değiştiği durumlarda devir sayısı sabit kalır. Senkron motorlar asenkron yada doğru akım makinaları gibi doğrudan kalkamazlar. Bu yüzden yol verme yöntemleri kullanılır. Yardımcı motor kullanarak yol verme, senkron motorlara asenkron yol verme ve frekans değiştirerek yol verme olmak üzere üç farklı şekilde motor kaldırılabilir. Senkron motorlar genellikle sabit hızın gerekli olduğu tüm endüstriyel uygulamalarda kullanılırlar. [26]

Sabit Mıknatıslı Senkron Motor (SMSM) ile Fırçasız DC Motor (FDCM) aynı yapıya sahiptirler. Stator sargısındaki indüklenen gerilim dalga şekline göre farklılık gösterirler. SMSM’lerde dalga şekli sinüsoidal, FDCM’lerde ise trapezoidaldir.

3.3.2 Sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM)

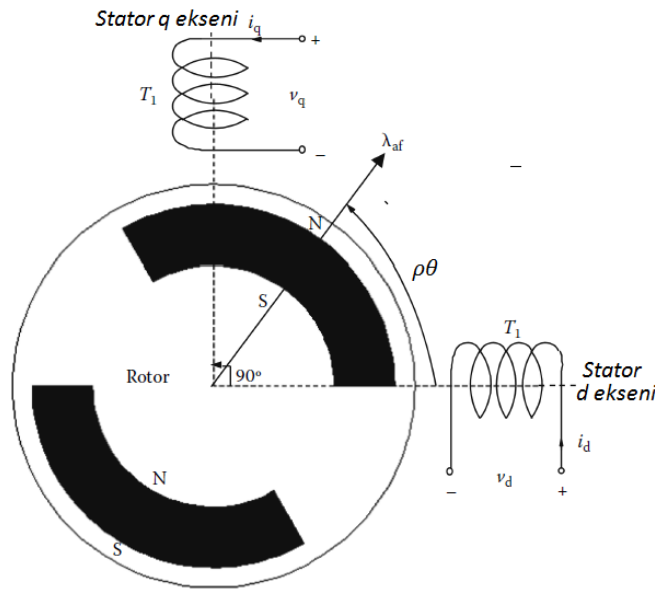
SMSM’lerin rotorlarına senkron motorlardan farklı olarak sabit mıknatıslar yerleştirilmiştir. Hava boşluğundaki manyetik alan rotora yerleştirilen sabit mıknatıslar tarafından oluşturulur. SMSM’ler statorda elektriksel olarak oluşan akı ile sabit mıknatısların oluşturduğu sürekli alan akısının etkisi altında, çift uyarımlıdır.

Sabit mıknatıs özelliği sayesinde elektrik makinası güç azalmadan daha küçük boyutlarda ve daha verimli tasarlanabilir. Rotorunda akım yoktur bu özelliğinden ötürü rotorunda bakır kayıpları oluşmaz. Sabit mıknatısların bulunması fırça ve bileziklerin bulunmaması bakım maliyetini azaltır. Kontrolleri normal senkron

motorlara göre daha zordur bunun sebebi SMSM'lerde bulunan sabit mıknatıslardır. Sabit mıknatıslar sürekli alan akısı üretirler bu yüzden rotor akımını değiştirmek için alan zayıflatma ve kuvvetlendirme yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir [27].

3.3.3 SMSM motor modeli

SMSM'nin dinamik modelinde iki fazlı motor modeli baz alınmıştır. Dinamik model iki fazlı motorun statorundaki d (direct) ve q (quadrature) eksenleri kullanılarak elde edilmiştir. İki fazlı SMSM modeli Şekil 3.16'da görülmektedir.



Şekil 3.16 : İki fazlı SMSM modeli [5].

Şekil 3.16'daki çizim tek kutup çifti için çizilmiştir ancak çeşitli kutup çifti sayıları içinde uygulanabilir. Şekil 3.16'daki q ve d eksenini rotor hareket ettiğinde saatin tersi yöne dönmektedir. Şekil 3.17'de rotorun dönüş durumundaki d – q eksenini ile, sabit durumdaki d – q eksenini gösterilmiştir.

Şekil 3.16'da;

$V_d - V_q$, d ve q eksenlerindeki gerilimleri ,

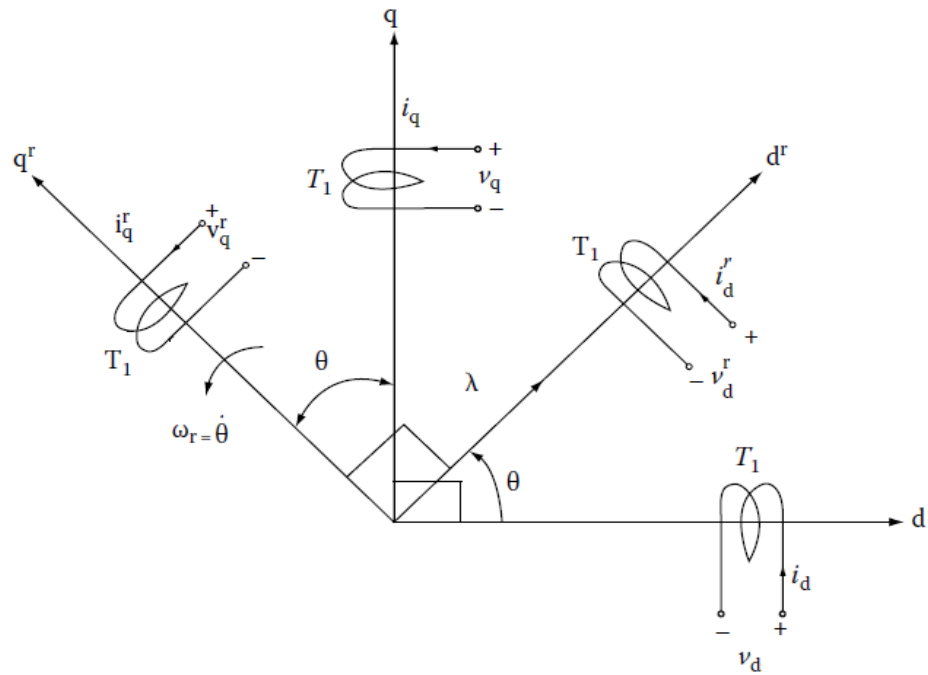
$i_d - i_q$, d ve q eksenlerindeki akımları ,

$\rho\theta$, rotorun elektriksel açısını ,

θ , rotorun açısını ,

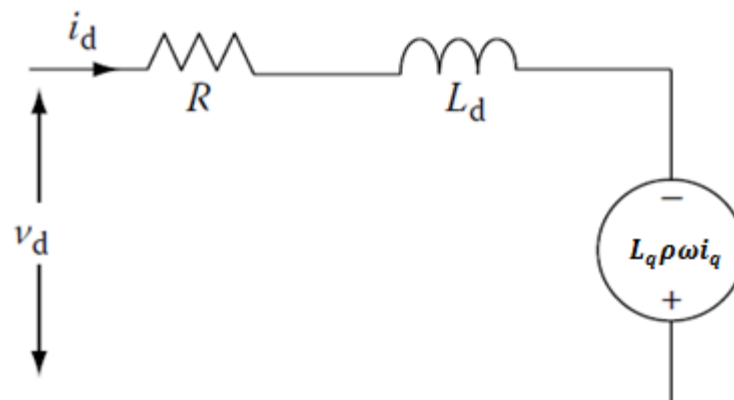
$\rho\omega$, rotorun elektriksel hızını ,

Rotorun elektriksel hızı (ω_r); rotor hızının (ω_m), kutup çifti sayısı (ρ) ile çarpımına eşittir.



Şekil 3.17 : Sabit durumdaki ve rotorun dönüş durumundaki d – q eksenleri [5].

Rotorun dönüş durumunda d ekseninin eşdeğer devresi Şekil 3.17'deki gibi çizilebilir.



Şekil 3.18 : d ekseni eşdeğer devresi [5].

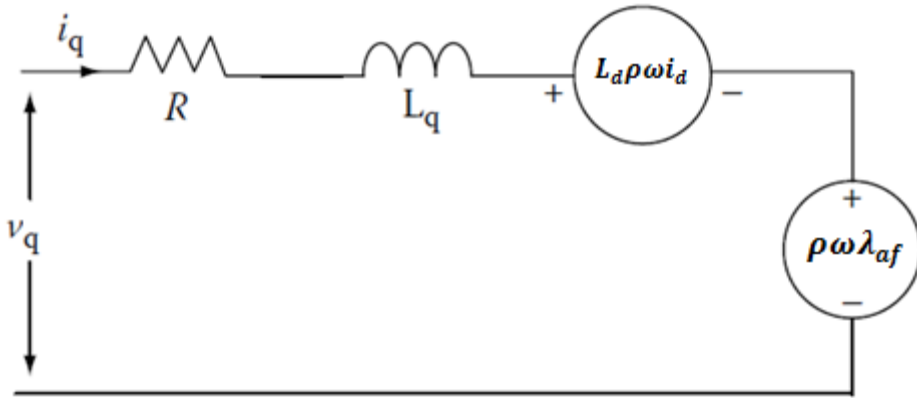
Şekil 3.18'deki devrede Kirchhoff Voltaj Kuralı (KVL) yazılırsa denklem (3.47) elde edilir.

$$V_d = Ri_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - L_q \rho \omega i_q \quad (3.47)$$

Denklem (3.47)'den i_d akımı çekilirse denklem (3.48) elde edilir.

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} V_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} \rho \omega i_q \quad (3.48)$$

Rotorun dönüş durumunda q ekseninin eşdeğer devresi Şekil 3.19'daki gibidir.



Şekil 3.19 : q eksenini eşdeğer devresi [5].

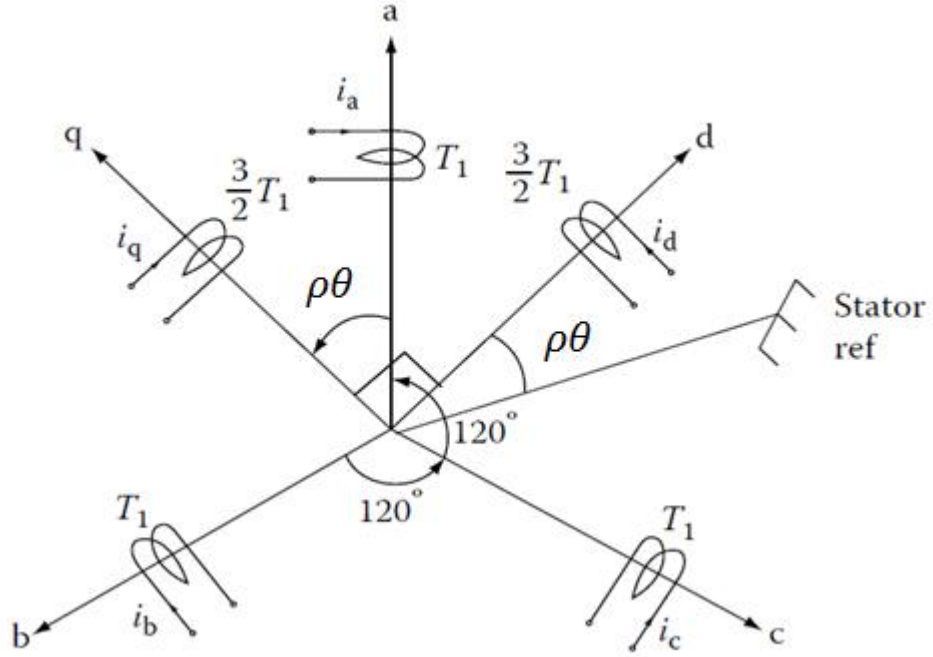
Şekil 3.19'daki devrede Kirchhoff Voltaj Kuralı (KVL) yazılırsa denklem (3.49) elde edilir.

$$V_q = Ri_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + L_d \rho \omega i_d + \lambda_{af} \rho \omega \quad (3.49)$$

Denklem (3.49)'dan i_q akımı çekilirse denklem (3.50) elde edilir.

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} V_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} \rho \omega i_d - \frac{\lambda_{af} \rho \omega}{L_q} \quad (3.50)$$

İki fazlı motor modelinin kullanılabilmesi için eviriciden gelen 3 fazın abc – dq dönüşümü ile 2 faza dönüştürülmesi gerekmektedir.



Şekil 3.20 : İki ve üç fazlı stator sarımları [5].

Şekil 3.20’de iki ve üç fazlı stator sarımları görülmektedir. Üç fazlı sarımlarının her birinin T_1 sürede döndüğünü ve akım büyüklüklerinin eşit olduğunu farz edersek, iki fazlı sarımlar $2T_1/3$ sürede döner. abc – dq dönüşümü denklem (3.51)’deki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\rho\theta) & \cos\left(\rho\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\rho\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\rho\theta) & \sin\left(\rho\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\rho\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

dq – abc dönüşümü yapılırken denklem (3.52) kullanılır.

$$i_{abc} = [T_{abc}]^{-1} i_{qdo} \quad (3.52)$$

Denklem (3.52)’deki T_{abc} değeri denklem (3.53)’deki gibidir.

$$T_{abc} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\rho\theta) & \cos\left(\rho\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\rho\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\rho\theta) & \sin\left(\rho\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\rho\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Denklem (3.53)’ü denklem (3.52)’de yerine yazarsak; dq – abc dönüşümü denklem (3.54)’deki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\rho\theta) & \sin(\rho\theta) & 1 \\ \cos\left(\rho\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\rho\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\rho\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\rho\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

Elektromanyetik tork motorun en önemli çıkış değişkenidir. SMSM’lerde elektromanyetik tork denklem (3.55)’deki gibidir.

$$T_e = \frac{3}{2} \rho [\lambda_{af} + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad (3.55)$$

Denklem (3.55)’deki $3/2$ değeri, üç fazlı ve iki fazlı SMSM’lerin kuvvet eşitliği durumundan gelir. Denklem (3.55)’deki ρ , kutup çifti sayısı anlamına gelmektedir.

Motorun dinamik denklemi denklem (3.56)’daki gibidir [5].

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{1}{J} (T_e - B\omega - T_l) \quad (3.56)$$

Denklem (3.56)’da;

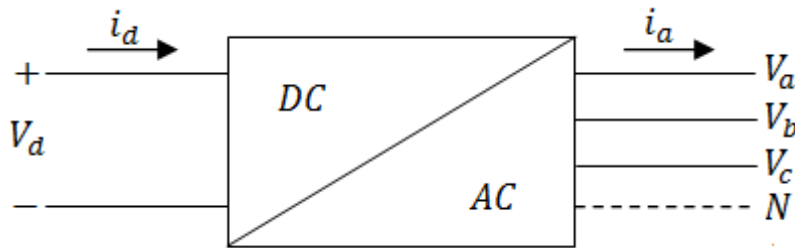
J , motorun atalet momentini,

B , motorun sürtünme katsayısını,

T_l , motor yükünü sembolize eder.

