

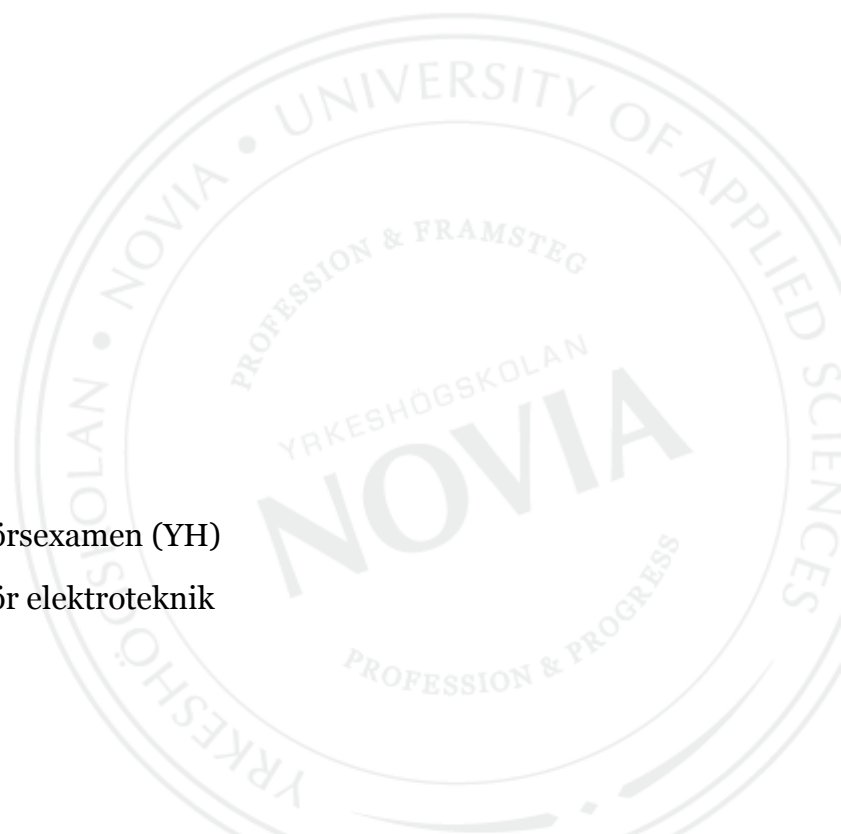
# **Modellering och simulering av framdrivningssystem för elektriska fordon**

Rodney Tuure

Examensarbete för ingenjörsexamen (YH)

Utbildningsprogrammet för elektroteknik

Vasa 2012



## EXAMENSARBETE

Författare: Rodney Tuure  
Utbildningsprogram och ort: Elektroteknik, Vasa  
Inriktning/alternativ/Fördjupning: Automationsteknik  
Handledare: Roger Mäntylä

Titel: *Modellering och simulering av framdrivningssystem för elektriska fordon*

---

15 april 2012

35 sidor

8 Bilagor

---

### Abstrakt

För att minska människans användning av fossila bränslen så forskas det mycket i att hitta alternativa lösningar. En lösning till detta skulle vara att man använder en helt elektrisk lösning för framdrivningen av de fordonen som används. Det här är ingen ny lösning men det är först nu som den har blivit intressant att använda, eftersom teknologin inom detta har gjort stora framsteg. Största hindret i dagens läge är energikällan som ska försörja fordonet med den energi som behövs.

Detta examensarbete består av en teoretisk del och en praktisk del. Syftet med examensarbetet var att skapa en simuleringsmodell av framdrivningssystem för elektriska fordon. Detta gjordes med hjälp av MATLAB och Simulink, vilket krävde undersökning av olika teknologier och komponenter som finns tillgängliga och som används i elektriska fordon idag. Fördelarna och nackdelarna med dessa teknologier och komponenter beskrivs. Målet var att få fungerande modeller med olika typer av elmotorer och batterityper som används i dagens elfordon. Examensarbetet resulterade i två fungerande simuleringsmodeller för simulering av framdrivningssystemet för ett elektriskt fordon.

---

Språk: svenska    Nyckelord: elektriska fordon, MATLAB, Simulink

---

Tillgängligt: I Theseus.fi eller vid Tritonia, Vasa vetenskapliga bibliotek.

## BACHELOR'S THESIS

Author: Rodney Tuure  
Degree program: Electrical engineering, Vaasa  
Specialization: Automation technology  
Supervisor: Roger Mäntylä

Title: *Modeling and simulation of propulsion system for electric vehicles*

---

15 April 2012

35 pages

8 appendices

---

### Abstract

To reduce the use of fossil fuels a lot of research is carried out to find alternative solutions. One solution would be to use a completely electric solution for the propulsion of the vehicles used today. This is not a new solution, but it is getting more interesting because of the progress that has been made in the technology used today. The biggest obstacle is the energy source that is needed to provide the vehicle with the necessary energy.

My thesis consists of a theoretical and a practical part. The purpose is to create a simulation model of the propulsion system for electric vehicles. This was done by using MATLAB and Simulink, which required examining the different technologies and components available and used in electric vehicles today. The advantages and disadvantages of these technologies and components are described in this thesis. The goal is to make working models of different types of electric motors and battery types used in today's electric vehicles. The thesis resulted in two functional simulation models for the simulation of the propulsion system for an electric vehicle.

---

Language: Swedish      Key words: electric vehicles, MATLAB, Simulink

---

Filed at: Theseus.fi or Tritonia, Academic library of Vaasa.

# Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	EPS .....	1
1.1.1	EPS hösten 2011 .....	1
1.2	Syfte .....	2
2	Vad är ett elektriskt fordon? .....	2
3	Elektriska fordonets komponenter .....	3
3.1	Batterityper .....	3
3.1.1	Blybatteriet .....	4
3.1.2	Nickel-metallhydrid.....	4
3.1.3	Litium-jon .....	4
3.1.4	Litium-polymer .....	5
3.1.5	Natrium-svavel .....	5
3.1.6	Natrium-metall-klorid .....	5
3.2	Elmotorer .....	6
3.2.1	Likströmsmotor (DC motor) .....	7
3.2.2	Induktionsmotor .....	8
3.2.3	Permanentmagnetmotor (PM).....	9
3.3	Motorstyrning.....	10
3.3.1	Frekvensstyrning.....	10
3.3.2	Vektorstyrning.....	11
3.3.3	Direkt momentreglering (DTC).....	11
4	Simulink .....	13
4.1	SimPowerSystems.....	13
4.2	SimMechanics .....	13
5	Simuleringsmodeller.....	14
5.1	BLDC-motor drive .....	15
5.1.1	Broms-chopper.....	16
5.1.2	Trefasinverter .....	16
5.1.3	Hastighetsregulator .....	16
5.1.4	Strömregulator .....	17
5.1.5	PM BLDC-motormodell .....	19
5.2	DTC-induktionsmotor drive.....	20
5.2.1	Hastighetsregulator .....	20
5.2.2	DTC-enhet.....	21
5.2.3	Induktionsmotormodell.....	22
5.3	Batterimodell .....	24

6	Simuleringar .....	27
6.1	Simulering med BLDC-motor drive.....	27
6.2	Simulering med DTC-induktionsmotor drive.....	28
6.3	Batteriurladdning för simulationerna.....	28
7	Resultat .....	30
8	Diskussion .....	31
	Källförteckning .....	33
	Bilagor .....	35

# 1 Inledning

Detta examensarbete började som en del i EPS-projektet vid Yrkeshögskolan Novia hösten 2011. Eftersom jag var i slutskedet av mina studier och sökte ett examensarbete så tyckte jag att detta skulle vara en intressant och lärorik sak att göra ett examensarbete om.

I dagens läge är det väldigt populärt att minska på utsläpp och föroreningar, för att minska människans påverkan på naturen. Därför forskas det mycket i att få mera hållbara lösningar. Ett område är att byta ut de fossila bränslena som används i dagens fordon mot ett mera miljövänligt alternativ. Ett alternativ som det forskas mycket i är att byta ut det fossila bränslet som används i dagens fordon till drift med en elektrisk lösning.