3.3.4 Motor sürücünün modellenmesi

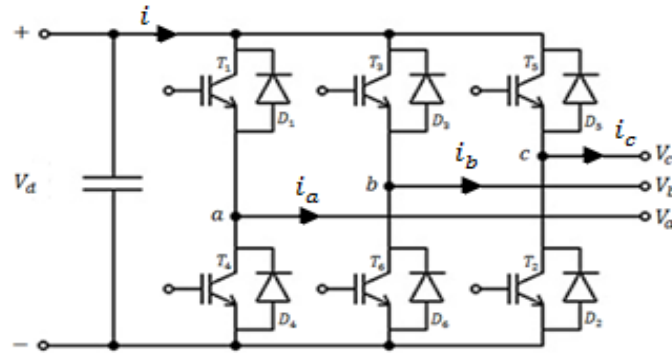
Araçta kullanılan motorun kontrolü için bataryalardan gelen doğru akımı, alternatif akıma çevirmek için DC-AC dönüştürücü diğer adıyla Evirici kullanılması gerekmektedir. Eviriciler genellikle AC Motor Kontrolü, kesintisiz güç kaynakları, anahtarlama güç kaynakları vb. uygulamalarda kullanılmaktadır. Şekil 3.21’de eviricilerin temel blok şeması görülmektedir.



Şekil 3.21 : Eviricilerin temel blok şeması [7].

Eviriciler uygulamalara göre tek fazlı veya üç fazlı olabilirler. Beslemeleri gerilim kaynaklı yada akım kaynaklı olabilir. Kare dalga, Kısmi Kare Dalga ve Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) olmak üzere üç farklı anahtarlama yöntemi ile kontrol edilebilirler.

Eviricilerin çalışma prensibi, DC giriş geriliminin ilk yarı periyotta pozitif ve ikinci yarı periyotta negatif yönde yüke uygulanmasına dayanır. Devrenin çalışma periyodu, bu iki yarı periyodun toplamı tarafından belirlenir. Eviricilerde çalışma yarı iletken elemanlarla sağlanır. MOSFET ve IGBT eviricilerde çok kullanılan yarı iletken elemanlardır. Yüksek güç ve frekanslarda IGBT tercih edilirken, daha düşük güçlerde (10kW altında) MOSFET tercih edilmektedir [7]. Şekil 3.22’de üç fazlı tam köprü evricinin temel devre şeması görülmektedir.



Şekil 3.22 : Üç fazlı tam köprü eviricinin temel devre şeması.

Şekil 3.22’deki üç fazlı tam köprü eviricide dc kaynaktan gelen V_d gelimi ile V_a , V_b , V_c faz gelirimleri arasındaki ilişki denklem (3.57)’deki gibi yazılabilir [20].

$$[V_a \ V_b \ V_c]^T = [T_A \ T_B \ T_C]^T V_d \quad (3.57)$$

T_A, T_B, T_C değerleri denklem (3.58)’deki gibi S_a, S_b, S_c anahtar durum fonksiyonları cinsinden yazılır.

$$\begin{bmatrix} T_A \\ T_B \\ T_C \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Giriş akımı i ile i_a, i_b, i_c faz akımları arasındaki ilişki denklem (3.59)’daki gibidir.

$$i = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (3.59)$$

S_a, S_b, S_c anahtar durum fonksiyonları denklem (3.60)’dan hesaplanır.

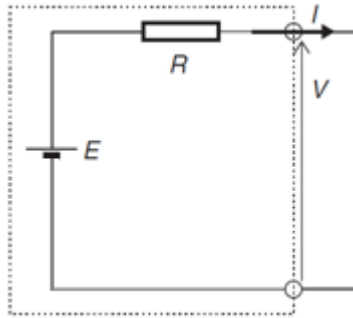
$$\begin{aligned}
S_a(\omega_s t) &= \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} A_k \sin k\omega_s t \\
S_b(\omega_s t) &= \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} A_k \sin \left(k\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) \\
S_c(\omega_s t) &= \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} A_k \sin \left(k\omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right)
\end{aligned} \tag{3.60}$$

Simulasyon için evirci tasarlanmamış, Matlab/Simulink programındaki Universal Bridge bloğu kullanılmıştır.

3.3.5 Bataryanın modellenmesi

Projedeki araç %100 elektrikli olduğu için taşıt hareketi için gerekli tüm enerji bataryalar tarafından sağlanmaktadır. Araçtaki bataryalar taşıtın menzilini belirlemektedir bu yüzden bataryalar elektrikli taşıtlar için en önemli komponentlerden biridir.

Batarya iki yada daha fazla kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren elektrik hücrelerinin birbirine bağlanması ile oluşur. Elektrik hücreleri elektrolitte pozitif ve negatif elektrodlar içerir. Elektrodlar ve elektrolit arasındaki kimyasal reaksiyonlar sayesinde DC elektrik üretilir. [21]



Şekil 3.23 : Batarya eşdeğer devresi [21].

$$V = E - IR \tag{3.61}$$

Şekil 3.23’de Batarya eşdeğer devresi görülmektedir. Şekil 3.23’deki devrede Kirchhoff Voltaj Kuralı (KVL) yazılırsa denklem (3.61) elde edilir. Denklem (3.61)’de;

V , terminal gerilimini ,

E , bataryanın sabit voltajını ,

R , bataryanın iç direncini ,

I , bataryadan akan akımı ifade eder.

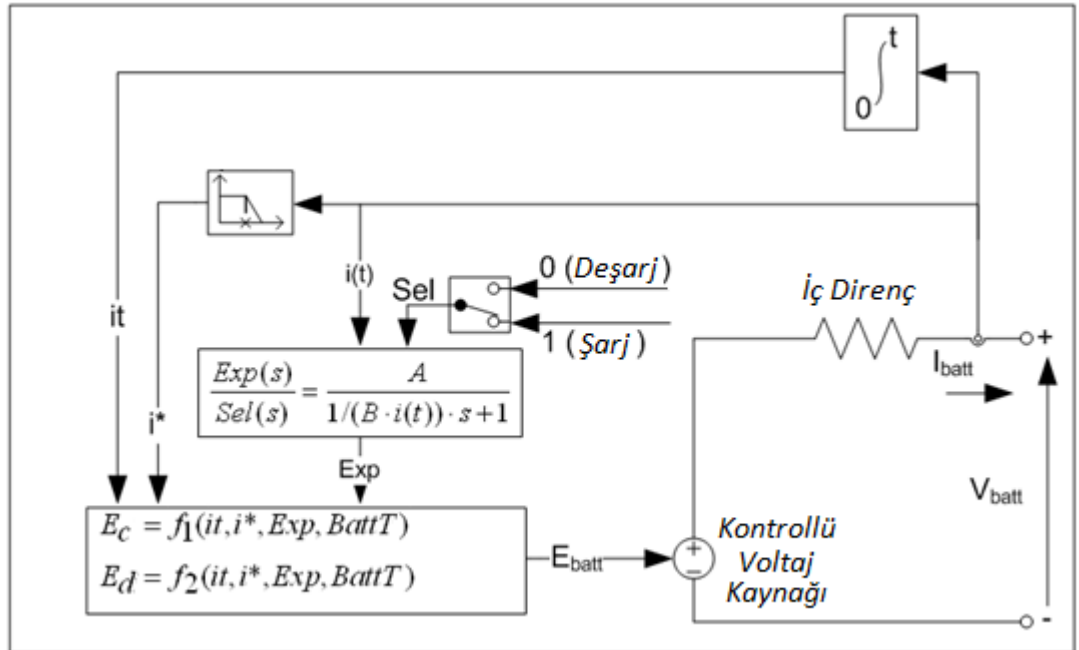
Batarya şarj kapasitesi Ah (amphour) cinsinden ifade edilir. Bataryanın sağlayabildiği amper ile sağladığı sürenin saat cinsinden çarpımı anlamına gelir. Batarya 10 saat için 1 amper sağlayabiliyorsa yada 1 saat için 10 amper sağlayabiliyorsa 10Ah olarak gösterilir [21].

Bataryanın depoladığı enerji watt saat cinsinden ifade edilir ve 1 waat saatin değeri 3600 J'ye eşittir. Depolanan enerji denklem (3.62)'deki gibidir.

$$Enerji = voltaj * amper saat = V * C \quad (3.62)$$

Bataryadaki gerilim şarj durumundan (SOC), boşalma akımından ve sıcaklık gibi faktörlerden etkilenir. Şarj durumu bataryadaki kalan gerilim ile bataryanın nominal geriliminin oranıdır. Bataryalar en fazla %80 oranında şarj edilirler. Bunun nedeni bataryadaki şarj %20 - %80 aralığındayken verimin %100'e yakın olmasıdır. Bataryalar %80'in üzerinde şarj edildiğinde verim düşer.

Tezde Matlab/Simulink programındaki lityum iyon batarya modeli kullanılmıştır. Kullanılan bataryanın devresi şema olarak Şekil 3.24'deki gibidir.



Şekil 3.24 : Matlab batarya devre şeması [28].

Bataryadaki deşarj durumunda batarya denklemi denklem (3.63)'deki gibidir.

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + A \exp(-Bit) \quad (3.63)$$

$$(i^* > 0)$$

Bataryadaki şarj durumunda batarya denklemi denklem (3.61)'deki gibidir.

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{it + 0.1Q} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + A \exp(-Bit) \quad (3.64)$$

$$(i^* < 0)$$

Denklem (3.63) ve denklem (3.64)'de;

i , batarya akımını ,

t , zamanı ,

E_0 , sabit voltajı ,

K , polarizasyon sabitini ,

Q , maksimum batarya kapasitesini ,

i^* , düşük frekans akım dinamiğini ,

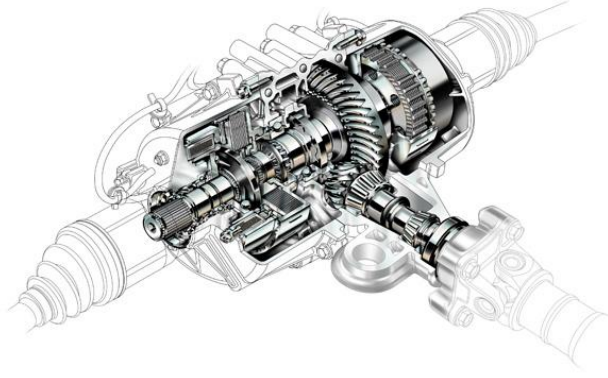
A , üstel voltajı ,

B , üstel kapasiteyi ifade etmektedir.

Elektrikli taşıtlarda lityum iyon, kurşun asit, sodyum metal klorür (Zebra), sodyum sülfür gibi çeşitli bataryalar tercih edilmektedir.

3.3.6 Elektronik diferansiyelin modellenmesi

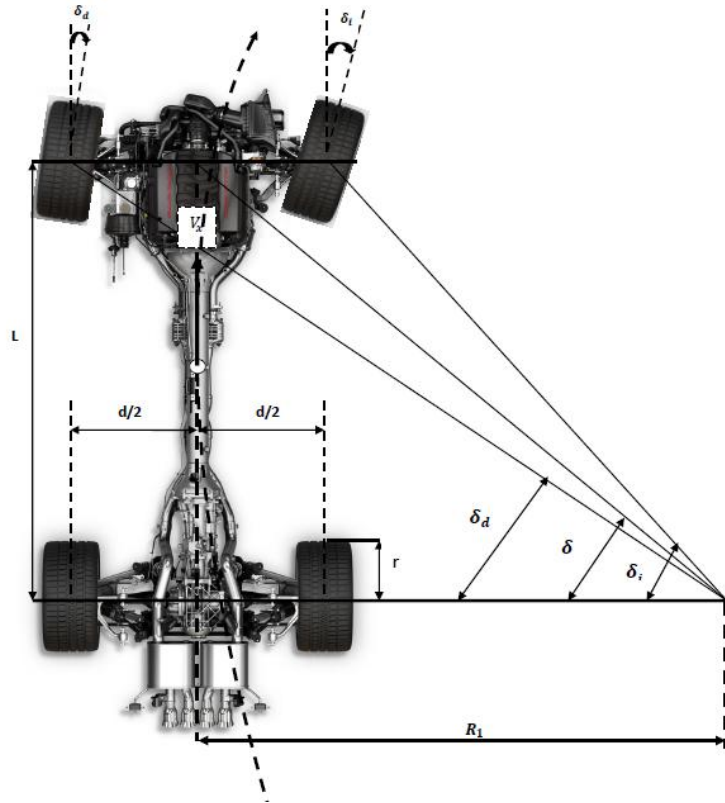
Diferansiyelin görevi; aracın direksiyonu kırıldığında arka tekerleklerin farklı hızda dönmesine imkan verip, tekerleklerin yaklaşık aynı döndürme momenti ile dönmesini sağlamaktır. Bu sayede aracın viraj alırken yoldan çıkması önlenip, virajı kaymadan dengeli bir biçimde dönmesi sağlanır. Şekil 3.25'de mekanik diferansiyel yapısı görülmektedir.



Şekil 3.25 : Mekanik diferansiyel [29].

Taşıtlarda kullanılan diferansiyeller, kilitlemesiz, manuel kilitlemeli yada otomatik kilitlemeli olabilir. Mekanik diferansiyeller dişlilerin oluşturduğu bir sistemdir. Diferansiyel içindeki devir sayısının dengelenmesi için diferansiyel içindeki dişliler; konik dişliler, düz alın dişliler yada sonsuz dişli ve sonsuz dişli çarklarından oluşabilir. [1]

Elektronik diferansiyel tasarımında; viraj anında direksiyonun açısına bağlı olarak arka tekerleklerin dönmesi gereken hızlar hesaplanırken Ackermann Geometrisinden yararlanılmıştır. Ackermann Geometrisi Şekil 3.26'daki gibidir.



Şekil 3.26 : Ackermann geometrisi.

Şekil 3.26'daki Ackermann geometrisinde;

δ , Ackermann açısını,

δ_i , içte kalan tekerleğin dönüş açısını,

δ_d , dışta kalan tekerleğin dönüş açısını,

L , aracın aks mesafesini,

d , aracın arka iz genişliğini

r , taşıtın tekerlek yarı çapını

R_1 , taşıtın aldığı virajın çember merkezi ile aracın arka iz genişliğinin orta noktasını,

V_x , aracın boyuna hızını ifade eder.

Şekil 3.23'deki üçgen benzerliklerinden yararlanılarak aracın iç tekerleğinin dönüş açısı ile ilgili bağıntı denklem (3.65) ile, dış tekerleğin dönüş açısı ile ilgili bağıntı denklem (3.66) ile ve dönüş açısı ile tekerleklerin dönüş açıları arasındaki bağıntı denklem (3.67) ile ifade edilir. Denklem (3.67)'de δ açısı Ackermann Açısı olarak ifade edilir.

$$\tan(\delta_i) = \frac{L}{R_1 - \frac{d}{2}} \quad (3.65)$$

$$\tan(\delta_d) = \frac{L}{R_1 + \frac{d}{2}} \quad (3.66)$$

$$\delta = \frac{\delta_d + \delta_i}{2} \quad (3.67)$$

δ açısının değişimi denklem (3.68)'deki gibidir.

$$\begin{aligned} \delta > 0 & \text{ araç sağa döner} \\ \delta = 0 & \text{ araç düz gider} \\ \delta < 0 & \text{ araç sola döner} \end{aligned} \quad (3.68)$$

Şekil 3.23'teki üçgen benzerliğinden denklem (3.69) elde edilir.

$$\tan \delta = \frac{L}{R_1} \quad (3.69)$$

Denklem (3.68)'den R_1 'i çekersek, denklem (3.70)'i elde ederiz.

$$R_1 = L / \tan \delta \quad (3.70)$$

Tekerleklerdeki hızlar arasındaki bağıntı denklem (3.71)'deki gibidir.

$$\frac{V_x}{R_1} = \frac{V_i}{R_1 - d/2} = \frac{V_d}{R_1 + d/2} \quad (3.71)$$

Denklem (3.70) ve denklem (3.71) kullanılarak içteki tekerleğin hızı denklem (3.72)'den, dıştaki tekerleğin hızını denklem (3.73)'den elde edilir.

$$\omega_i = \frac{V_x}{r} \left(1 - \frac{d}{2} \cdot \frac{\tan(\delta)}{L} \right) \quad (3.72)$$

$$\omega_d = \frac{V_x}{r} \left(1 + \frac{d}{2} \cdot \frac{\tan(\delta)}{L} \right) \quad (3.73)$$

Böylece denklem (3.72) ve denklem (3.73) kullanılarak, taşıtın o anki hızı ve direksiyon açısına göre arka tekerleklerin dönmeleri gereken hızlar hesaplanmış olur.

3.3.7 Çekiş kontrol sistemi

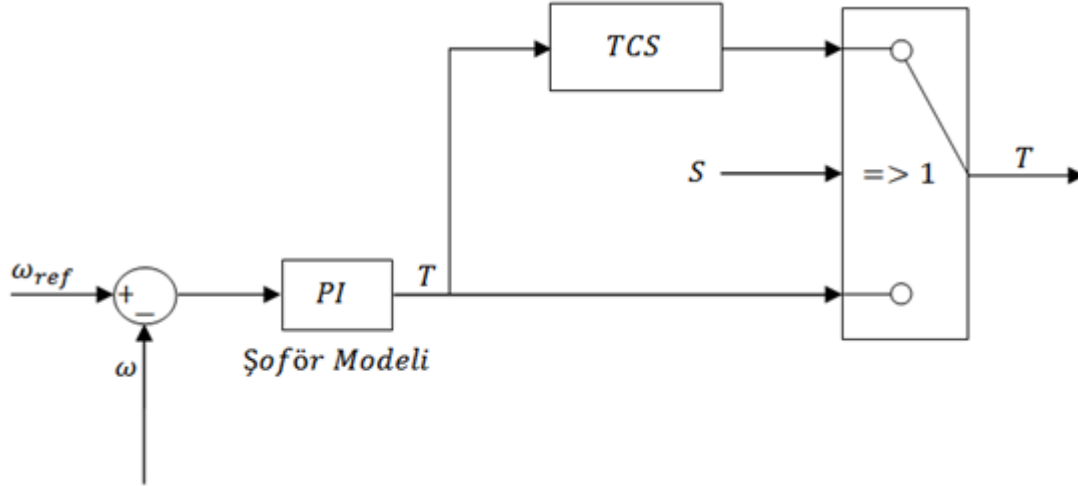
Çekiş kontrol sistemi tekerleklerdeki torku ayarlayarak tekerleklerin kaymadan dönmesini sağlayan sistem olarak adlandırılabilir. Çekiş kontrol sisteminde tekerleklerdeki kaymalar hesaplanır ve tekerlekler patinaj durumuna gelmeden sistem otomatik olarak kademeli olarak torku azaltır. Bu sayede tekerleklerin yola tutunması sağlanır. Çekiş kontrol sistemi taşıtın yol tutuşunu artırır. Standart taşıtlarda tahrik kuvvetinin kontrolü çeşitli yöntemlerle yapılabilir [19];

- Gaz pedalının kontrolü ,
- Motorun enjeksiyon kontrolü ,
- Tekerleklerin kontrolü.

Tekerleklerin kontrolü en çok kullanılan yöntemdir. Tekerlek patinaja başladığı anda tekerleklerle kademeli olarak fren uygulanır ve tekerleklerin patinaj yapması engellenir. Bu yöntemde ABS sisteminin altyapısı kullanılır ve en iyi sonuç veren yöntemdir.

Kullanılan araç tekerleklerle konumlandırılmış elektrik motorlarına sahip olduğundan, çekiş kontrol sisteminde motorun torkuna direk müdahale edilmelidir. Bunun için tekerleklerdeki kayma bilgilerine ihtiyaç vardır. Tekerleklerde patinaj

durumu algılandığında tasarlanan çekiş kontrol sistemi devreye girmeli ve motorun torkunu kademeli olarak azaltarak tekerleklerin patinaj yapması önlenmelidir.



Şekil 3.27 : TCS'nin sisteme entegrasyonu.

TCS, kontrol sistemine şekil 3.27'deki gibi entegre edilebilir. TCS sistemi tasarlanırken boyuna tahrik kuvveti bölümünde bahsedilen denklem (3.16)'dan yararlanılarak tahrik anında tekerlekteki kayma miktarı hesaplanır.

$$\sigma_x = \frac{r\omega_t - V_x}{r\omega_t} \times 100 [\%] \quad (3.16)$$

Tekerleklerden gelen kayma değeri 1 sınır değerine ulaştığında kayma miktarı %100 olur ve tekerlekler patinaj durumuna gelir. Bu durumda TCS sistemi otomatik devreye girerek torku kademeli olarak azaltır ve tekerleklerin patinaj yapması engellenir. Kayma istenen değere düştüğünde TCS devreden çıkar ve şoför modelinden elde edilen tork değerlerine göre motor kontrol edilir. Simulasyonda tasarlanan kontrolörler sayesinde taşıt hızı ile tekerlek hızı neredeyse aynıdır. Tekerlekler patinaj durumuna gelmediğinden ötürü herhangi bir TCS sistemine ihtiyaç duyulmamıştır.

4. MOTOR KONTROLÜ VE SİMULASYON

4.1 SMSM Kontrolü

SMSM'lerin kontrolü için farklı kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Doğrudan Moment Kontrolü (DMK) ve Vektör Kontrol yöntemleri en yaygın kullanılan yöntemlerdir.

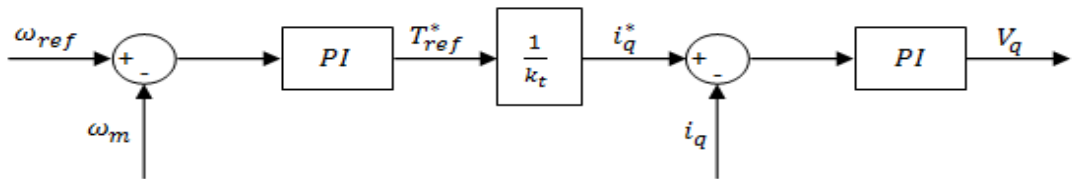
DMK yönteminde, PWM oluşturma yöntemine yada akımlar için bir dönüşüme ihtiyaç yoktur. Referans ve hesaplanan akı vasıtasıyla momentte oluşacak hataları doğrudan giderecek nitelikte bir anahtarlama dizisinin, eviricideki güç anahtar elemanlarına uygulanmasına dayanır [6].

Vektör Kontrol yönteminin amacı moment ve akıyı bağımsız olarak kontrol etme olanağı sağlamaktır. Bu yöntem sayesinde stator akımının iki bileşeni olan hava aralığı akısı ve akım bileşenleri birbirinden bağımsız hale getirilir.[22]

İki farklı vektör kontrol yöntemi vardır [6];

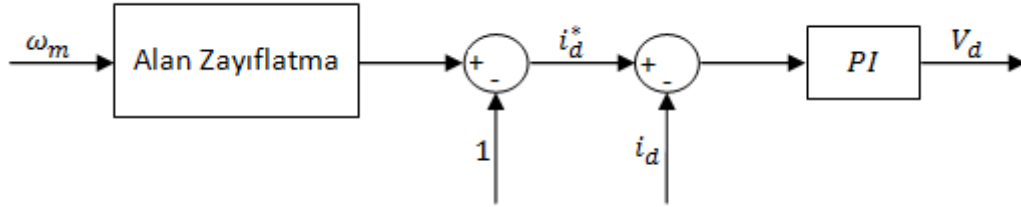
- Doğrudan Vektör Kontrolü
- Dolaylı Vektör Kontrolü

Doğrudan vektör kontrolü yönteminde aracın diferansiyelinden gelen açısal hız ile motordan gelen açısal hızın farkı soför modeline gelir. Soför modelinde torka çevrilir ve referans tork değeri elde edilmiş olur. Elde edilen tork değeri SMSM'nin tork sabitine (k_t) bölünür bu sayede i_q^* akımı elde edilir. Elde edilen i_q^* akımı ile motorun statorundan gelen i_q akım değerinin farkı alınıp, PI kontrolör yardımı ile V_q gerilimi elde edilir. V_q gerilimini elde edilmesi Şekil 4.1'deki gibidir.



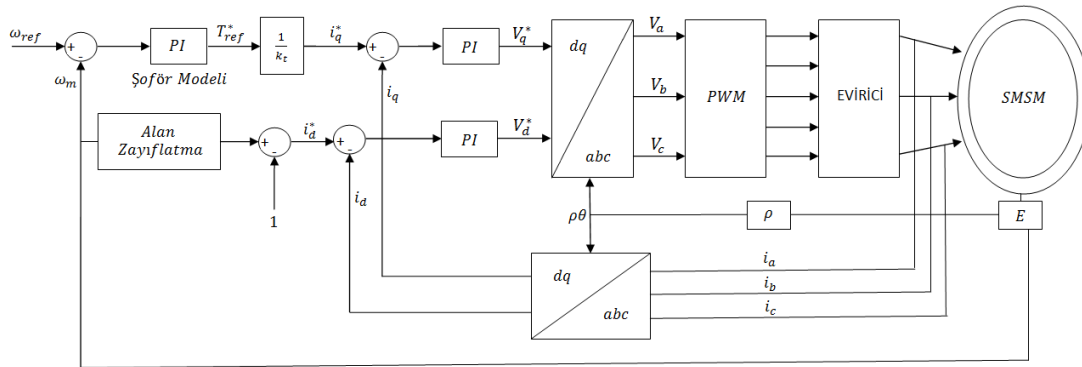
Şekil 4.1 : V_q gerilimini elde edilmesi.

Eş zamanlı olarak motorun açısal hızı alan zayıflatma modülüne gelir. Alan zayıflatma modülünde aracın anlık hızına göre akı ayarlanır. Alan zayıflatma modülünden gelen değerden 1 çıkarılıp i_d^* akımı elde edilir. Bulunan i_d^* akımı ile motorun statorundan gelen i_d akım değerinin farkı alınıp, PI kontrolör yardımı ile V_d gerilimi elde edilir. V_d gerilimini elde edilmesi Şekil 4.2'deki gibidir.



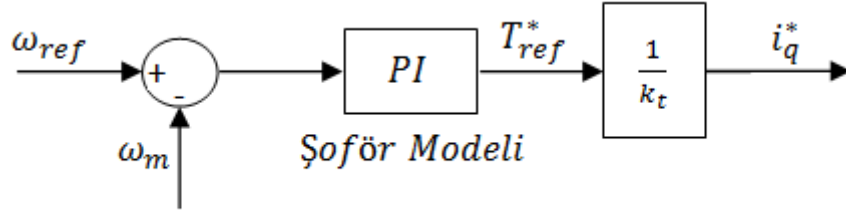
Şekil 4.2 : V_d gerilimini elde edilmesi.

Elde edilen V_q - V_d gerilimleri dq – abc dönüşümü uygulanarak V_a , V_b , V_c gerilimleri elde edilir. Dönüşümde kullanılan $\rho\theta$ motorun rotorunun dönme açısıdır ve motordan eşzamanlı olarak alınır. Elde edilen V_a , V_b , V_c gerilimleri kullanılarak eviriciye verilmek üzere PWM'ler üretilir. Üretilen PWM'ler eviricide bulunan IGBT'leri tetikler bu sayede motorun a, b ve c sarımlarına verilmek üzere gerilimler elde edilir. Doğrudan vektör kontrol yönteminin şeması Şekil 4.3'deki gibidir.



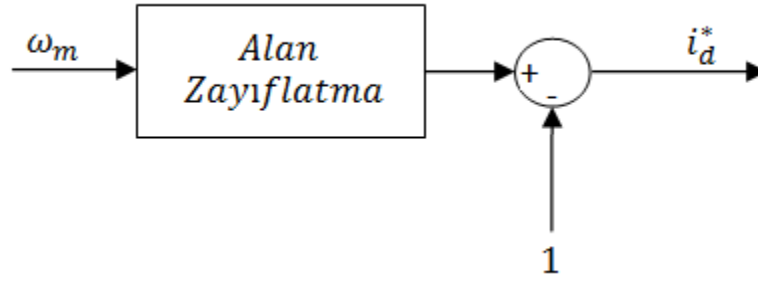
Şekil 4.3 : Doğrudan vektör kontrol.

Dolaylı vektör kontrolü yönteminde aracın diferansiyelinden gelen açısal hız ile motordan gelen açısal hızın farkı soför modeline gelir. Soför modelinde torka çevrilir ve referans tork değeri elde edilmiş olur. Elde edilen tork değeri SMSM'nin tork sabitine (k_t) bölünür bu sayede i_q^* akımı elde edilir. i_q^* akımının elde edilmesi Şekil 4.4'deki gibidir.



Şekil 4.4 : i_q^* akımının elde edilmesi.

Eş zamanlı olarak motorun açısal hızı alan zayıflatma modülüne gelir. Alan zayıflatma modulünde aracın anlık hızına göre akı ayarlanır. Alan zayıflatma modülünden gelen değerden 1 çıkarılıp i_d^* akımı elde edilir. i_d^* akımının elde edilmesi Şekil 4.5'deki gibidir.



Şekil 4.5 : i_d^* akımının elde edilmesi.

Elde edilen i_q^* - i_d^* akımları dq – abc dönüşümü uygulanarak i_a^* , i_b^* , i_c^* akımları elde edilir. Dönüşümde kullanılan $\rho\theta$ motorun rotorunun dönme açısıdır ve motordan eşzamanlı olarak alınır. Elde edilen i_a^* , i_b^* , i_c^* akımları ile motorun statorundan eşzamanlı ölçülen i_a , i_b , i_c akımlarının farkı alınır. Bulunan değerler kullanılarak eviriciye verilmek üzere PWM'ler üretilir. Üretilen PWM'ler eviricide bulunan IGBT'leri tetikler bu sayede motorun a, b ve c sarımlarına verilmek üzere gerilimler elde edilir. Dolaylı vektör kontrol yönteminin şeması Şekil 4.6'daki gibidir.

alınan tork değerlerine göre I değeri ayarlanmıştır. PI Kontrolörlerden alınan değerler uygun bulunduğundan türev terimine ihtiyaç duyulmamış, kontrolörler PI kontrolör olarak tasarlanmıştır.