## 1.1 EPS

Europeiska projektledningsprogrammet (EPS) bedrivs i 11 europeiska universitet i 10 länder runt om i Europa och det riktar sig till studeranden som studerar tredje eller fjärde året. EPS är skapat speciellt för ingenjörsstuderanden, men också andra kan delta. (10)

Detta program är utformat för att det skall motsvara de krav som ställs på en ingenjör och därigenom förbereda studerande för de utmaningar och krav som ställs i dagens tekniska och ekonomiska värld. (10)

Studerandena arbetar i internationella grupper av 2 till 10 studeranden. Vissa projekt görs i samarbete med kommersiella företag och industrier, andra projekt är mer akademiska. Studerandena lär sig att ta ansvar för sitt lärande, sitt projektarbete och de utvecklar sin interkulturella kompetens, deras förmåga att kommunicera och deras personliga kompetens. (7)

### 1.1.1 EPS hösten 2011

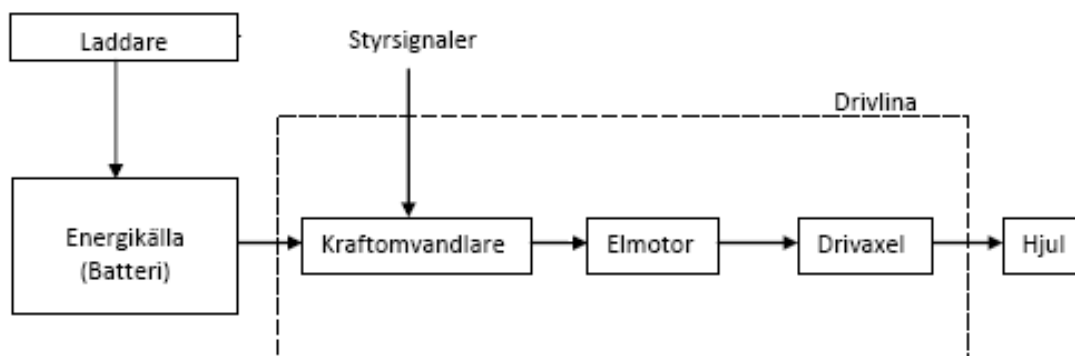
Projektets mål vara att forska och utveckla en lösning till ett föroreningsfritt mångfunktionsfordon som går att använda både inomhus och utomhus. Projektägaren var ett lokalt företag i Österbotten. I projektet forskades det bl.a. om olika sorters energikällor, miljöpåverkan och olika fordonslösningar. Projektet var indelat i tre faser: förundersökningsfas, lösnings- och innovationsfas och dokumentationsfas.

## 1.2 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att skapa en simuleringsmodell för framdrivningen av ett elektriskt fordon i MATLAB:s Simulink. För att göra detta krävdes att det undersöktes vilka olika teknologier och komponenter som finns tillgängliga och som används i ett elektriskt fordon idag. Vilka fördelar och nackdelar dessa teknologier och komponenter har beskrivs också i detta examensarbete. Målet är att få fungerande modeller med olika typer av elmotorer och batterityper som används i dagens elfordon. Som mål är också att ha en klar motivering till varför dessa olika komponenter och teknologier har valts.

## 2 Vad är ett elektriskt fordon?

Ett elektriskt fordon (EV) är ett fordon som har följande egenskaper. För det första är energikällan portabel och elektrokemisk eller elektromekanisk till dess natur, t.ex. ett batteripaket. För det andra kommer framdrivningskraften från en eller flera elmotorer. Figur 1 visar ett blockdiagram över hur ett elektriskt fordon kan vara uppbyggt. Drivlinan i ett elektriskt fordon innehåller både elektriska och mekaniska komponenter. De elektriska komponenterna beskrivs i detalj i nästa kapitel. (13)



Figur 1. Elektriskt fordonssystem.

Ett batteridrivet elektriskt fordon fungerar på följande sätt. Batteriet tillför energi till systemet och denna energi styrs med hjälp av kraftomvandlaren. Kraftomvandlaren kontrollerar elmotorns rotationshastighet och rotationsriktning, beroende på gas- och bromspedalens läge. Elmotorn omvandlar den elektriska energin till mekanisk kraft som driver fordonet.

### 3 Elektriska fordonets komponenter

Huvudkomponenterna i ett elektriskt fordon är energikälla, kraftomvandlare, elmotor och kraftelektronik. Valmöjligheterna till dessa olika komponenter finns beskrivna i detta kapitel. Motiveringar till varför olika delar valdes finns också med i detta kapitel.

#### 3.1 Batterityper

Blybatteriet har varit med längst av alla batterityper och används i golfbilar, passagerarbilar i flygplatser och i gaffeltruckar. Men det här batteriet har lägre specifik energi (Wh/Kg) än flera andra batterityper. De huvudsakliga batterityperna som är tänkbara att används i elektriska fordon idag är nickel-metallhydrid (NiMH), litium-jon (Li-jon), litium-polymer (Li-poly) och natrium-metall-klorid. Litium-jon teknologin ser ut att vara den mest lovande av dessa fyra typer. Det finns flera olika typer av litium-jon batterier som är under utveckling för elektriska fordon. (14)

Tidigare användes också Nickel-kadmium (NiCd) batterier, men dessa används inte nuförtiden, eftersom kadmium är en tungmetall som är skadlig för både människan och miljön om den kommer ut i naturen. I Tabell 1 finns de olika elektriska egenskaperna som olika batteriteknologier har. Livslängden i tabellen är antalet fullständiga uppladdningar och urladdningar batteriet har innan dess nominella kapacitet faller under 80 % av den ursprungliga kapaciteten. (8)

Tabell 1. Egenskaper hos elektriska fordonsbatterier.

Batterityp	Specifik Energi (W h/Kg)	Specifik Kraft (W/Kg)	Energi Verkningsgrad (%)	Livslängd (ggr)
Bly batteri	35-50	150-400	80	500-1000
Nickel-kadmium	30-50	100-150	75	1000-2000
Nickel-metallhydrid	60-80	200-400	70	1000
Aluminium-luft	200-300	100	<50	Inte tillgängligt
Zink-luft	100-220	30-80	60	500
Natrium-svavel	150-240	230	85	1000
Natrium-metall-klorid	90-120	130-160	80	1000
Li-poly	150-200	350	Inte tillgängligt	1000
Li-jon	90-160	200-350	>90	>1000

(14)



I dagens utveckling av batterier fokuseras det på att övervinna de praktiska problemen och att förbättra tillverkningsprocessen. De teoretiskt uppskattade värdena är svåra att uppnå på grund av praktiska begränsningar i tillverkningen av batterier. (14)

### **3.1.1 Blybatteriet**

Blybatteriet var det populäraste valet när utvecklingen av elektriska fordon började. Det som är bra med blybatteriet är att de är lätt att tillverka, relativt billiga och råmaterialet som används i dem är lätt tillgängligt (4). Nackdelarna är att de blir väldigt stora och tunga på grund av deras lägre specifik energi (Wh/Kg) jämfört med andra batteriteknologier. De fungerar dåligt vid låga temperaturer och måste laddas ofta för att inte urladdas helt. (16)

### **3.1.2 Nickel-metallhydrid**

Nickel-metallhydridbatteriet har liknande egenskaper som nickel-kadmium, men det innehåller inte det giftiga ämnet kadmium och det har högre specifik kraft (W/kg). Komponenterna i NiMH-batterierna är återvinningsbara. Fördelarna med batteriet är att det har bra livslängd, är säkert och robust. Nackdelarna är att det är dyrt, kräver kylning eftersom det blir varmt när det urladdas och har en relativt hög självurladdningsgrad. NiMH har goda förutsättningar att klar sig bra som laddningsbart batteri för framdrivning av elektriska fordon. Den största konkurrenten är litium-jon batteriteknologin. (14)

### **3.1.3 Litium-jon**

Litium-jonbatteriet används i bärbara datorer och i mobiltelefoner, men har också de rätta egenskaperna för att användas i elfordon. Fördelarna med litium-jon är att de har väldigt hög specifik energi, presterar bra även vid höga temperaturer och har låg självurladdningsgrad. Komponenterna i litium-jonbatteriet är också återvinningsbara. De största nackdelarna med litium-jonbatteriet är att det är väldigt känsligt för överspänningar och för att laddas ur för mycket. Överspänning i cellerna vid laddning och överdriven urladdning kan leda till att cellerna i batteriet förstörs eller till och med börjar brinna. Därför behövs ett pålitligt styrsystem till den här typen av batteripaket. (14)

### **3.1.4 Litium-polymer**

Litium-polymerbatteriet klassas som ett batteri av fast tillstånd. Detta betyder att elektrolyten i cellerna inte är i flytande form, utan i fast form. Den tunna formen på litium-polymercellerna gör att det går att forma batteripaketen för att passa det lediga utrymmet i fordonets chassi. Att elektrolyten är i fast form är bättre än ett batteri med elektrolyten i flytande form, eftersom den flytande elektrolyten oftast är brandfarlig. Därför är denna batteriteknologi säkrare. Den största nackdelen med litium-polymer är att cellerna i batteriet har en arbetstemperatur mellan 80-120°C. (14)

### **3.1.5 Natrium-svavel**

Natrium-svavelbatteriet (NaS) har varit ett intressant val tack vare att både natrium och svavel är billig och lätt tillgänglig. Dock har den här batteriteknologin flera nackdelar. Cellerna opererar på väldigt hög temperatur, omkring 300 °C, vilket medför att det behövs bra isolering och en termisk styrenhet. Denna teknologi mer eller mindre övergavs när natrium-metall-klorid teknologin etablerades. (14)