4.1.2 Alan (akı) zayıflatma yöntemi

SMSM'lerin kontrolünde, rotordaki mıknatıslar sürekli alan akısı ürettiğinden alan (akı) zayıflatma yönteminin kullanılması gerekmektedir. Akı zayıflatmada bir sınır hız seçilir, motor hızı bu hızın altındayken akı 1 değerinde sabit tutulur. Güç denkleminde göre taşıtın hızı arttığında torku azalacağı mantığından; motor hızı seçilen sınır hızı aşmaya başladığında 1 değeri motorun hızı ile orantılı olarak azalmaya başlar. Alan zayıflatma bloğundan 1 ile 0 arasında çıkan referans değerden 1 çıkarılır ve i_d^* değerinin 0 ile -1 arasında olması sağlanır. Bu sayede motorun hızına bağlı olarak akısı kontrol edilir.

4.1.3 PWM'lerin elde edilmesi

PWM'ler farklı yöntemler kullanılarak elde edilebilirler;

- Sinüs – Üçgen Karşılaştırması
- Histeresiz Özellikli Orantılı Akım Kontrolü

Sinüs üçgen karşılaştırma yöntemi iki farklı şekilde yapılabilir;

- dq – abc dönüşümü kullanılarak oluşturulan sinüs şeklindeki V_a , V_b , V_c gerilimleri ile üçgen şeklindeki taşıyıcı gerilim karşılaştırılır. Bu şekilde PWM'ler üretilir.
- dq – abc dönüşümü kullanılarak oluşturulan sinüs şeklindeki referans i_a^* , i_b^* , i_c^* akımları ile startordan alınan i_a , i_b , i_c faz akımlarının farklı alınır, bunun değeri üçgen şeklindeki taşıyıcı işaret ile karşılaştırılır. Bu şekilde PWM'ler üretilir.

Histeresiz özellikli orantılı akım kontrolünde, referans sinüzoidal akımlar ile motordan ölçülen faz akımlarının farklı alınır, eğer akım hatası pozitif ise eviricini üst kolunda yer alan IGBT'ler, negatif ise alt koldaki IGBT'ler iletime sokulur. [6]

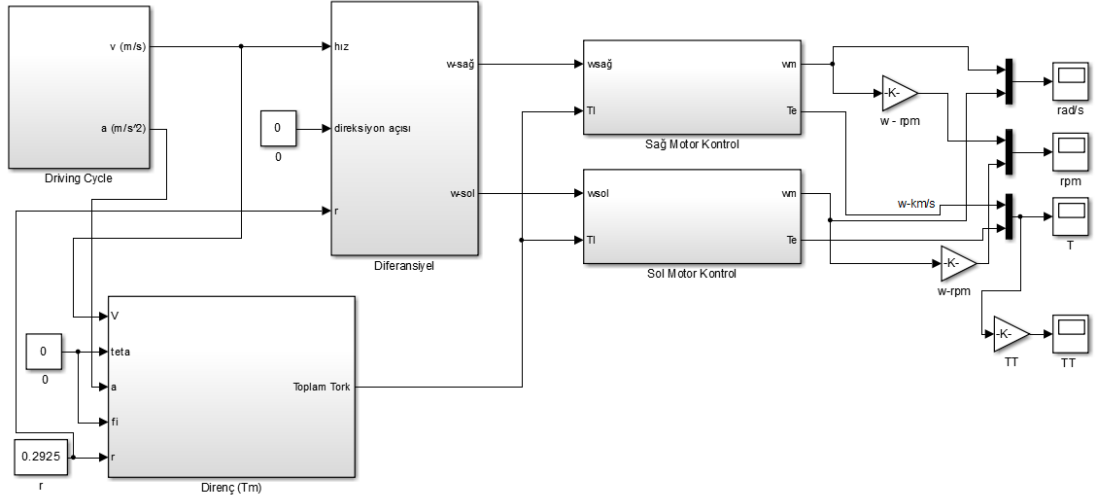
4.2 Simulasyon

Simulasyon, MATLAB Simulink programı kullanılarak oluşturulmuştur. Proje için iki adet simulasyon oluşturulmuştur. Oluşturulan ilk simulasyon, elektronik diferansiyeldeki hız ve tork farklarının daha rahat gözlemlenebilmesi için $\alpha\beta$ yöntemi kullanılarak evirici kullanılmadan, anahtarlamaşız olarak yapılmıştır. Simulasyon 50sn sürmektedir ve simulasyon sonucunda sağ ve sol motorlardaki hız ve tork değişimleri, taşıta etkiyen yanal kuvvet, taşıtın ön ve arka aksına etkiyen dikey kuvvetler ve zamana göre taşıtın savrulma açısı gözlemlenmiştir. Oluşturulan ikinci simulasyon, evirici kullanılarak anahtarlamaşlı olarak yapılmıştır. Simulasyon 900 saniye sürmektedir. Simulasyon süresince bataryadaki değişimler, motor hızının referans hızı takibi, motorların ürettikleri torklar, motor faz akımları ve gerilimleri ve taşıtın ön ve arka aksına etkiyen dikey kuvvetler gözlemlenmiştir.

Simulasyonlardaki bloklar taşıtın ve kullanılan SMSM'nin dinamik modeli baz alınarak oluşturulmuştur. Simulasyonda çeşitli varsayımlar yapılmıştır;

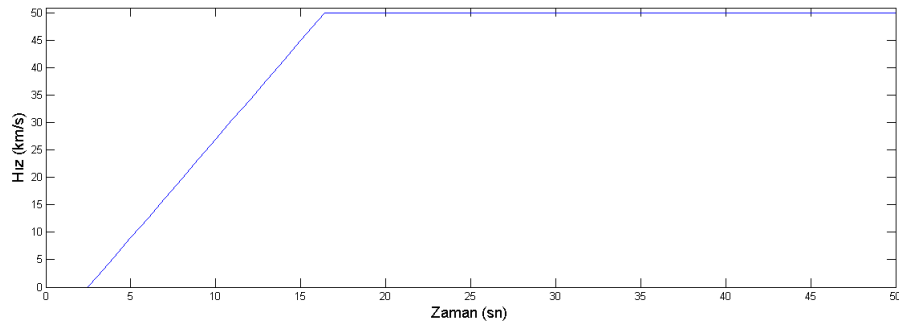
- F_x , taşıtın boyuna hareketi süresince oluşan seyir dirençleri motora yük olarak verilerek oluşturulmuştur.
- $(F_{xr}/F_{zr}) \leq \mu$
- Viraj esnasında sadece ön tekerleklerde dönüş açısı oluşmaktadır, arka tekerleklerde dönüş açısı oluşmamaktadır.
- Taşıtın direksiyon kutusundan çıkan açı değeri, taşıtın dönüş (ackermann) açısına eşittir.
- Tekerlekler kaymadan dönmektedir. Araç hızı ile tekerlek hızı birbirine eşittir.
- Aracın tekerleğinin yarıçapı dinamik tekerlek yarıçapına eşittir.

2 Simulasyon içinde genel simulasyon bloğu aynıdır. Hız bloğu ile motor kontrol bloklarında değişiklikler vardır. Genel simulasyon bloğu Şekil 4.7'deki gibidir.



Şekil 4.7 : Genel simülasyon bloğu.

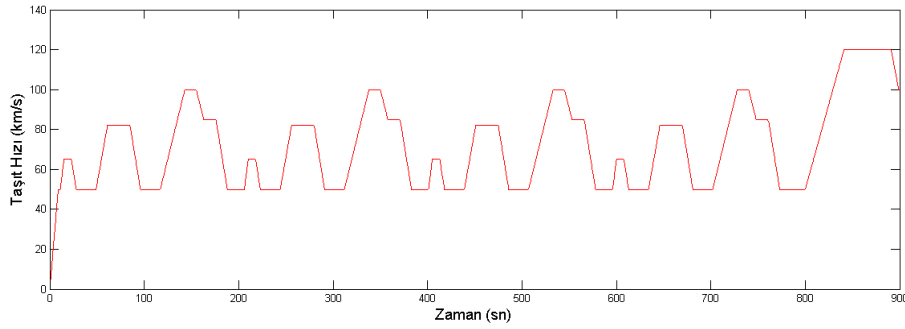
İki farklı simülasyon için iki farklı hız referansı kullanılmıştır. Elektronik diferansiyel için hazırlanan simülasyonda; elektronik diferansiyelin davranışlarının gözlenmesi için taşıt 0'dan 50 km/s hıza çıkarılmış, 50km's hızla giderken direksiyonu kırılmıştır. Oluşturulan simülasyon 50sn çalıştırılmıştır. Kullanılan referans hız Şekil 4.8'deki gibidir.



Şekil 4.8 : Elektronik diferansiyel simülasyonu referans hız.

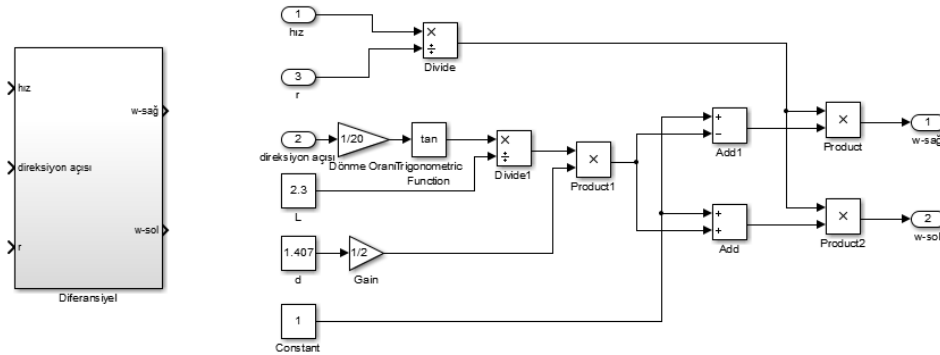
Oluşturulan ikinci simülasyon için, bataryalardaki değişimlerin daha rahat gözlemlenebilmesi için taşıt ilk 10 sn içinde 50 km/s hıza çıkarılmış ardından 50 km/s hızın üzerine Yeni Avrupa Seyir Çevrimi (NEDC)'deki referans hızlar eklenmiştir. NEDC araç üreticilerinin tip onayı alabilmeleri için oluşturulan, yakıt tüketimi ve emisyonların belli bir standarda göre belirlenmesini sağlayan çevrimdir. NEDC hızlanma, sabit hız, yavaşlama , durma vb. çeşitli seyir modlarının ardarda eklenmesiyle oluşturulmuştur [30]. NEDC'de hız belirli aralıklarda 0 km/s'te düşerken, oluşturulan simülasyonda 50 km/s'te düşmektedir. Bu sayede taşıtın durmadan hareketi sağlanmış ve bataryalardaki değişimin daha belirgin biçimde

gözlenmesi sağlanmıştır. Şekil 4.9’da anaharlmalı motor kontrolü simülasyonu için oluşturulan referans hız değişimi görülmektedir.



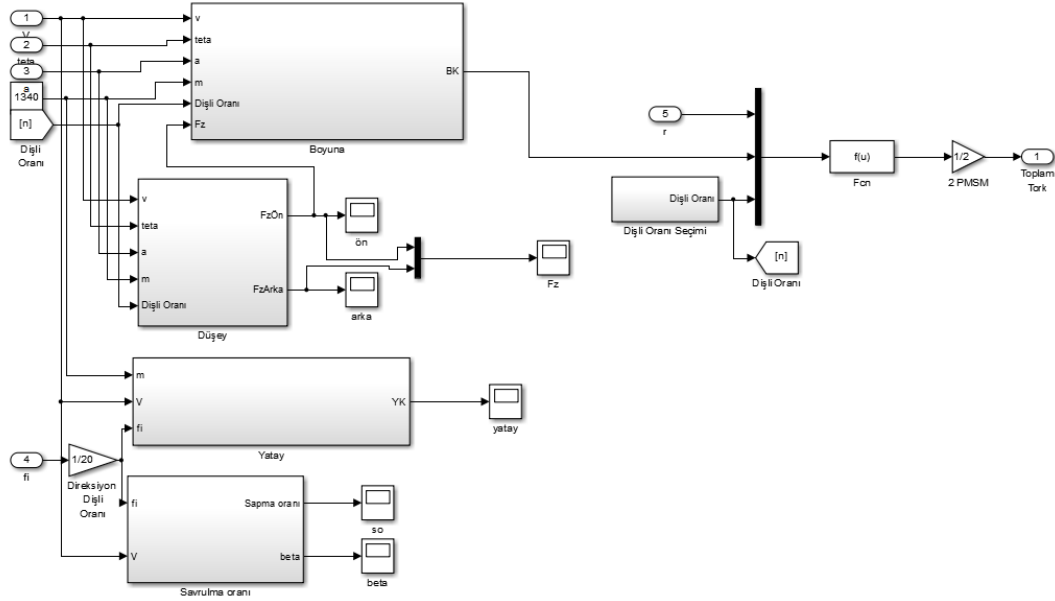
Şekil 4.9 : Anahtarlamalı motor kontrolü simülasyonu referans hız.

Elektronik diferansiyel Ackermann Geometrisi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu sayede referans hızlar ve direksiyon açısına göre aracın arka tekerleklerinin dönmesi gereken hızlar hesaplanmıştır. Oluşturulan elektronik diferansiyel modeli Şekil 4.10’daki gibidir.



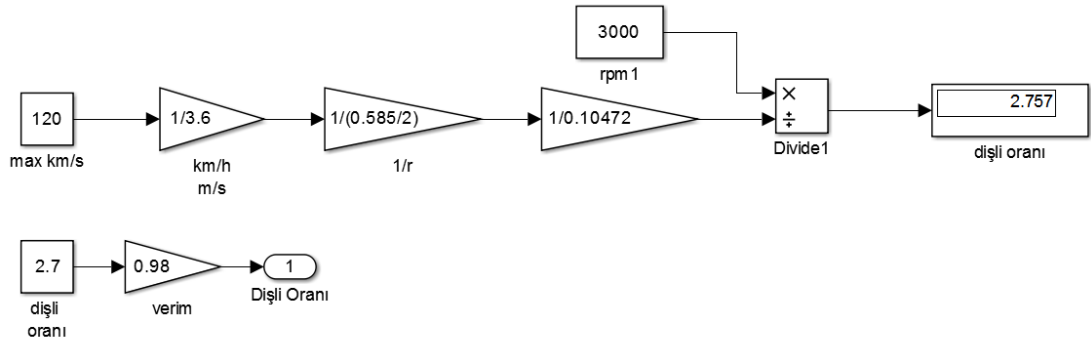
Şekil 4.10 : Elektronik diferansiyel modeli.

Taşıtın mekanik modellenmesi kısmındaki taşıtın boyuna, yanal ve düşey hareketindeki kaynaklanan kuvvetler hesaplanmıştır. Boyuna kuvvetler torka dönüştürülüp motora yük olarak verilmiştir. Taşıtın viraj anındaki savrulma açısı, sapma oranı ve taşıta etkiyen yanal kuvvetler hesaplanmıştır. Taşıtın hızlanma ve yavaşlama durumlarındaki ön ve arka aksa etkiyen kuvvetler hesaplanmıştır. Dirençlerin modeli Şekil 4.11’deki gibidir.



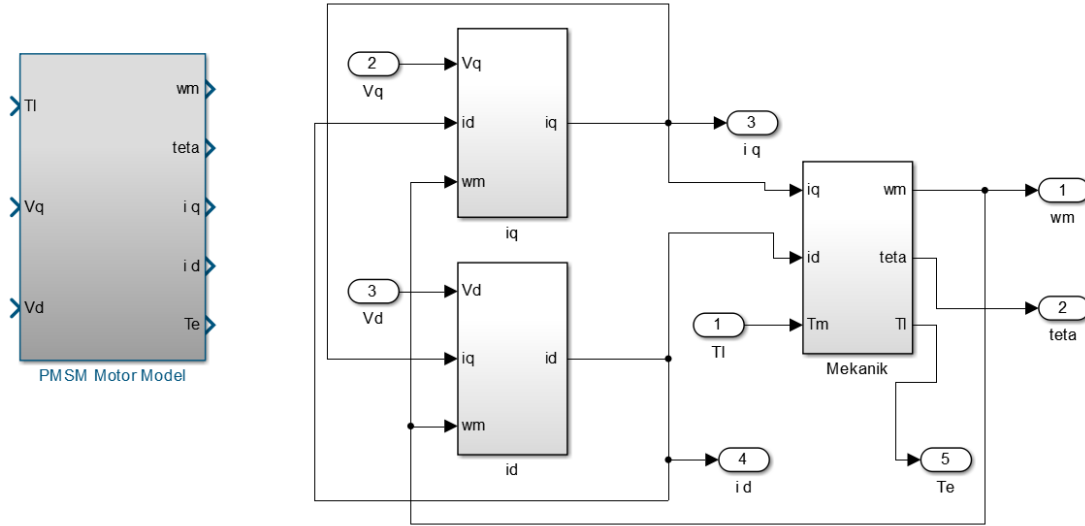
Şekil 4.11 : Direnç modeli.

Dişli oranı modellenirken aracın ulaşacağı maksimum hız, taşıtın tekerlek yarıçapı ile motorun maksimum hızı kullanılmıştır. Modele taşıtın ulaşması istenen maksimum hız girildiğinde mevcut taşıt için uygulanabilecek maksimum dişli oranı bulunabilmektedir. Dişli oranı modeli Şekil 4.12'deki gibidir.



Şekil 4.12 : Dişli oranı modeli.

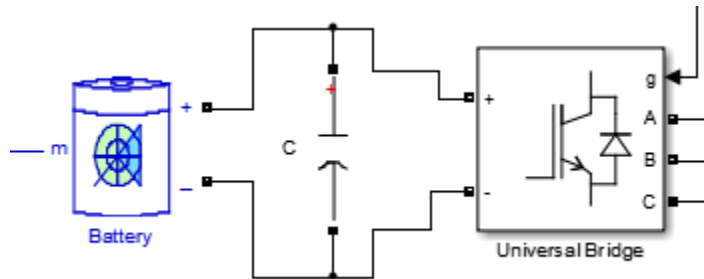
SMSM'ler elektrik kısımların modellenmesi bölümündeki denklemler kullanılarak oluşturulmuştur. Simulasyonda iki farklı model kullanılmıştır. Anahtarlamasız $\alpha\beta$ kontrol için özel model oluşturulmuş. Anahtarmalı kontrol için simulinkte bulunan SMSM motor kullanılmıştır. Oluşturulan SMSM modeli Şekil 4.13'deki gibidir.



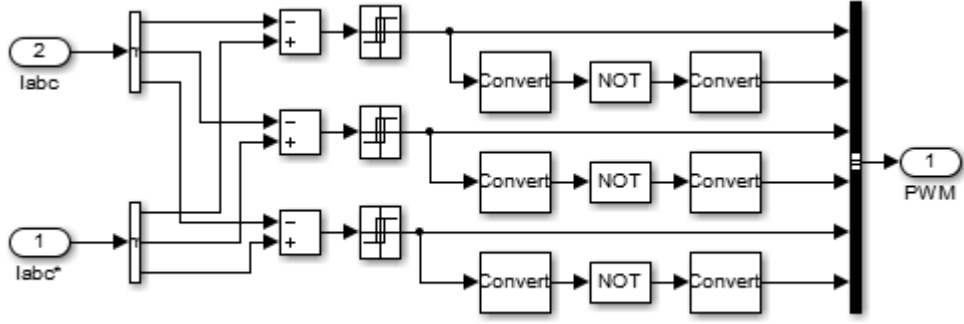
Şekil 4.13 : SMSM modeli.

Simulasyonda sürücü modeli referans hızı torka çevirecek biçimde PI kontrolör olarak tasarlanmıştır. Diferansiyel bloğundan gelen açısal hız sofor modelinde gaz pedalından gelecek torka denk biçimde kontrolörden çıkmaktadır. Sürücü modelinde parametreler sistemdeki diğer iki akım-gerilim dönüştürücü PI kontrolör parametreleri ayarlandıktan sonra ayarlanmıştır. SMSM'ler nonlineer olduklarından ötürü parametre ayarlanırken elle ayarlama yöntemi izlenmiştir.

Projede motor sürücü ve batarya modeli Matlab/Simulink kütüphanesinden hazır olarak alınmıştır. Sürücü ve batarya modeli Şekil 4.14'deki gibidir. Motor sürücünde güç elemanı olarak IGBT'ler kullanılmıştır. Eviricinin anahtarlamalı kontrolü için gerekli PWM'ler histeresiz özellikli orantılı akım kontrolü yöntemi ile üretilmiştir. Histeresiz özellikli orantılı akım kontrolü yöntemi Şekil 4.15'deki gibidir.



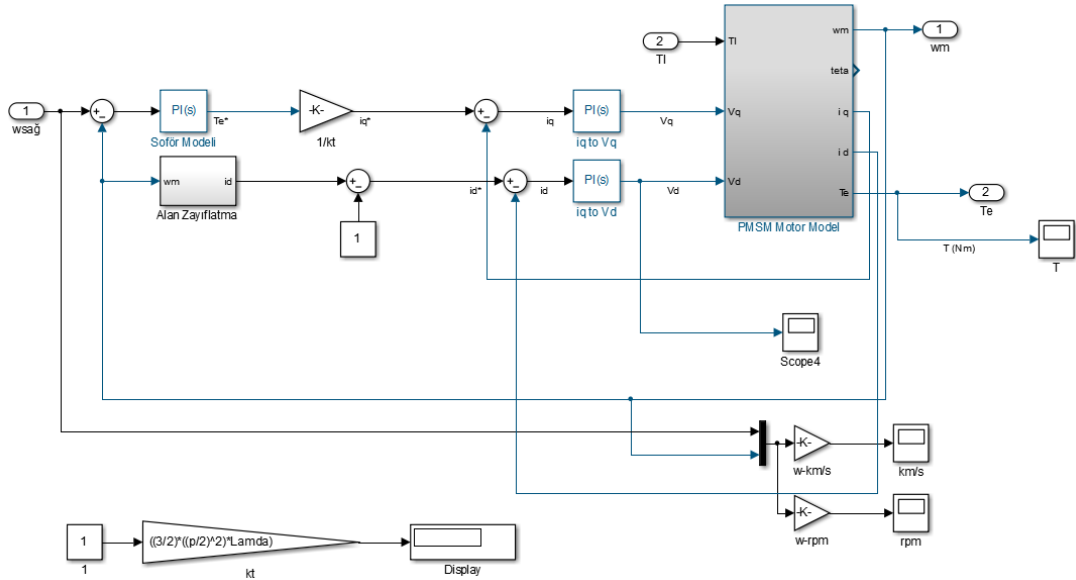
Şekil 4.14 : Batarya ve sürücü modeli.



Şekil 4.15 : Histeresiz özellikli orantılı akım kontrollü PWM.

Simulasyonda batarya olarak $801.8V (560\sqrt{2} + 3.3 * 3)$ 40Ah'luk lityum iyon batarya kullanılmıştır. Motor kontrolü için iki ayrı kontrol bloğu oluşturulmuştur. Bloklardan ilki anahtarlama kontrol $\alpha\beta$ kontrolü için, diğeri anahtarlama kontrol için oluşturulmuştur.

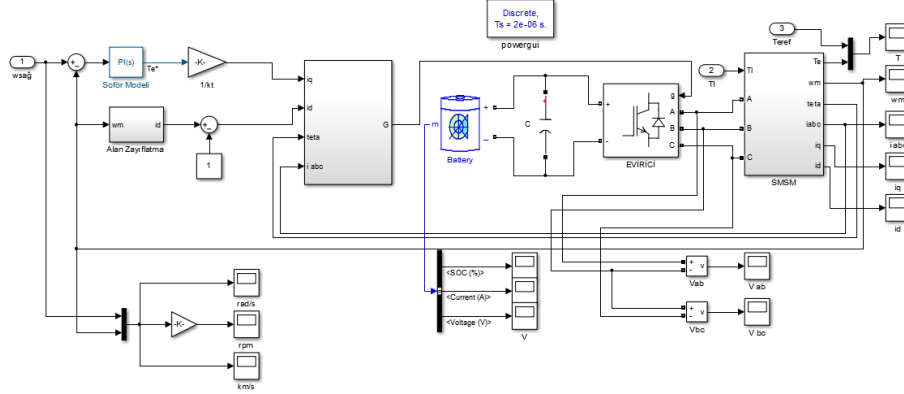
Anahtarlama kontrolde elektronik diferansiyel için oluşturulan hız referansı kullanılmıştır. Bu sayede hız ve yük değişimlerine göre motorun üretmesi gereken torklar gözlenmiştir ve taşıtın direksiyonunun kırılma anındaki; tekerleklerdeki hız ve tork değişimleri, araca etkiyen yanal kuvvet ve ön ve arka aksa etkiyen kuvvetler gözlemlenmiştir. Anahtarlama kontrol Şekil 4.16'daki gibidir.



Şekil 4.16 : Anahtarlama kontrol.

Anahtarlama kontrol yönteminde simulasyon 900sn çalıştırılmıştır. Bu süre boyunca motorların hız değişimleri, ön ve arka etkiyen dikey kuvvetler, motorların

ürettikleri torkların değişimleri, stator faz akımlarındaki değişimler, faz gerilimlerindeki değişimler ve bataryadaki değişimler gözlenmiştir. Anahtarlama kontrol Şekil 4.17'deki gibidir.



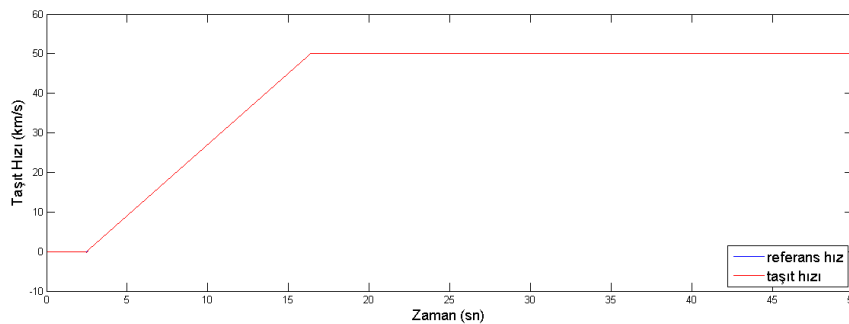
Şekil 4.17 : Anahtarlama motor kontrol.

Oluşturulan elektronik diferansiyel ve anahtarlama simülasyonlardan elde edilen sonuçlar simülasyon sonuçları kısmında incelenmiştir.

4.3 Simülasyon Sonuçları

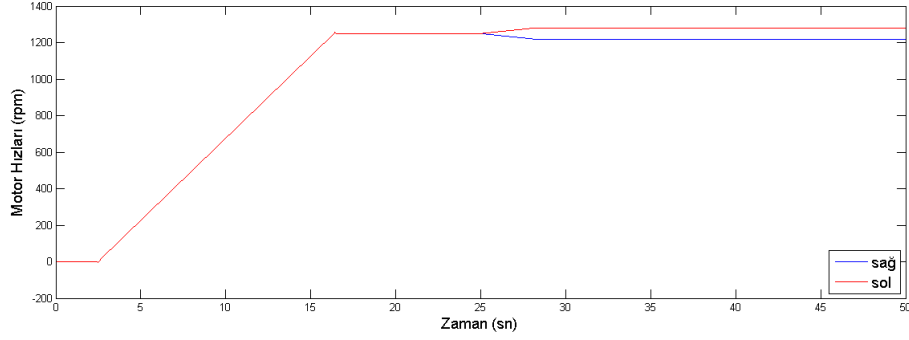
4.3.1 Elektronik diferansiyel simülasyonu sonuçları

Elektronik diferansiyel simülasyonu sağ ve sol tekerleklerdeki hız ve tork değişimlerinin daha rahat gözlemlenebilmesi için $\alpha\beta$ yöntemi ile anahtarlama olarak yapılmıştır. Simülasyonda doğrudan vektör kontrol yöntemi kullanılmıştır. Simülasyonda taşıt için bir dönüş senaryosu oluşturulmuştur. Senaryoda araç 50km/s hıza çıkarılmış daha sonra aracın direksiyonu 90 derece sağa kırılmıştır. Bu senaryoya göre iki motordaki hız ve tork değişimleri, tekerleklerdeki hız değişimleri, tekerleklerle aktarılan torklar, taşıta etkiyen yanal kuvvet, taşıtın savrulma açısı ve sapma oranındaki değişimler gözlenmiştir.



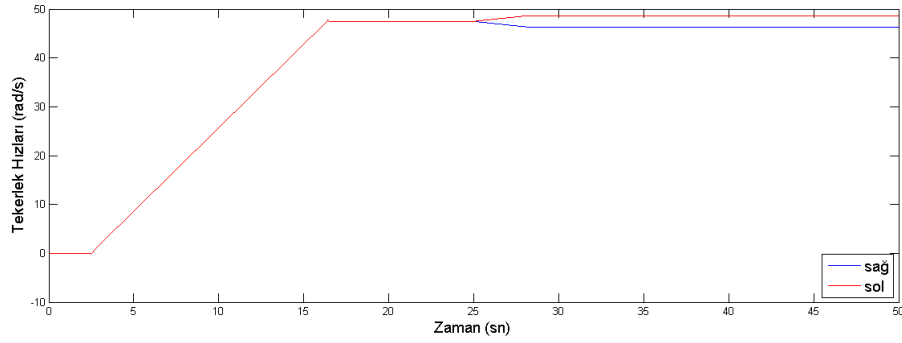
Şekil 4.18 : Taşıt hızının referans hızı takibi.

Oluşturulan senaryoya göre taşıt hızının referans hızı tabiki Şekil 4.18'deki gibidir. Senaryoda, taşıt snleri arası sabit ivme ile 50 km/s hıza ulaşmıştır. Daha sonra 25. snde aracın direksiyonu 90 derece sağa kırılmıştır. Senaryoya göre aracın sağ ve sol motorlarındaki hız değişimleri rpm cinsinden Şekil 4.19'da, aracın tekerleklerindeki hız değişimleri rad/s cinsinden Şekil 4.20'de gösterilmiştir.