### **3.1.6 Natrium-metall-klorid**

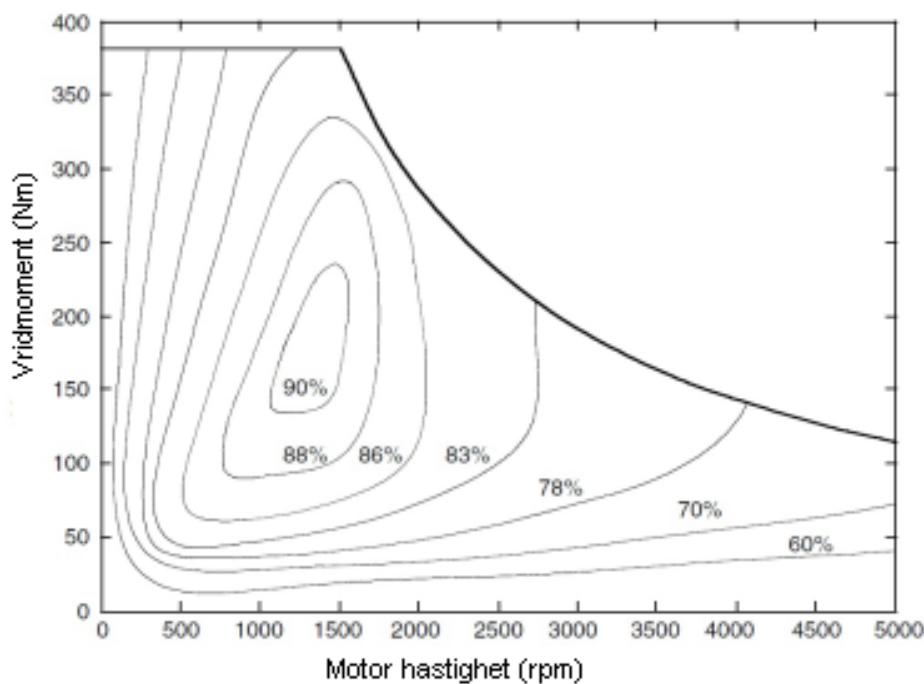
Natrium-metall-kloridteknologin kom till tack vare natrium-svavelteknologin. Denna teknologi är en vidareutveckling av natrium-svavel teknologin. Den har också den höga arbetstemperaturen i cellerna men är lättare att kontrollera. Batteriteknologin är allmänt känt som ZEBRA-batterier. Batteriet har bevisats vara säkert i alla förhållanden. ZEBRA-batteriet har hög potential för att användas i elektriska fordon och det har gjorts flera olika testprogram med dessa. (14)

## 3.2 Elmotorer

De elmotorer som används i elfordon omvandlar den elektriska energin till mekanisk energi för att driva fordonet eller för att bromsa fordonet regenerativt. De kan också användas för att generera el för att t.ex. ladda batteriet. Till skillnad från elmotorer som används i industriella tillämpningar kräver dessa motorer att det är möjligt att starta och stanna dem ofta, samt att de har snabb acceleration/retardation och ett högt vridmoment. (9)

De elmotorer som valts att beskrivas i detta examensarbete är likströmsmotorer, induktionsmotorer och permanentmagnetmotorer. Detta för att dessa är de vanligaste typerna som används i dagens elfordon.

Effektiviteten hos elmotorer varierar beroende på var i vridmoment/hastighetsplanet motorn opererar. Se figuren nedan.



Figur 2. Elmotorns verkningsgrad (9).

### 3.2.1 Likströmsmotor (DC motor)

Framtill 1980-talet var likströmsmotorn (borstad) det självklara valet när hastighet eller vridmoments reglering användes. Efter det har induktionsmotor tagit över mer och mer. DC-motorn finns i storlekar från några watt upp till flera megawatts uteffekt. (9)

Det finns många olika typer av elmotorer, men den som är lättast att förstå sig på är likströmsmotorn med borstar. Den här typen av elmotor används i många olika apparater idag, så som portabla verktyg, leksaker, elektriska fönsterhissen i bilar och även i små hushållsapparater, som t.ex. hårfönen. De används fortfarande för framdrivningen av elfordon, men de motorer som beskrivs längre fram i examensarbetet används allt oftare för denna typ av applikation. Det är bra att inledningsvis förklara den borstade likströmsmotorn, eftersom motorstyrningen är lättare att förklara och att förstå. (16)

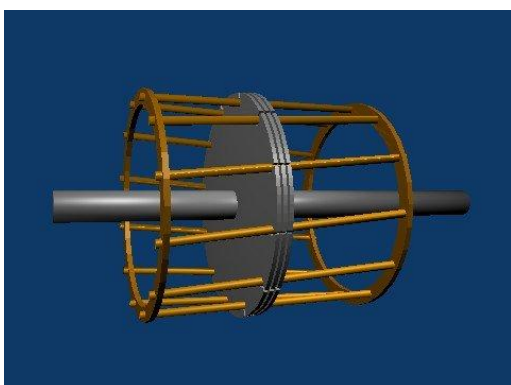
Likströmsmotorn har två olika lindningstyper fält- och ankarlindning. Det är samverkan mellan dessa två fält som åstadkommer momentet som vrider rotorn. Kommutatorn och borstarna håller magnetflödet från ankarlindningen vinkelrätt i förhållande till flödet från fältlindningen. Detta garanterar att kraften (momentet) mellan de två magnetsystemen är optimalt. (16)

Fördelarna med likströmsmotorn är att den är lätt att styra tack vare linjäriteten. Det går enskilt att styra vridmomentet och magnetfältet, dessutom är tillverkningsteknologin väldigt etablerad. Nackdelarna är att borstarna nöts och detta leder till höga underhållskostnader, låg maximal hastighet, elektromagnetisk störning p.g.a. kommutatorn och att kraft per viktförhållande är lågt. (12)

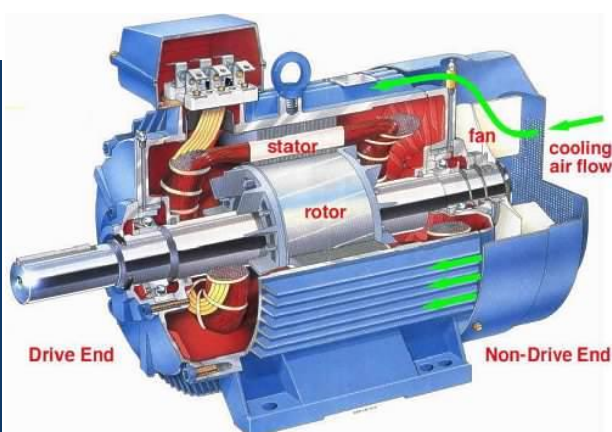
Eftersom den här typen av elmotor blir allt mindre vanlig i elfordon så valdes att inte göra någon modell för den. I stället fokuserades på de motorer som beskrivs längre fram i detta examensarbete.

### 3.2.2 Induktionsmotor

Trefasinduktionsmotorn är en asynkronmaskin. Vid drift under synkronhastighet beter den sig som en motor och vid drift över synkronhastighet beter den sig som en generator. Det finns två olika typer av induktionsmotorer ”squirrel cage” och ”wound rotor”. I detta examensarbete fokuseras på squirrel cage motorn, eftersom den används i simuleringsmodellen. Squirrel cage induktionsmotorn är industrins så kallade arbetshäst tack vare dess robusta konstruktion och billiga pris. Rotorlindningen består av kopparstänger som liknar ett ekorrhjul. Därför kommer dess namn. Rotorns kärna består oftast av tunna laminat som är monterade vinkelrätt mot rotorns axel och som är elektriskt isolerade från varandra. Statorn består också vanligtvis av tunna laminat som är staplade ihop med varandra. Laminatet är vanligtvis gjort av dynamoplåt och dess tjocklek är ungefär 0,5 mm för en 60 Hz motor. Figur 4 visar en genomskärning av en induktionsmotor och figur 3 visar rotorns uppbyggnad. (17) (12)



Figur 3. Rotorn i en induktionsmotor. (2)



Figur 4. Induktionsmotor. (11)

Vridmomentet i en induktionsmotor produceras på samma sätt som i en likströmsmotor. Axiella strömmar i rotorn samverkar med magnetfältet som uppstår i statorn, men i induktionsmotorn finns inget behov av vare sig borstar eller kommutatorn. I den induceras de strömmar som bildas i rotorn med hjälp av luftspalter. Detta sker så länge som rotorn och det magnetiska fältet inte roterar med samma hastighet. I så fall skulle rotorn rotera med synkronhastighet utan inducerad elektromagnetisk kraft och därmed finns inga inducerade rotorströmmar, dvs. maskinen skulle gå på tomgång. (9)

### 3.2.3 Permanentmagnetmotor (PM)

I permanentmagnetmotorer skapas magnetfältet med hjälp av permanentmagneter i stället för lindningar som används i induktionsmotorn och likströmsmotorn. Tack vare detta undviks de förluster som uppstår när lindningar används för att skapa magnetfält. Dessutom kräver lindningarna underhåll, vilket undviks vid användning av permanentmagnetmotorer. PM-motorer kan generellt delas in i två kategorier, permanentmagnet synkron motor (PMSM) och borstlös DC-motor (BLDC).

PM synkronmotorns vågform på spänningen och strömmen är sinusformade. På grund av att permanentmagneter används för att skapa magnetfältet behövs inga lindningar i rotorn. Detta medför att PM synkronmotor är mindre än en induktionsmotor med samma uteffekt. Det jämna vridmomentet som dessa motorer har uppnås med hjälp av att forma motorströmmarna. Detta görs med hjälp av högupplösta positionssensorer och strömsensorer. Regleringsalgoritmerna är implementerade med en digital processor som använder återkoppling från sensorerna. Nackdelarna med PM synkronmotorn är att permanentmagneterna är dyra, känsliga för höga temperaturer och hög belastning (12). I fall motorn belastats hårt för en längre tid, kan temperaturen stiga för högt och detta kan skada permanentmagneterna.