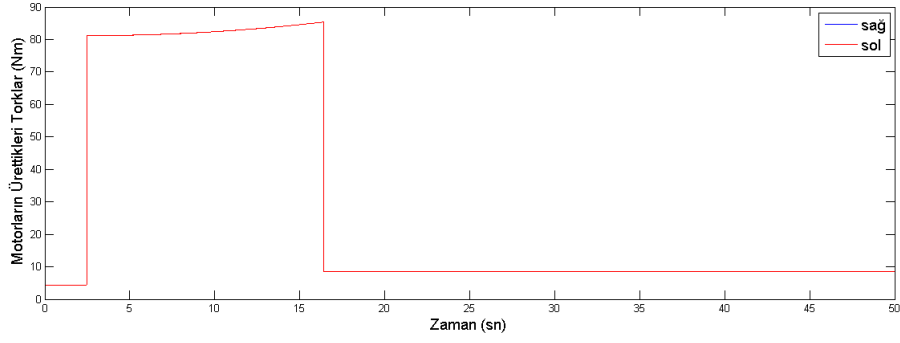
Şekil 4.19 : Uygulanan senaryoya göre motor hızlarındaki değişimler.

Uygulanan senaryoya göre sağ ve sol motor direksiyon kırılana kadar aynı hızda dönmüş, direksiyonun kırıldığı 25.snden itibaren farklı hızlarda dönmeye başlamıştır. Direksiyonun sağa kırıldığı andan itibaren sağ motorun hızı azalırken, sol motorun hızının arttığı Şekil 4.19'da görülmektedir.

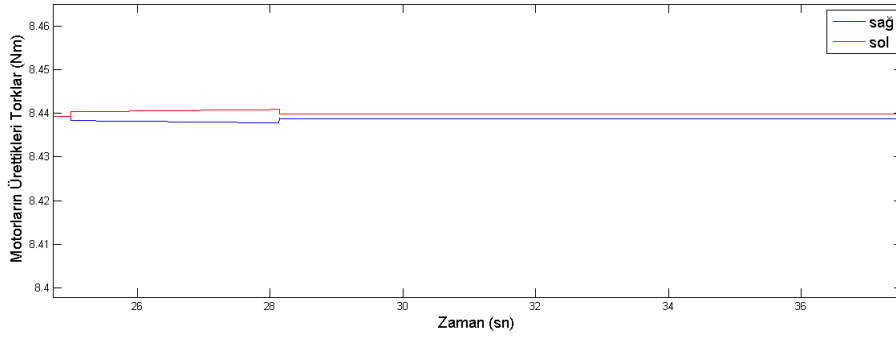


Şekil 4.20 : Uygulanan senaryoya göre tekerlek hızlarındaki değişimler.

Şekil 4.20'de senaryoya göre tekerlek hızlarındaki değişimler rad/s cinsinden görülmektedir. Motor ile tekerlekler arasındaki dişli kutusunun dişli oranından ötürü tekerlek hızları motor hızlarından yaklaşık 2.7 kat daha yavaş dönmektedir.

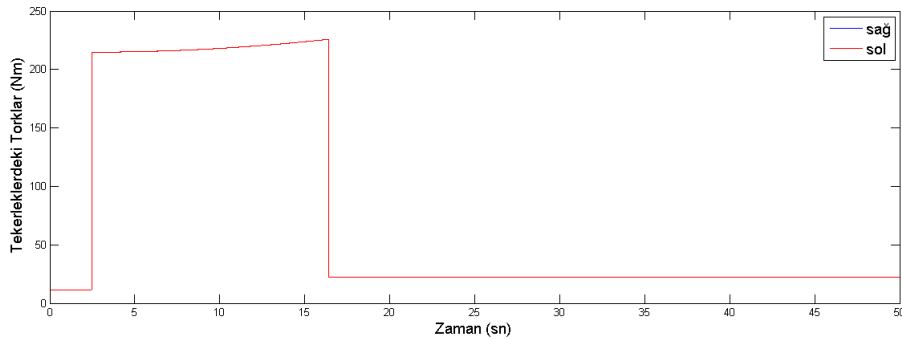


Şekil 4.21 : Uygulanan senaryoya göre motor tork değişimleri.

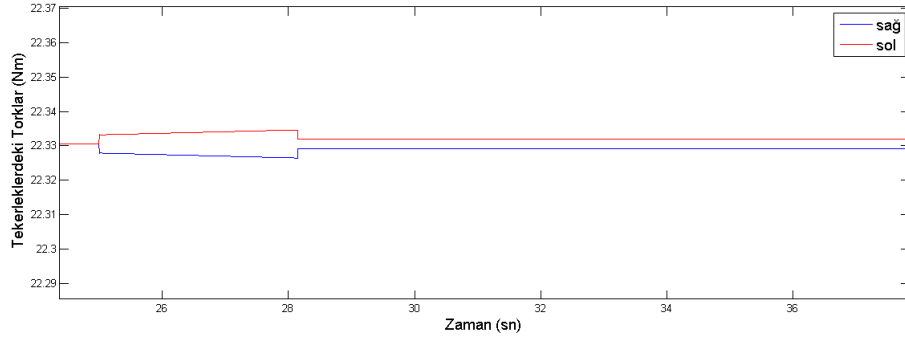


Şekil 4.22 : Uygulanan senaryoya göre motor tork değişimleri.

Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de uygulanan senaryoya göre motorların ürettikleri torklar görülmektedir. Elektronik diferansiyelin dönüş anında iki tekerleğe torkları eşit yada çok az farkla dağıtılmalıdır. Eğer bu koşul sağlanmazsa taşıt yoldan çıkar. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de görüldüğü gibi dönüş senaryosu uygulandığında sağ ve sol motorların ürettikleri torklar neredeyse eşittir. Bu sayede tasarlanan taşıt virajı sorunsuz bir şekilde alır.

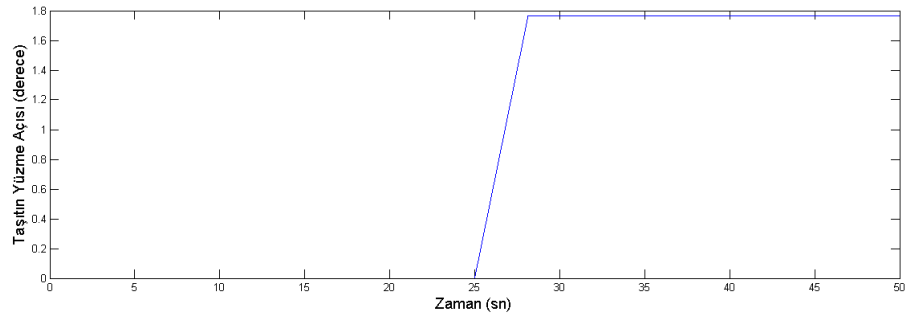


Şekil 4.23 : Tekerleklerdeki torklar.



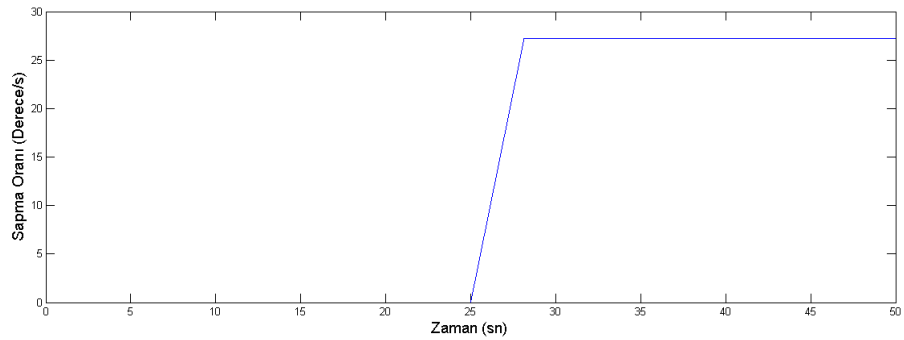
Şekil 4.24 : Tekerleklerdeki torklar.

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de uygulanan senaryoya göre tekerleklerdeki torklar görülmektedir. Motorların ürettikleri torklar motor ile tekerlek arasındaki dişli kutusunun dişli oranı sayesinde tekerleklerle motor torkunun yaklaşık 2.7 katı olarak aktarılır. Bu sayede araca etkiyen boyuna dirençleri yenecek tork değerleri sağlanmış olur.



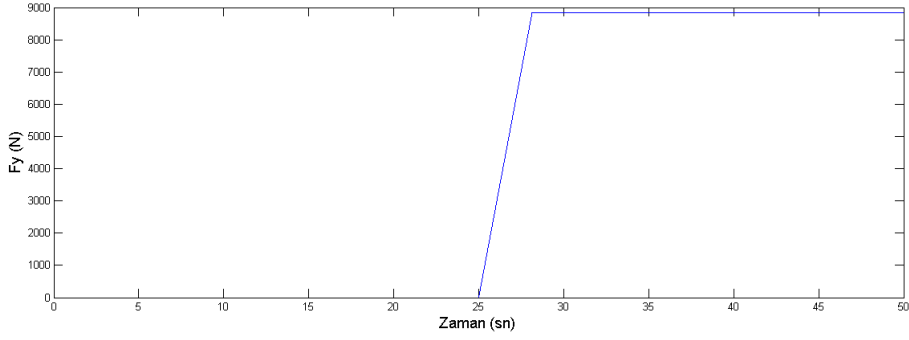
Şekil 4.25 : Dönüş anında taşıtın yüzme açısı.

Şekil 4.25’de dönüş anında aracın yüzme açısı görülmektedir..



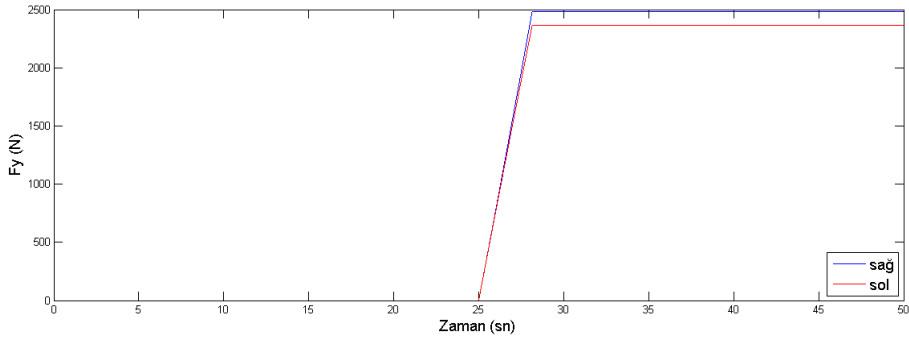
Şekil 4.26 : Viraj anında taşıtın sapma oranı.

Viraj esnasında taşıtın sapma oranı Şekil 4.26’da derece/sn cinsinden görülmektedir.



Şekil 4.27 : Viraj anında taşıta etkiyen yanal kuvvet.

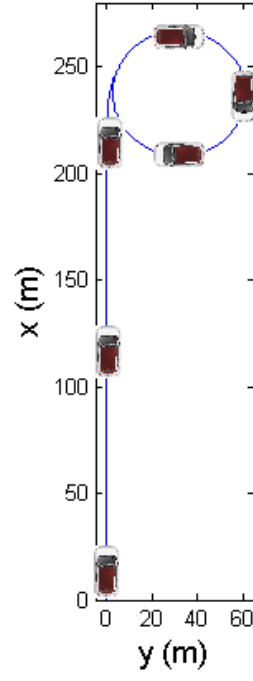
Direksiyon kırılmaya başladığı anda direksiyon açısı 90 dereceye ulaşana kadar taşıta etkiyen yanal kuvvet artar. Direksiyon 90 derecede sabit tutulduğu durumda taşıta etkiyen yanal kuvvet sabittir. Şekil 4.27’de görüldüğü gibi direksiyonun kırıldığı 25. sn den itibaren taşıta etkiyen yanal kuvvet artmış, direksiyon açısı 90 derecede sabitlendiğinde yanal kuvvet sabit bir değere ulaşmıştır.



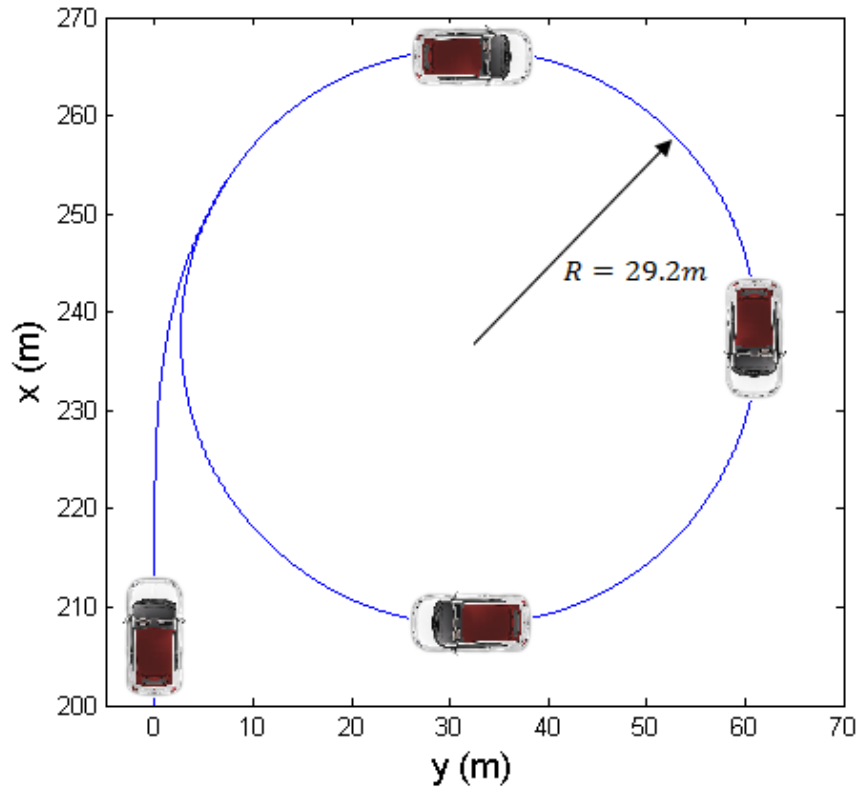
Şekil 4.28 : Viraj anında sağ ve sol arka tekerleğe etkiyen yanal kuvvetler.

Direksiyon kırılmaya başladığı anda direksiyon açısı 90 dereceye ulaşana kadar tekerleklerle etkiyen yanal kuvvetler artar. Direksiyon 90 derecede sabit tutulduğu durumda tekerleklerle etkiyen yanal kuvvetler sabittir. Şekil 4.28’de görüldüğü gibi direksiyonun kırıldığı 25. sn den itibaren arka sağ ve sol etkiyen yanal kuvvetler artmış, direksiyon açısı 90 derecede sabitlendiğinde yanal kuvvetler sabit bir değere ulaşmıştır. Dönüş anında sağ tekerleğe etkiyen yanal kuvvet, sol tekerleğe etkiyen yanal kuvvetten daha fazladır.