Permanentmagnet borstlösa DC-motorn (PM BLDC) är en växelströmsmotor trots sitt namn. Det är på grund av dess styrning som den fått detta namn. Styrningen gör att den beter sig på liknande sätt som en DC-motor. Styrningen består vanligtvis av en optisk avkodare, strömmätningar, hall sensorer för kommutation, en förstärkare och återkopplingsreglering . (5)

Motorstyrningen till den här elmotorn är simpel. Endast sex diskreta rotorpositioner krävs för att uppnå ett elektriskt rotationsvarv och för att synkronisera fasströmmarna med fasernas mot-emk. Med detta uppnås effektiv vridmoments produktion. Detta betyder att det finns tre hallsensorer som är placerade  $120^\circ$  från varandra. Dessa är monterade på statorn och är vända mot ett magnethjul som är fast i rotorn och med hjälp av detta går det enkelt att få positionsinformationen. Detta är ett billigare alternativ än att använda sig av en PM synkronmotor med vektorstyrning men prestandan är sämre. För att styra en PM BLDC-motor går det inte att använda vektorstyrning på grund av att vågformen på motorns mot-emker är trapetsformade. Mot-emk är den genererade motspänningen som åstadkoms i magnetfältet över statorlindningarna. Fasströmmarnas vågformer är rektangulära eller fyrkantiga till formen. (12)

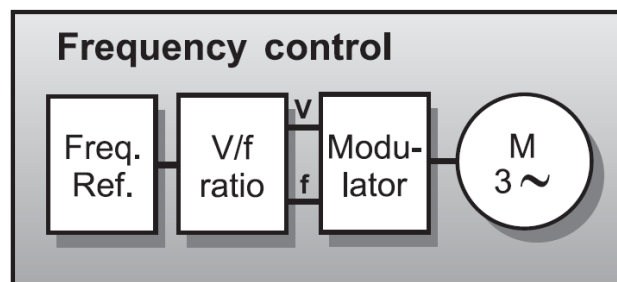
Den valda elmotorn för den andra modellen blev PM BLDC-motorn eftersom detta är ett billigare alternativ än PMSM med vektorstyrning samt den är lättare att förstå sig på och att modulera.

### 3.3 Motorstyrning

Det finns olika motorstyrningstekniker för styrning av växelströmsmotorer. I detta kapitel beskrivs tre olika teknologier frekvensstyrning, vektorstyrning och direkt momentreglering. Valet av motorstyrning beror mycket på vilken typ av system det är frågan om t.ex. hur noggrann styrning behövs och vilka krav ställs på styrningen.

#### 3.3.1 Frekvensstyrning

Frekvensstyrning går ut på att det ges in en frekvens som referens och med hjälp av frekvens- och spänningsförhållandet går det att få spänningen beräknad. Detta matas till en modulator som simulerar en växelströmssinusvåg och ger ut detta till motorns statorlindning. Denna teknik kallas för pulsbreddsmodulering (PWM). Invertern tar emot PWM pulserna och styr motor enligt dessa pulser. Figur 5 visar ett blockschema med frekvensstyrningens huvudkomponenter. (22)



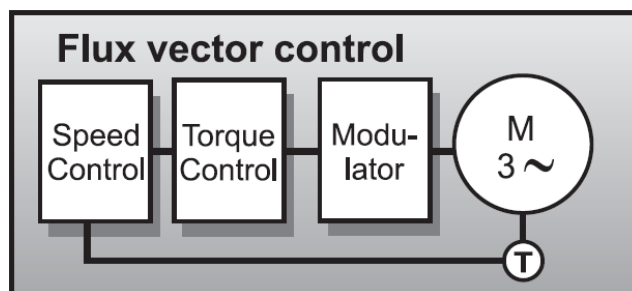
Figur 5. Blockschema över frekvensstyrning. (22)

Fördelarna med denna teknik är att den är billig tack vare att det inte behövs någon återkoppling. Nackdelarna är att modulatorens skapar en fördröjning för signalerna och den håller ingen koll på motorpositionen eller motorhastigheten. Därför lämpar denna teknik sig till applikationer som inte kräver noggrann styrning t.ex. pumpar och fläktar. (22)

### 3.3.2 Vektorstyrning

Denna teknik försöker efterlikna de magnetiska driftsförhållandena som en likströmsmotor har dvs. genomföra fältorientering. För att göra detta möjligt behövs vinkelläget för rotorflödet i motorn. Det här görs elektroniskt till skillnad från i likströmsmotorn där detta görs mekaniskt med kommutator och borstar. (22)

Genom återkoppling går det att få reda på rotorhastighet och vinkelläge i förhållande till statorfältet. Detta med hjälp av en pulsavkodare. Motorns elektriska egenskaper är matematiskt beräknade av en mikroprocessor. Dessa egenskaper är spänning, ström och frekvens som används som styrvariabler. De här matas till en modulator som omvandlar dem till PWM-signaler som matas till en inverter som styr motorn. Detta betyder att motorns moment styrs indirekt. Figur 6 visar ett blockschema över vektorstyrning med återkoppling. (22)



Figur 6. Blockschema över vektorstyrning. (22)

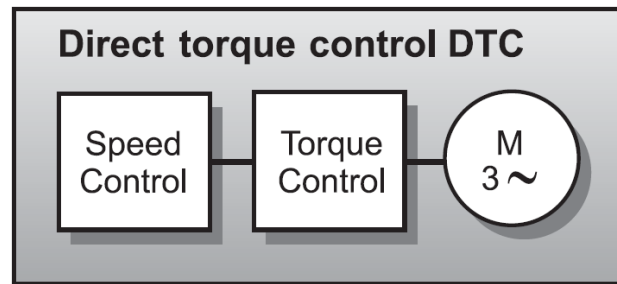
Fördelarna med denna teknik är att den har bra moment respons, noggrann hastighetsreglering och fullt moment från början. Nackdelarna är för att få fullt moment och noggrann hastighetsreglering behövs återkoppling. Detta medför att det blir ett dyrare och mera komplext system. Här används också en modulator och detta gör att motorresponsen slöas ner. (22)

### 3.3.3 Direkt momentreglering (DTC)

Med denna teknik användes också fältorientering för att styra motorn. Men med den här tekniken behövs varken återkoppling eller någon modulator. I stället används en avancerad motormodell för att beräkna motorns vridmoment.

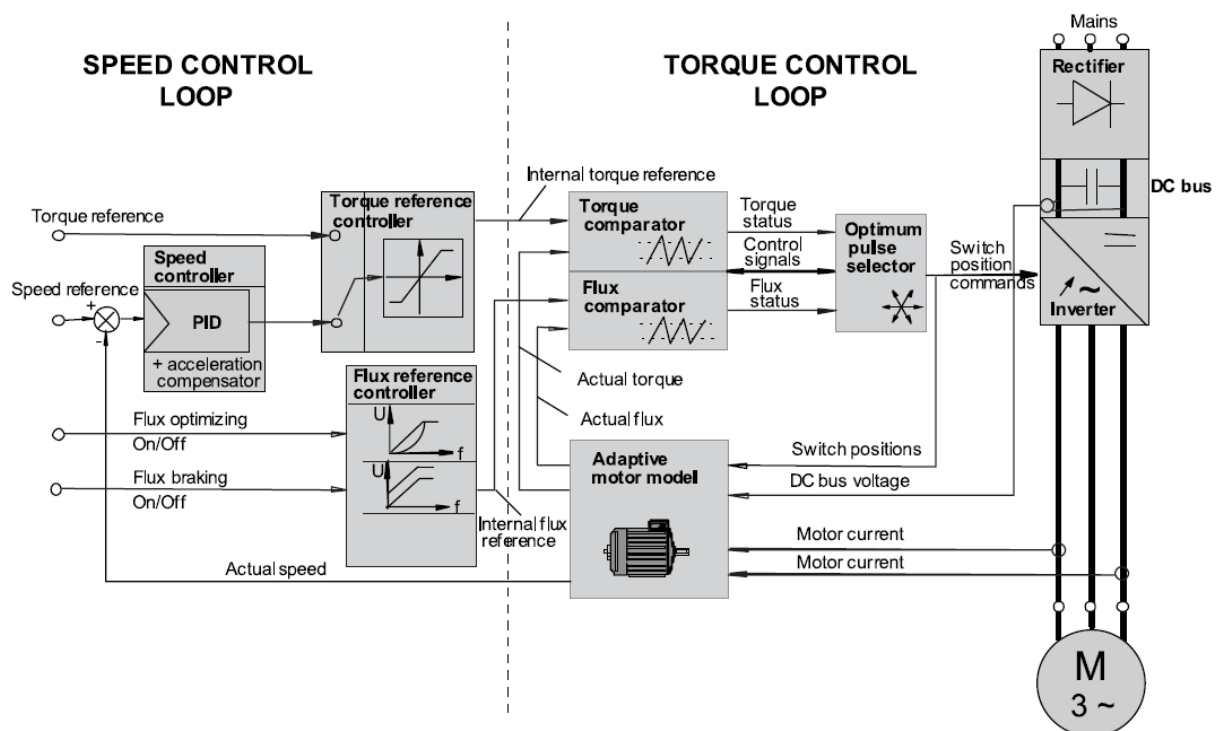


Direkt momentreglering (DTC) fungerar så att regleringen av vridmoment och rotationshastighet är direkt baserad på det elektromagnetiska tillståndet hos motorn. Detta liknar sättet som en likströmsmotor styrs på. Detta har många fördelar jämfört med traditionella PWM-enheter som använder frekvens och spänning för att styra motorn. I DTC är styrvariablerna vridmoment och flöde. Tack vare att det inte behövs någon modulator så betyder det att denna teknik har snabbare responstid än tekniker som använder modulatorer. Direkt momentreglering har noggrann vridmomentsreglering. (22)



Figur 7. Blockschemat över direkt momentreglering. (22)

Direkt momentreglering är uppbyggt av två block hastighetsreglering och momentreglering. Figur 8 är en bild på hur dessa två block kan vara uppbyggda. Denna motorstyrningsteknik användes till simulationsmodellen med induktionsmotorn. Därför finns närmare beskrivning hur den motorstyrning som användes fungerar och är uppbyggt i kapitlet 5 Simuleringsmodeller.



Figur 8. Exempel på hur direkt momentreglering kan vara uppbyggt. (22)

## 4 Simulink

Simulink är en miljö för multidomän simulering och modellbaserad design för dynamiska och inbyggda system. Det ger interaktiva grafiska miljöer och anpassningsbara blockbibliotek som låter dig designa, simulera, implementera och testa en mängd olika tidsvarierande system t.ex. kommunikation, reglering, signalbehandling, videobearbetning och bildbehandling. (21)

Framgången med Simulink beror mycket på den täta integreringen med MATLAB som är en dataanalyserings- och visualiseringsprogram med ett eget strukturerat programmeringsspråk. För tillfället har MATLAB 37 olika verktygslådor som riktar sig till diverse områden inom teknik, vetenskap och näringsliv. (15)

### 4.1 SimPowerSystems

SimPowerSystems är en verktygslåda i Simulink för modellering och simulering av generering, överföring, distribution och konsumtion av elkraft. Den innehåller modeller av många komponenter som används i dessa system, t.ex. trefasmotorer, elektriska styrenheter, vindkraftverk och kraftelektronik. (20)

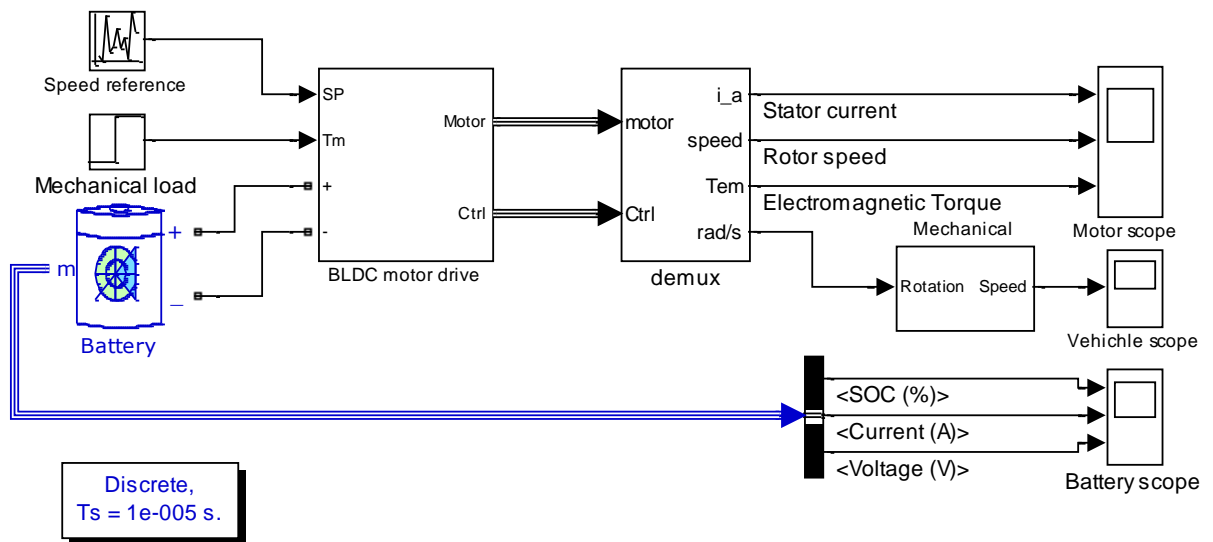
### 4.2 SimMechanics

SimMechanics är en verktygslåda i Simulink för modellering och simulering av mekaniska system. Med detta verktyg är det möjligt att tillämpa krafter/moment, integrera Newtons ekvationer, och mäta de resulterande rörelserna. Det går också att importera modeller komplett med massa, tröghet, begränsningar och 3D-geometri från flera CAD-system (19). I detta examensarbete användes SimMechanics för att simulera fordonets dynamik och med hjälp av detta gick det att få fram fordonets hastighet och olika krafter som verkar på fordonet.

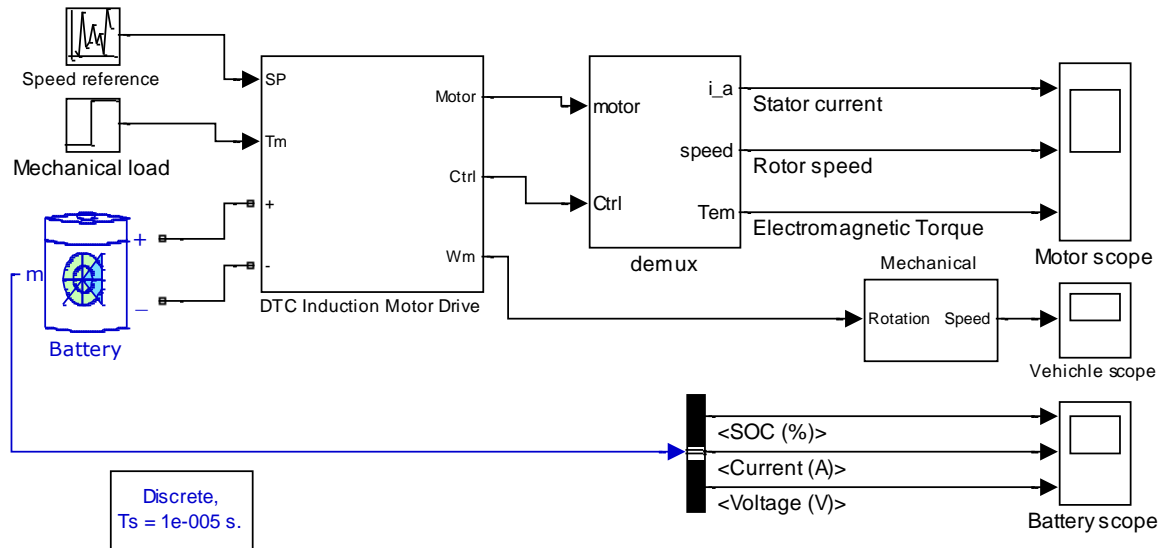
## 5 Simuleringsmodeller

Det finns åtminstone två olika sätt att gå tillväga när modeller av ett system skall skapas. Det första är att skriva m-kod i MATLAB, alltså att göra ett program som simulerar det system som byggs upp. Detta betyder att det skrivs kodrader och byggs upp modellerna med hjälp av differentialekvationer för de olika komponenterna. Det andra sättet är att använda sig av Simulink där färdiga block används för att bygga upp modellerna. Det här kallas grafisk programmering, i stället för traditionell programmering.

Det senare sättet blev använt när simuleringsmodellerna byggdes. Detta för att det skulle vara intressant och lärorikt att pröva göra det på det här sättet och för att lära sig mer om hur Simulink fungerar. Första som gjordes var att bekanta sig med Simulink och se hur det fungerar. Sedan undersöktes olika alternativ hur och med vilka block som det kunde gå att bygga upp en modell på. Tidigare liknande projekt som gjorts studerades. Sedan forskades det i hur de olika blocken som användes fungerar och till sist sattes de olika komponenterna ihop för att bilda modellen. Modifieringar gjordes för att få vissa block att passa till det här systemet. I figurerna som följer finns de två modeller som skapades.



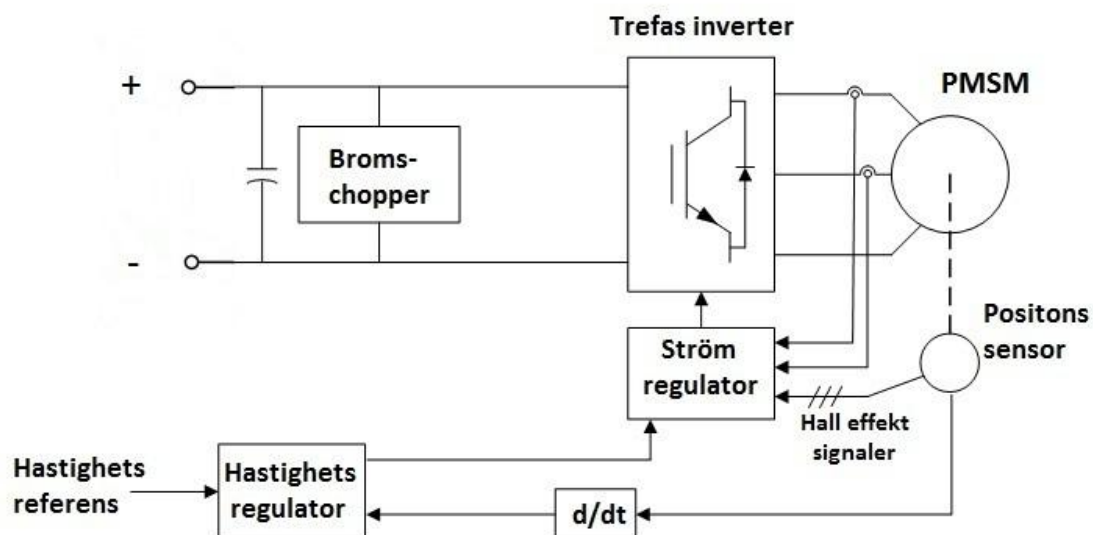
Figur 9. Simuleringsmodellen för BLDC-motor drive.