Elektronik diferansiyel simulasyonu boyunca taşıtın izlediği yol Şekil 4.29’daki gibidir. Şekil 4.29’da görüldüğü gibi taşıt simulasyonun başlangıcında düz gitmiş belli bir süre sonra taşıtın direksiyonu 90 derece kırılmıştır. Şekil 4.30’da taşıtın viraj anındaki hareketi görülmektedir.



Şekil 4.29 : Taşıtın simulasyon süresince izlediği yol.

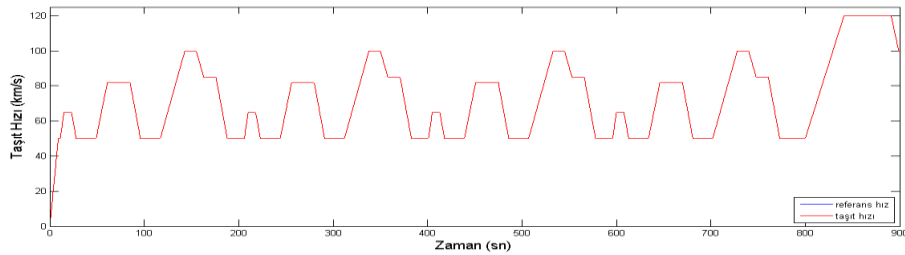


Şekil 4.30 : Simulasyonda taşıtın dönüş anı.

4.3.2 Anahtarlama simülasyon sonuçları

Batarya simülasyonu için hazırlanan senaryoda taşıt 8.9sn'de 50 km/s hıza ulaşmış ardından ulaşılan hıza Yeni Avrupa Seyir Çevrimi (NEDC) eklenmiştir. Bu sayede NEDC'de taşıt hızı belli aralıklarda 0 km/s'te düşerken, hazırlanan senaryoda 50 km/s hıza düşmektedir. Bu sayede aracın bataryalarındaki değişimler daha rahat gözlenmiştir. Simülasyon 15 dakika (900sn) sürmektedir. Oluşturulan senaryoya göre bataryadaki değişimler, motor hızları, motorların ürettikleri torklar, faz akımlarındaki değişimler ve eviricilerin kontrolü için üretilen PWM'ler gözlemlenmiştir. Oluşturulan simülasyonda dolaylı vektör kontrol yöntemi kullanılmıştır.

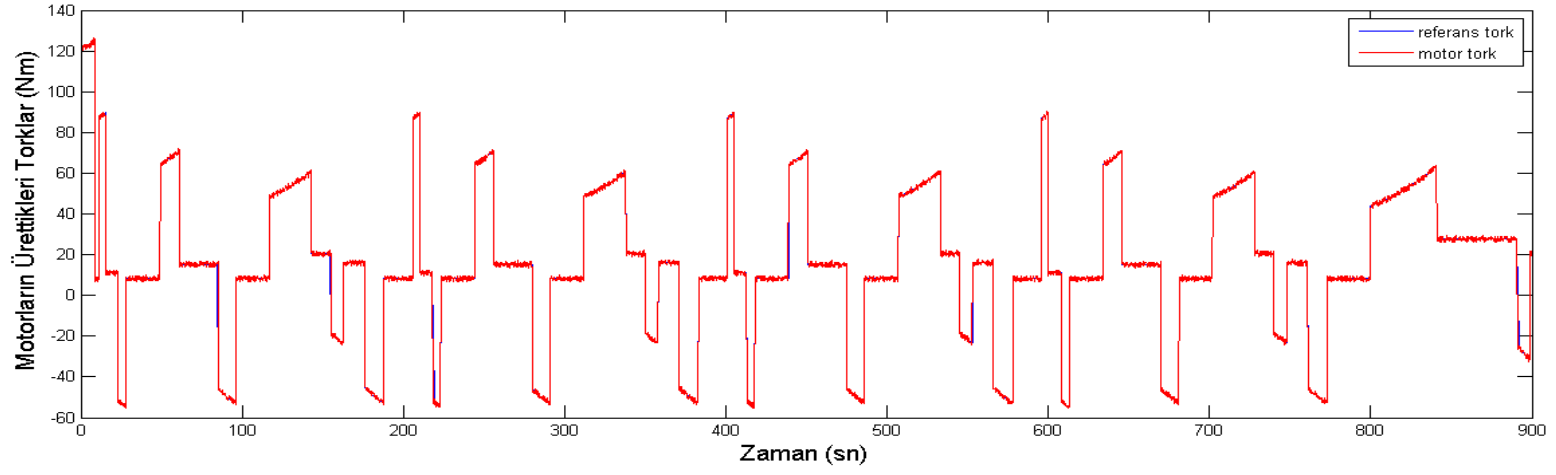
Oluşturulan senaryoya göre taşıt hızının referans hızı takibi Şekil 4.31'deki gibidir. Şekil 4.31'de görüldüğü gibi kullanılan kontrolör sayesinde taşıt hızının referans hızı doğru bir biçimde takip etmektedir.



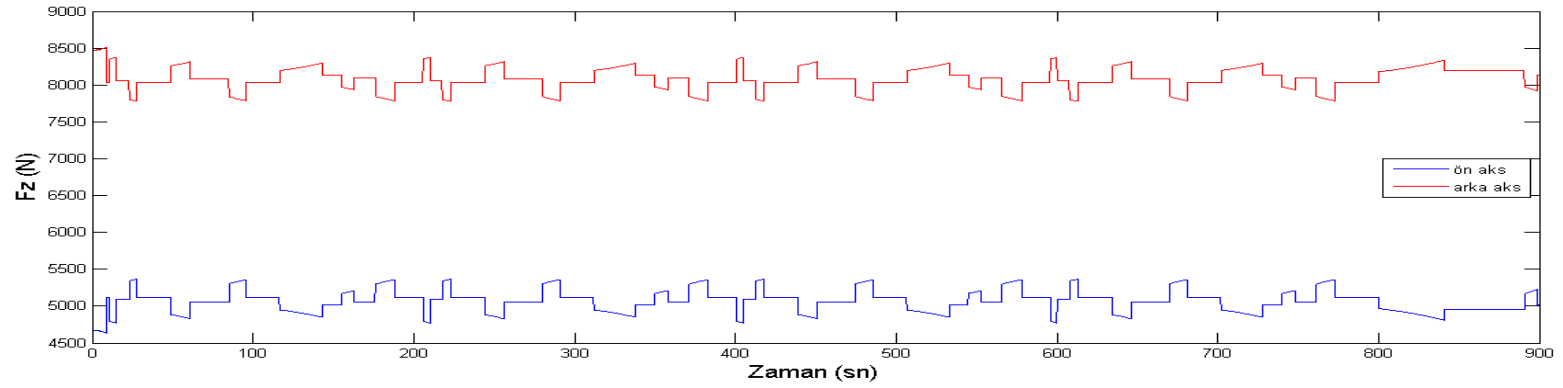
Şekil 4.31 : Taşıt hızının referans hızı takibi.

Motorların ürettikleri torklardaki değişimler Şekil 4.32'deki gibidir. Taşıtta kullanılan motorların uygulanan senaryodaki hızlar ve ivmelenmeler için gerekli torkları üretebildikleri görülmüştür. Taşıtın hızlanma durumunda, ivmelenmeden ötürü torklar yükselmiş, yavaşlama durumunda ise torklar (-) değerdedir.

Oluşturulan senaryodaki hız değişimlerine göre ön ve arka akslara etki eden dikey kuvvetler Şekil 4.33'deki gibidir. Hızlanma anında, ön aksa etki eden dikey kuvvet azalırken arka aksa etkiyen dikey kuvvet artar. Yavaşlama anında ise arka aksa etkiyen dikey kuvvet azalırken, ön aksa etkiyen dikey kuvvet artar.

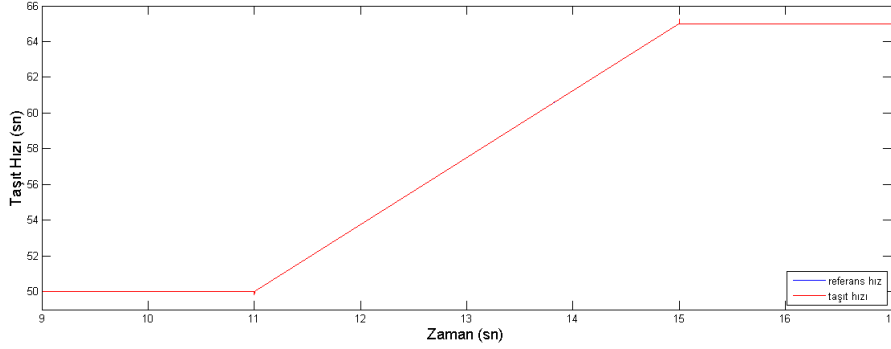


Şekil 4.32 : Motorların ürettikleri torklardaki değişimler.



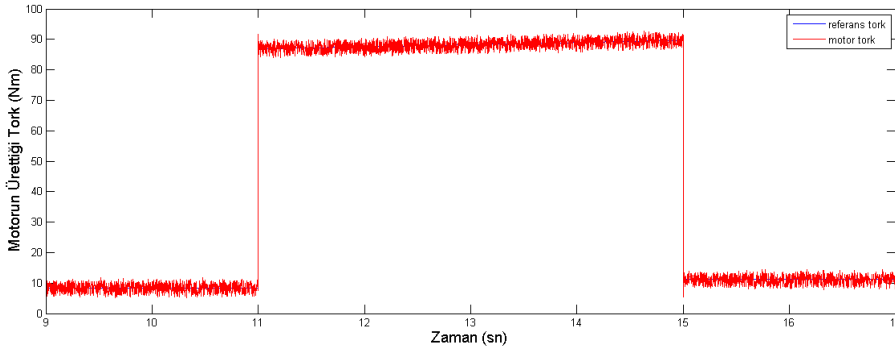
Şekil 4.33 : Hız değişimlerine göre ön ve arka aksa etkiyen dikey kuvvetler.

İvmelenme anında, motorların üretmesi gereken torklar arttığından, motorların faz akımlarında artmalar görülür. Faz akımlarındaki değişimlerin daha rahat gözlemelenebilmesi için belirli bir zaman aralığı incelenmiştir. Şekil 4.34’de seçilen zaman aralığındaki hız değişimi görülmektedir.



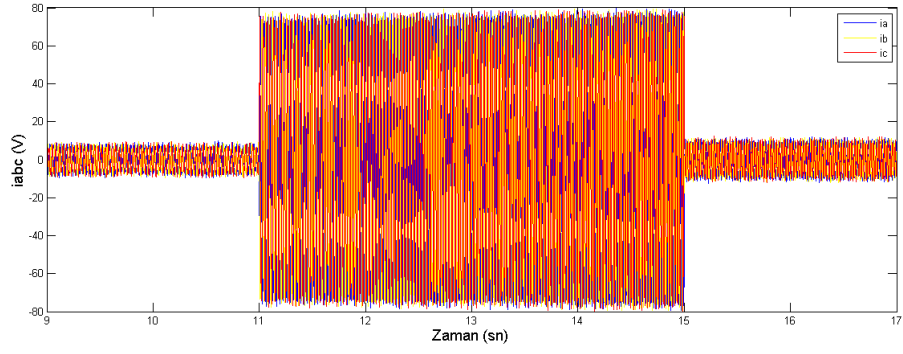
Şekil 4.34 : 9 – 17sn aralığındaki hız değişimi.

Seçilen zaman aralığındaki tork değişimi şekil 4.35’deki gibidir. 11 – 15 sn arasında taşıt hızlandığından ötürü tork değerlerindeki artış açıkça görülmektedir. Taşıt istenen hıza ulaştığında tork değeri 65 km/s sabit hız için gereken tork değerine düşmüştür.



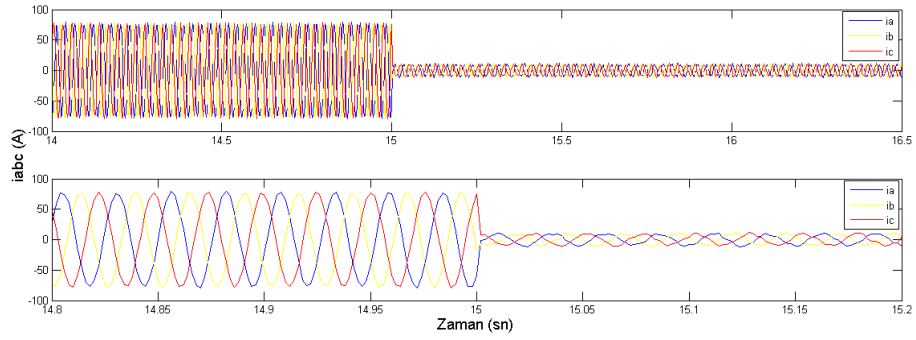
Şekil 4.35 : 9 – 17sn aralığındaki motorların ürettikleri torklar.

Seçilen zaman aralığındaki faz akım değişimleri şekil 4.36’daki gibidir. 11 – 15 sn arasında taşıt hızlandığından ötürü faz akım değerlerindeki artış açıkça görülmektedir. Taşıt istenen hıza ulaştığında faz akımlarındaki değerler 65 km/s sabit hız için gereken akım değerlerine düşmüştür.



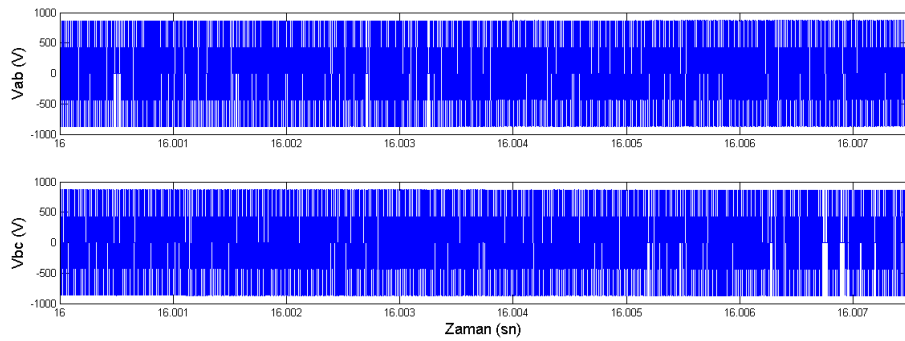
Şekil 4.36 : 9 – 17sn arasında stator faz akım değişimleri.

Şekil 4.37’de zaman aralığı azaltılmıştır. Bu sayede taşıtın hızlandığı durumdaki ve sabit hız durumundaki faz akım değişimleri ve faz akımlarındaki sıra değişimleri açıkça görülmektedir.



Şekil 4.37 : Farklı zaman aralıklarında faz akımlarındaki sıra değişimleri.