Figur 10. Simuleringsmodellen för DTC-induktionsmotor drive.

## 5.1 BLDC-motor drive

BLDC-motor driveenheten består av fem huvudblock bromschopper, trefasinverter, hastighetsregulatorn, strömregulator och PM BLDC-motorn. Deras funktion och uppbyggnad beskrivs i detta kapitel. Figur 11 är ett blockschema som visar hur de olika blocken är ihopkopplade.



Figur 11. Det modifierade BLDC-motor drive blockets uppbyggnad. (4)

### **5.1.1 Broms-chopper**

Eftersom regenerativ bromsning inte användes så behövs det något som tar upp den energi som produceras när motor saktar ner. Det här är broms-chopperns huvuduppgift i denna simulationsmodell. Den används också i den andra simulationsmodellen med induktionsmotor, där den har samma funktion.

### **5.1.2 Trefasinverter**

Trefasinvertern är kraftomvandlaren och den omvandlar likspänningen från batteriet till trefasväxelspänning som motorn drivs med. Krafterlektroniken som används i den är av typen IGBT, eftersom märkspänningen, märkströmmen och omkopplingsfrekvensen är i det område som krävs för att användas för framdrivningen av ett elektriskt fordon. Strömregulatorn genererar de pulser som styr IGBT-transistorerna så att motorn får den önskade spänningen och frekvensen. Trefasinvertern är av samma typ i båda simuleringsmodellerna.

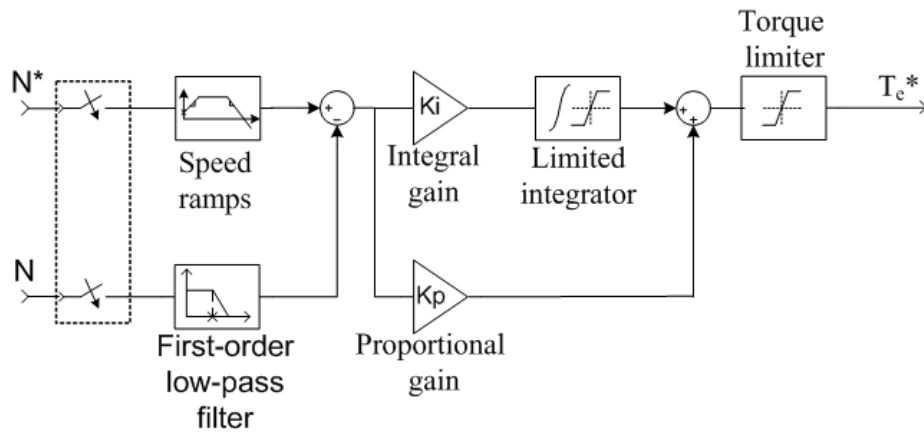
#### **5.1.2.1 IGBT**

IGBT är en bipolär transistor med isolerat styre. Den är en transistortyp som används inom modern kraftelektronik. Den kombinerar egenskaperna hos bipolär transistor och MOSFET-fälteffekttransistor. Den används för varvtalsstyrning av asynkronmotorer och finns som både diskret komponent eller som färdig IGBT-modul. (12)

### **5.1.3 Hastighetsregulator**

I hastighetsregulatorn jämförs hastighetsreferensen med den egentliga hastigheten. Differensen mellan dessa två hastigheter matas sedan till en PI-regulator som reglerar referensmomentet ( $T_c^*$ ) om det finns en differens. Med torque limiter-blocket går det att begränsa momentet till att inte överstiga ett visst värde. Detta referensmoment matas sedan in i strömregulatorn.

## Speed controller

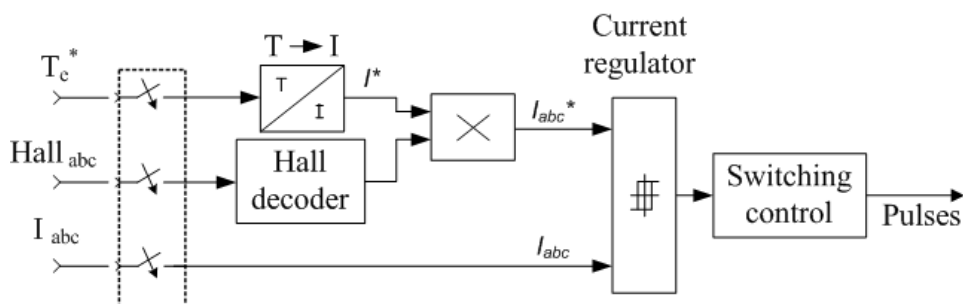


Figur 12. Hastighetsregulatorns uppbyggnad. (4)

### 5.1.4 Strömregulator

Strömregulatorn har tre ingångar. Dessa är referensmomentet ( $T_c^*$ ), halleffektsignalerna ( $H_{abc}$ ) och fasströmmarna ( $I_{abc}$ ) från motorn. Figur 13 visar de olika block som ingår i strömregulatorn.

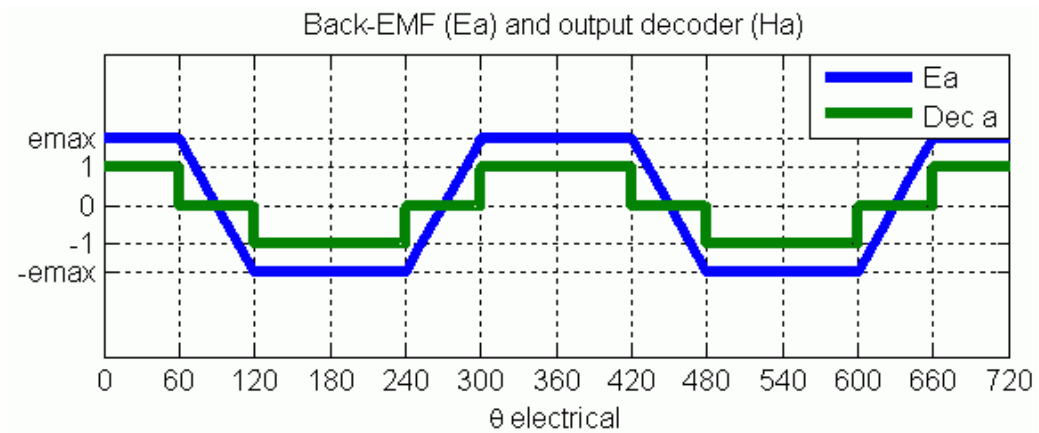
## Current controller



Figur 13. Strömregulatorns uppbyggnad. (4)

T-I blocket omvandlar referensmomentet till en strömtopp som kallas strömreferens ( $I^*$ ). Momentet omvandlas till en ström som har en rent rektangulär vågform. I praktiken är det omöjligt att uppnå dessa vågformer p.g.a. motorns induktans. Därför kan det elektromagnetiska momentet vara lägre än referensmomentet, speciellt vid höga hastigheter. (4)

Halldecoder-blocket används för att extrahera mot-emk informationen från halleffektsignalerna. Utgångarna har tre nivåer på signalerna (-1, 0, 1). Dessa representerar de normaliserade idealiska fasströmmarna som skall injiceras i motorns faser. Denna typ av ström kommer att producera ett konstant vridmoment. Följande figur visar mot-emk för fas a och utsignalen från halldekodern för fas a. (4)



Figur 14. Graf av mot-emk och utsignal från halldekodern för fas a. (4)

Utsignalen från Halldecoder-blocket multipliceras med referensströmmen ( $I^*$ ) vilket gör det möjligt att få ett referensvärde för alla fasströmmar ( $I_{abc}^*$ ). Denna signal matas till Current regulator-blocket där det jämförs med fasströmmarna ( $I_{abc}$ ) som är uppmätta från motorn.

Switching control-blocket är till för att begränsa kommuteringsfrekvensen för invertern till att inte överstiga ett visst värde som användaren själv får välja (4). Utgången från detta block är pulser som matas till inverterns styre.

### 5.1.5 PM BLDC-motormodell

Motormodellen som användes är en trefas permanentmagnetsynkronmotor med trapetsliknande mot-emk (4). Detta medför att vågformen på fasströmmarna i motorn är rektangulära eller fyrkantiga.

De matematiska ekvationerna som motormodellen är uppbyggd på är följande. Ekvationerna använder faserna som referens. Det som är värt att notera är att induktansen  $L_s$  antas vara konstant fast rotorpositionen ändrar. (18)

Det elektriska systemets modell är följande:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}i_a &= \frac{1}{3L_s} (2v_{ab} + v_{bc} - 3R_s i_a + \lambda p \omega_r (-2\Phi'_a + \Phi'_b + \Phi'_c)) \\ \frac{d}{dt}i_b &= \frac{1}{3L_s} (-v_{ab} + v_{bc} - 3R_s i_b + \lambda p \omega_r (\Phi'_a - 2\Phi'_b + \Phi'_c)) \\ \frac{d}{dt}i_c &= -\left( \frac{d}{dt}i_a + \frac{d}{dt}i_b \right) \\ T_e &= p\lambda (\Phi'_a \cdot i_a + \Phi'_b \cdot i_b + \Phi'_c \cdot i_c),\end{aligned}$$

Det mekaniska systemets modell är följande:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\omega_r &= \frac{1}{J} (T_e - F\omega_r - T_m) \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega_r,\end{aligned}$$

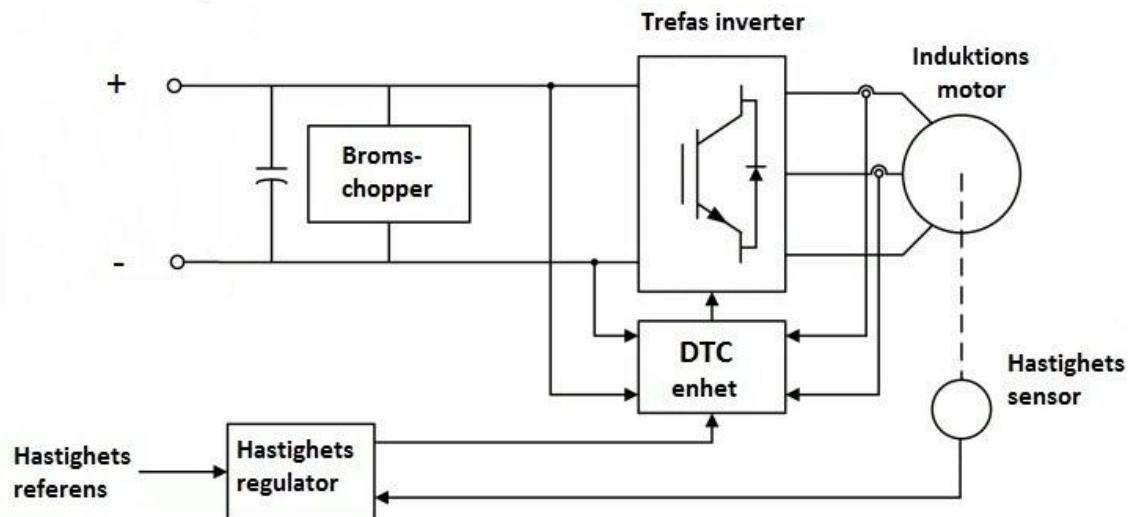
Tabell 2. Parameterdefinieringar.

Parameter	Definition
$L_s$	Induktansen i statorns lindningar
$R_s$	Resistansen i statorns lindningar
$i_a, i_b, i_c$	Fasströmmarna
$\Phi'_a, \Phi'_b, \Phi'_c$	Fasernas elektromotoriska kraft
$v_{ab}, v_{bc}$	Spänningens skillnaden mellan faserna ab och bc
$\omega_r$	Rotorns vinkelhastighet
$\lambda$	Amplituden hos flödet som induceras av de permanenta magneterna i rotorn på statorns fas
$p$	Antalet pol par
$T_e$	Motorns vridmoment
$J$	Combined inertia of rotor and load
$F$	Combined viscous friction of rotor and load
$\theta$	Rotor angular position
$T_m$	Shaft mechanical torque



## 5.2 DTC-induktionsmotor drive

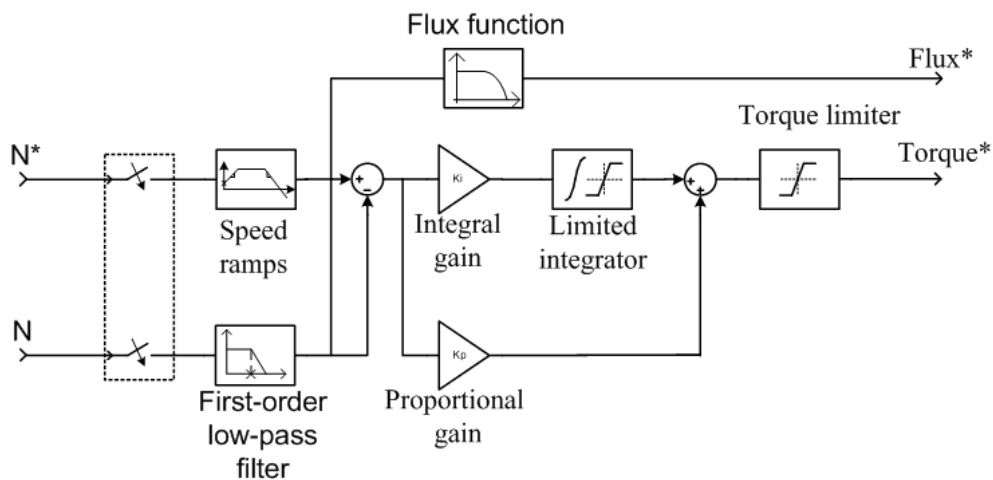
DTC-induktionsmotor driveenheten består av fem huvudblock bromschopper, trefasinverter, hastighetsregulator, DTC-enhet och induktionsmotor. Bromschopporn och trefasinverterblocken har samma funktion som i BLDC-motor driveenheten som beskrevs på föregående sidor. Figur 15 visar hur de olika blockena är ihopkopplade med varandra.



Figur 15. Det modifierade DTC-induktionsmotor drive blockets uppbyggnad. (6)

### 5.2.1 Hastighetsregulator

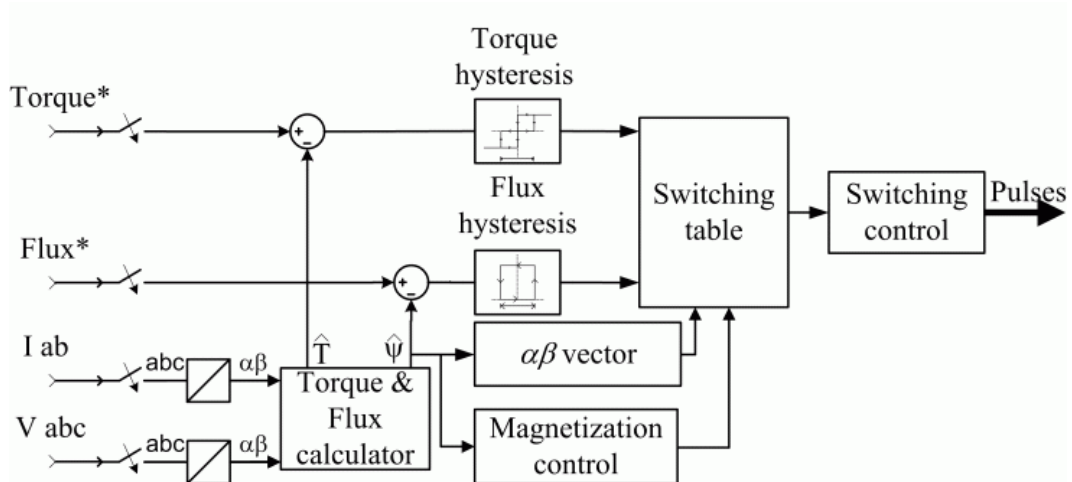
Hastighetsregulatorn fungerar på samma sätt som i BLDC-motor driveenheten med den skillnaden att det tas ut ett flödesreferens (Flux\*) som matas till DTC-enheten.



Figur 16. Hastighetsregulatorns uppbyggnad. (6)

## 5.2.2 DTC-enhet

DTC-enheten har fyra insignaler. Dessa är momentreferens (Torque\*), flödesreferens (Flux\*), fasströmmarna ( $I_{ab}$ ) och fasspänningarna ( $V_{abc}$ ). De två första är beräknade signaler och de andra två är uppmätta signaler. Figur 17 är ett blockschema som visar de olika blocken som ingår i DTC-enheten.



Figur 17. DTC-enhetens uppbyggnad. (6)

”Torque & Flux calculator”-blocket har som funktion att estimera motorflödets  $\alpha\beta$ -komponenter och motorns vridmoment. Räkaren använder motormodellekvationerna för att beräkna dessa. (6)

Blocket  $\alpha\beta$ -vector används för att få den rätta sektionen i  $\alpha\beta$ -planet där flödesvektorn befinner sig. Detta plan är uppdelat i sex olika sektioner som ligger med 60 graders mellanrum. (6)

Torque & Flux hysteresis blocken är uppbyggda med varsin hystereskomparator. ”Torque hysteresis”-blockets komparator är en trenivås hystereskomparator för momentreglering och ”Flux hysteresis”-blockets komparator är en tvånivås hystereskomparator för flödesreglering. (6)

”Switching table”-blocket innehåller två uppslagstabeller som väljer en specifik spänningsvektor som beror på utsignalerna från ”Torque & Flux hysteresis”-blocken. Detta block producerar också initieringsflödet i motorn. (6)

”Switching control”-blocket är till för att begränsa kommuteringsfrekvensen för invertern till att inte överstiga ett visst värde som användaren själv får välja (6). Utgången från detta block är pulser som matas till inverterns styre.