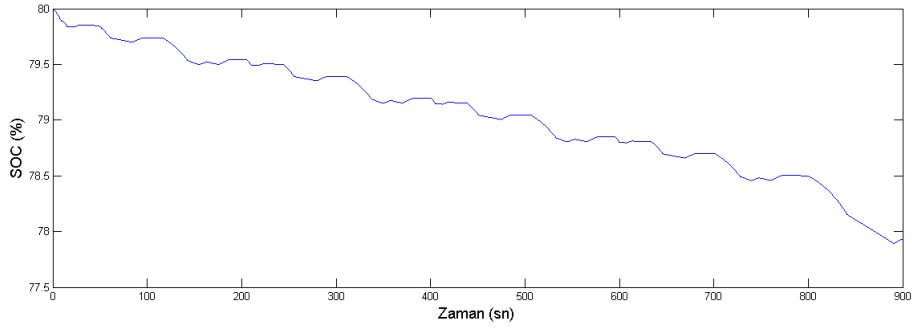
Şekil 4.38’de taşıtın sabit hızla gittiği 16 – 16.01 sn aralığındaki V_{ab} ve V_{bc} gerilimleri görülmektedir. Anahtarlamalardan ötürü faz aralarındaki gerilimlerde anlık değişimler görülmektedir.



Şekil 4.38 : 16 – 16.01 aralığındaki faz gerilimlerindeki değişim.

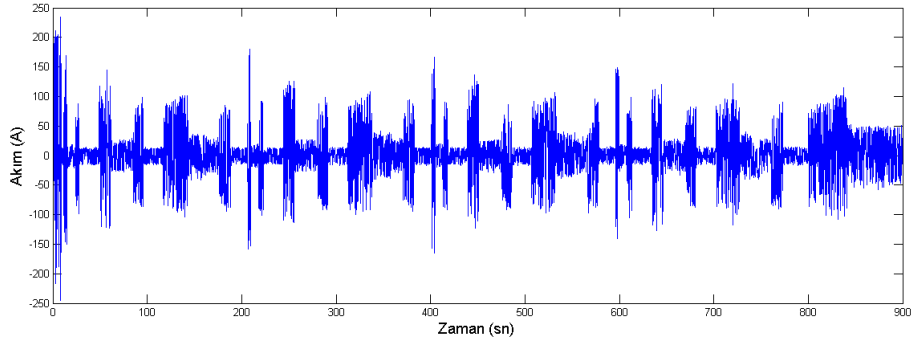
15dk (900sn) boyunca aracın bataryasındaki şarj miktar değişimi Şekil 4.39’daki gibidir. Taşıtın hızlandığı ve sabit hızla ilerlediği anlarda batarya şarj miktarı

azalmış, taşıt frenlemeğe başladığında bataryalardaki şarj miktarında artmalar görülmüştür.



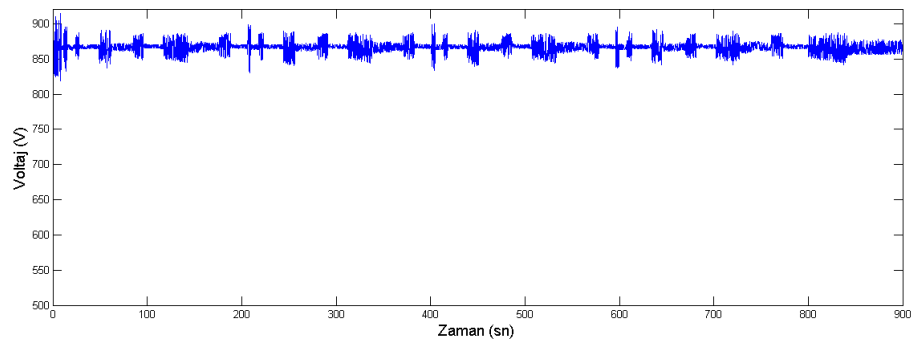
Şekil 4.39 : Simulasyon boyunca batarya şarj yüzdesindeki değişim.

Şekil 4.40’da simulasyon süresinde bataryadaki akım değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.40 : Simulasyon boyunca bataryadaki akım değişimleri.

Şekil 4.41’de simulasyon süresince bataryalardaki voltaj değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.41 : Simulasyon boyunca bataryadaki gerilim değişimleri.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, aracın arka iki tekerleği yerine konumlandırılmış iki adet elektrik motoruna sahip elektrikli taşıt için elektronik diferansiyel tasarlanmış ve elektrik motorlarının kontrolü başarı ile gerçekleştirilmiştir.

Gücünün tümünü bataryalardan sağlayan %100 Elektrikli taşıtın mekanik ve elektrik kısımlarının modellemesi yapılmıştır. Modelleme ve simulasyon için Matlab/Simulink programı kullanılmıştır. Taşıtta elektrik motoru olarak Sabit Mıknatıslı Senkron Motor kullanılmış ve motor kontrolü için vektör kontrol yöntemi kullanılmıştır.

Tez için elektronik diferansiyel ve anahtarlama kontrol olmak üzere iki ayrı simulasyon hazırlanmıştır. Hazırlanan elektronik diferansiyel simulasyonunda; kontrol sisteminde evirici olmadan, anahtarlama $\alpha\beta$ yöntemi kullanılarak yapılmış; viraj anındaki taşıtın sağ ve sol motorlarındaki hız ve tork değişimleri, taşıtın sağ ve sol tekerleklerindeki hız ve tork değişimleri, aracın sapma oranı ve aracın savrulma açısı gözlenmiştir. Viraj anında arka iki tekerleğin farklı hızlarda döndüğü ve tork değerlerinin neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Anahtarlama kontrol simulasyonunda; simulasyon evirici ve batarya kullanılarak anahtarlama olarak yapılmıştır ve motor hızları, motorların ürettikleri torklar, stator faz akımlarındaki değişimler, faz gerilimlerindeki değişimler ve bataryadaki değişimler gözlemlenmiştir. Simulasyon için hazırlanan senaryoda, taşıt yaklaşık 8.9sn'de 50 km/s hıza ulaşmış ardından ulaşılan hıza Yeni Avrupa Seyir Çevrimi (NEDC) eklenmiştir. Bu sayede NEDC'de taşıt hızı belli aralıklarda 0 km/s'te düşerken, hazırlanan senaryoda 50 km/s hıza düşmektedir. Bu sayede aracın bataryalarındaki değişimler daha rahat gözlenmiştir. Simulasyon 15 dakika (900sn) sürmektedir. Simulasyon kullanılan kontrolör sayesinde motorların referans hızı sorunsuz izlediği, motorların ürettikleri tork değerlerinin referans torku çok az salınımla takip ettiği, anahtarlamalardan ötürü faz akımları ve faz gerilimlerindeki değişimler ve bataryadaki sarj yüzdesi değişimi, akım değişimleri ve gerilim değişimleri

görülmüştür. Elde edilen sonuçlar 4. Bölümde, simulasyon sonuçları kısmında görülmektedir.

Tezde kullanılan PI kontrolörler simulasyon için yeterlidir ancak gerçekte beklenilenden geç tepki verebilir bu yüzden kontrol için daha hızlı tepki veren bir kontrolör tasarlanabilir. Tasarlanan elektronik diferansiyel sistemi, viraj anında simulasyondaki gibi tekerleklerin kaymadan döndüğü durumlarda yeterlidir. Ancak taşıt gerçekleştirildiğinde tekerleklerdeki kaymaları kontrol edecek bir çekiş kontrol sisteminin taşıta eklenmesi gerekmektedir. Gelecek çalışmalarda, mevcut modeldeki elektrik motorlarına ek olarak taşıtın ön tekerlekleri yerine de iki adet elektrik motoru konumlandırılabilir. Bu sayede dört tekerlekten çekiş sağlanmış olur. Ayrıca motor kontrolünde daha farklı kontrol yöntemleri denenebilir. Örneğin, vektör kontrol yerine doğrudan moment kontrolü kullanılıp sonuçlar karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Kuralay, N. S.** (2008). Motorlu Taşıtlar, Temel ve Tasarım Esasları, Yapı Elemanları, Makine Mühendisleri Odası Yayınları, MMO/2008/484, İzmir.
- [2] **Rajamani, R.** (2006). Vehicle Dynamics and Control, Springer, Minneapolis, Minnesota.
- [3] **Jazar, R. N.** (2008). Vehicle Dynamics Theory and Application, Springer.
- [4] **Gillespie T. D.** (1992). Fundamentals of Vehicle Dynamics, Vol. 114. SAE Technical Paper, 1992
- [5] **Krishnan R.** (2010). Permanent Magnet Synchronous and Brusless DC Motor Drives, CRC Press.
- [6] **Sarioğlu M. K., Gökaşan M. ve Boğosyan S.** (2003). Asenkron Makinalar ve Kontrolü, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [7] **Bodur H.** (2012). Güç Elektroniği, Temel Analiz ve Sayısal Uygulamalar, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [8] **Guillermo A. Magall'an, Cristian H. De Angelo, Guillermo Bisheimer ve Guillermo Garcia** (2008). A Neighborhood Electric Vehicle with Electronic Differential Traction Control. *Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE*, 10-13 Kasım 2008
- [9] **Kahveci H., Okumuş H. İ. ve Ekici M.** (2013). An Electronic Differential System Using Fuzzy Logic Speed Controlled In-wheel Brushless DC Motors. *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013 Fourth International Conference on*, 13-17 Mayıs 2013
- [10] **Bahri A., Gupta A. ve Daya F. JL.** (2014). Performance Enhancement of Electronic Differential in Electric Vehicles Using a Novel Wavelet Controller. *Vehicular Electronics and Safety (ICVES), 2014 IEEE International Conference on*, 16-17 Aralık 2014
- [11] **Wan R., Liu G., zhang D. ve Gong W.** (2013). A Fault-Tolerant Electronic Differential System of Electric Vehicles. *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2013 IEEE*, 15-18 Ekim 2013
- [12] **Hartani K., Miloud Y. ve Miloudi A.** (2010). Electric Vehicle Stability with Rear Electronic Differential Traction. *EFEEA'10 International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications*, 2-4 Kasım 2010
- [13] **Vitols K. ve Galkin I.** (2012). Analysis of Electronic Differential for Electric Kart. *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC), 2012 15th International*, 4-6 Eylül 2012.

- [14] **Zhai L. ve Dong S.** (2011). Electronic Differential Speed Steering Control for Four in-wheel Motors Independent Drive Vehicle. *Intelligent Control and Automation (WCICA), 2011 9th World Congress on*, 21-25 Haziran 2011
- [15] **Zhou Y., Li S., Zhou X. ve Fang Z.** (2010). The Control Strategy of Electronic Differential for EV with Four in-wheel Motors. *Control and Decision Conference (CCDC), 2010 Chinese*, 26-28 Mayıs 2010
- [16] **Li G., Hong W., Zhang D. ve Zong C.** (2012). Research on Control Strategy of Two Independent Rear Wheels Drive Electric Vehicle. *2012 International Conference on Applied Physics and Industrial Engineering, Physics Procedia Volume24, PartA*, 2012 sf. 87-93
- [17] **Haddoun A., Benbouzid M. E. H., Diallo D., Abdessemed R., Ghouili J. ve Srairi K.** (2010). Design and Implementation of an Electric Differential for Traction Application. *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE*, 1-3 Eylül 2010
- [18] **Kuralay, N. S.** (2013). Motorlu Taşıtlarda Hibrit Tahrik, Makine Mühendisleri Odası Yayınları, MMO/598
- [19] **Atabay, O.** (2014). İTÜ MAK654E Vehicle Control Systems 2013-2014 Bahar Yarıyılı Ders Notları
- [20] **Faiz, J. ve Shahgholian G.** (2009). Modeling and Simulation of Three-phase Inverter with Rectifier-type *Nonlinear Loads*. *Armenian Journal of Physics*, 2009, vol. 2, issue 4, pp. 307-316
- [21] **Larmimie, J., Lowry, J.** (2012). Electric Vehicle Technology Explained Second Edition, Wiley.
- [22] **Korkmaz Y. ve Korkmaz F. Haddoun** (2008). Doğrudan Moment Denetimi Yöntemiyle Denetlenen Asenkron Motor ve Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Performanslarının Karşılaştırılması. *Politeknik Dergisi*, Cilt: 11, Sayı: 4, s.293-298, 2008
- [23] **Url-1** <<http://www.edy.es/dev/docs/pacejka-94-parameters-explained-a-comprehensive-guide/>>, alındığı tarih: 02.05.2015.
- [24] **Url-2** <<http://sutechcanada.com/shop/33-inch-walk-behind-parts/gears/>>, alındığı tarih: 02.05.2015.
- [25] **Url-3** <<http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/asenkron-motorlar-1-bolum/12177#ad-image-0>>, alındığı tarih: 02.05.2015.
- [26] **Url-4** <<http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/senkron-motorlar/12285#ad-image-0>>, alındığı tarih: 02.05.2015.
- [27] **Url-5** <<https://prezi.com/efu7x7sa3rre/dogrudan-yol-vermeli-sabit-mknatsl-senkron-motorlarn-yaplarinn-incelemesi>>, alındığı tarih: 02.05.2015.
- [28] **Url-6** <<http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>>, alındığı tarih: 02.05.2015.
- [29] **Url-7** <<http://www.2jsautomotive.com/wp-content/uploads/2011/12/rear-differential.jpg>>, alındığı tarih: 02.05.2015.

[30] **Url-8** <http://www.otam.com.tr/Dosyalar/Bultenler/Tr/doc12_06_2013_09_54_24_OTAM%20BULTEN-MAYIS-2013.pdf>, alındığı tarih: 02.05.2015.

EKLER

EK A.1: Kullanılan örnek taşıtın parametreleri

EK A.2: Kullanılan SMSM'lerin Parametreleri

EK A.3: Kullanılan Bataryaların Parametreleri

EK A.1



Çizelge A.1 : Kullanılan örnek taşıtın parametreleri.

Kullanılan örnek taşıtın parametreleri	
Uzunluk	3546 mm
Genişlik	1627 mm
Yükseklik	1488 mm
Ön İz genişliği	1413 mm
Arka İz genişliği	1407 mm
Aks Aralığı	2300 mm
c_d (rüzgar direnci katsayısı)	0.32
Ağırlık	1340 kg
Lastikler	185/55 R 15
Tekerlek yarıçapı	0.2925 m
Motor Gücü	80 kW
Maksimum Taşıt Hızı	122.5 km/s
Maksimum Tork	252 Nm
Dişli Oranı	2.7
Dişli Kutusu Verimi	%98

EK A.2

Çizelge A.2 : Kullanılan SMSM'lerin parametreleri.

Kullanılan SMSM'lerin parametreleri	
Güç	40 kW
Tork	126 Nm
Ld	0.0006033 H
Lq	0.0006668 H
Lamda	0.192 Vs
p	4 çift
R	0.05 ohm
J	0.0011 kgm^2
B	0.001889 Nms

EK A.3

Çizelge A.3 : Kullanılan Bataryaların parametreleri.

Kullanılan bataryaların parametreleri	
Kullanılan Batarya Cinsi	Lityum - İyon
Kullanılan Batarya Adeti	243 adet 3.3V Batarya
Nominal Votaj	$801.9V = (560\sqrt{2} + 3.3 * 3)$
Batarya Sarj Kapasitesi	40Ah
Başlangıç Saj Durumu	%80
Deşarj Akımı	[1,5 3]A
Batarya Tepki Süresi	30sn

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Melih GÜRMERİÇ
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa – 26/06/1987
E-Posta : melihgurmeric@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, Bahçeşehir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekatronik Mühendisliği