### 5.2.3 Induktionsmotormodell

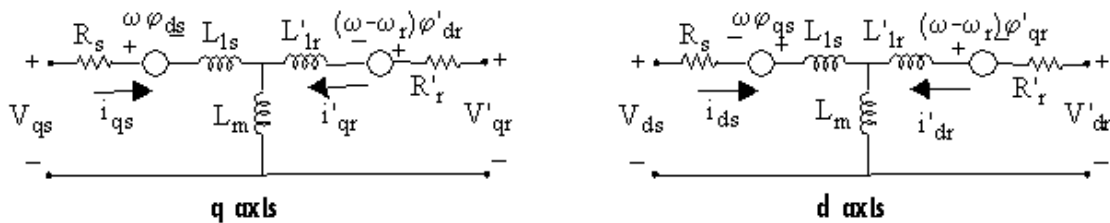
Motormodellen som användes var en trefasasynkronmotor av typen "squirrel cage". Den elektriska delen är en fjärdeordningens state-space modell och den mekaniska delen en andraordningens modell. Alla elektriska variabler och parametrar använder stator som referens. Detta är indikerat med primtecken i motorekvationerna som finns nedan. Alla stator- och rotorkvantiteter är i två-axelreferenssystemet (dq systemet). De använda indexen definieras enligt följande tabell. (1)

Tabell 3. Indexdefinitioner för motorekvationerna.

Index	Definition
d	d axel kvantitet
q	q axel kvantitet
r	Rotor kvantitet
s	Stator kvantitet
l	Läckage induktans
m	Magnetiserings induktans

(1)

Det elektriska systemets modell är följande:



Figur 18. Motorekvationer q axel och d axel. (1)

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + d\varphi_{qs}/dt + \omega \varphi_{ds}$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + d\varphi_{ds}/dt - \omega \varphi_{qs}$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + d\varphi'_{qr}/dt + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr}$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + d\varphi'_{dr}/dt - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr}$$

$$T_e = 1.5p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds})$$

$\omega$  — Referens vinkelhastighet

$\omega_r$  — Elektriska vinkelhastigheten

Där,  $\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}$

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}$$

$$\varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}$$

$$\varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}$$

$$L_s = L_{ls} + L_m$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m$$

Det mekaniska systemets modell är följande:

$$\frac{d}{dt}\omega_m = \frac{1}{2H}(T_e - F\omega_m - T_m)$$

$$\frac{d}{dt}\theta_m = \omega_m$$

Parametrarna för motormodell finns definierade i den efterföljande tabellen. Alla kvantiteter använder statorn som referens.

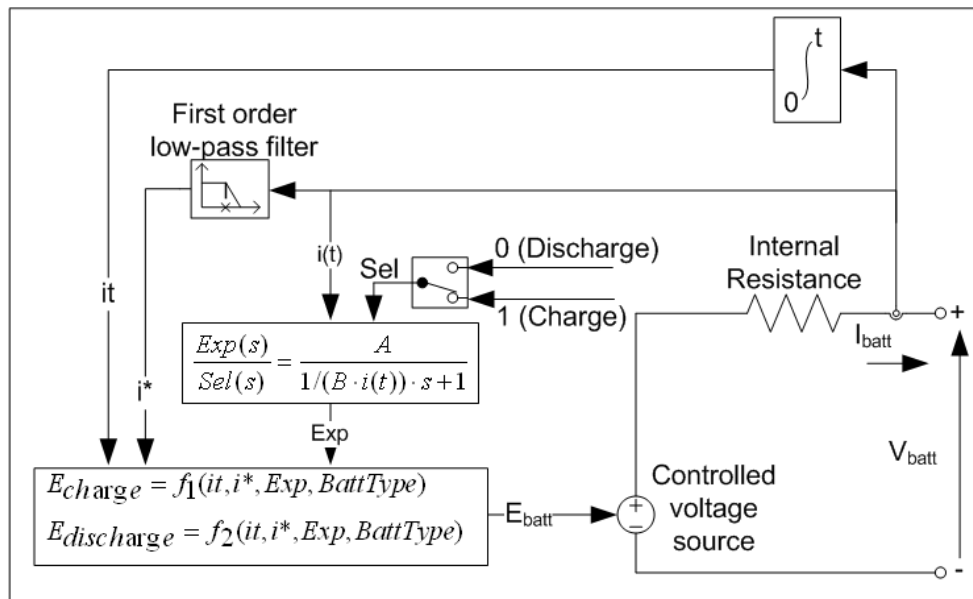
Tabell 4. Definiering av parametrar för motorekvationerna.

Parameter	Definition
$R_s, L_s$	Stator resistans och läckageinduktans
$L_m$	Magnetiseringsinduktans
$L_s$	Den totala statorinduktansen
$V_{qs}, i_{qs}$	q axel statorspänning och -ström
$V_{ds}, i_{ds}$	d axel statorspänning och -ström
$\phi_{qs}, \phi_{ds}$	Stator q och d axelflöde
$\omega_m$	Rotorns vinkelhastighet
$\Theta_m$	Rotorns vinkelposition
p	Antalet pol par
$\omega_r$	Elektrisk vinkelhastighet ( $\omega_m \times p$ )
$\Theta_r$	Elektrisk rotorvinkelposition ( $\Theta_m \times p$ )
$T_e$	Elektromagnetiskt moment
$T_m$	Mekaniska momentet på motorns axel (belastningen)
J	Kombinerad rotor och belastningströghetskoefficient. Kan läggas till infinite för att simulera låst rotor.
H	Kombinerad rotor och belastningströghetskonstant. Kan läggas till infinite för att simulera låst rotor.
F	Kombinerad rotor och belastningens viskösa friktionskoefficient
$L'_r$	Den totala rotorinduktansen
$R'_{rr}, L'_{lr}$	Rotorresistans och läckageinduktans
$V'_{qr}, i'_{qr}$	q axelrotorspänning och ström
$V'_{dr}, i'_{dr}$	d axelrotorspänning och ström
$\phi'_{qr}, \phi'_{dr}$	Rotor q och d axelflöde

(1)

### 5.3 Batterimodell

Batteriblocket implementerar en generisk dynamisk modell som är parameterinställd att representera de populäraste typerna av laddningsbara batterier (3). Färdiga modeller finns för blybatteri, nickel-kadmium, litium-jon och nickel-metallhydrid. Med modellen går det även att få en urladdningskurva, där det går att välja vilken ström som batteriet ska urladdas med. Här nedan följer en ekvivalent krets till batterimodellen samt ekvationerna som används för de olika batterityperna.



Figur 19. Batterimodellens ekvivalenta krets. (3)

#### Litium-jon Modell

##### 5.3.1.1 Urladdningsmodell ( $i^* > 0$ )

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it).$$

##### 5.3.1.2 Laddningsmodell ( $i^* < 0$ )

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it).$$

## Nickel-metallhydrid Modell

5.3.1.3 Urladdningsmodell ( $i^* > 0$ )

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + \text{Laplace}^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right).$$

5.3.1.4 Laddningsmodell ( $i^* < 0$ )

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{|it| + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + \text{Laplace}^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right),$$

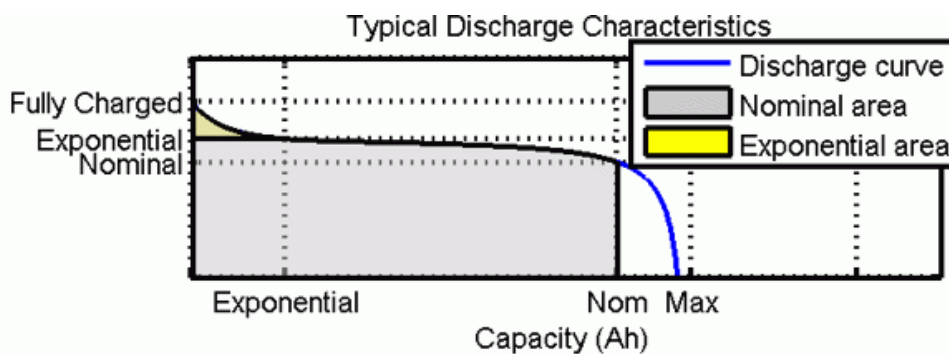
Parametrarna för batterimodellen finns definierade i tabellen nedan. Parametrarna kan modifieras för att representera en viss batterityp.

Tabell 5. Batterimodellens parametrar definierade.

Parameter	Definition
$E_{\text{Batt}}$	Ickelinjär spänning (V)
$E_0$	Konstant spänning (V)
Exp (s)	Exponential- zon Dynamics (V)
SEL (s)	Representerar batteriets läge, 1 under batteriets urladdning, 0 under batteriets laddning
K	Konstant Polarisat (Ah <sup>-1</sup> ) eller polarisation resistans (ohm)
$i^*$	Lågfrekvent ström Dynamics (A)
$i$	Batteri ström (A)
it	Extraherad kapacitet (Ah)
Q	Maximal batterikapacitet (Ah)
A	Exponentiell spänning (V)
B	Exponentiell kapacitet (Ah) <sup>-1</sup>

(3)

Figur 20 visar en graf på urladdningskurvan som går att skapa med hjälp av batterimodellen. Den första delen är det exponentiella spänningsfallet när batteriet är fulladdat. Beroende på batteritypen så är detta område mer eller mindre brett. Den andra delen är laddningen som kan tas ut från batteriet tills spänningen sjunker under batteriets nominella spänning. Slutligen representerar den tredje delen av den totala urladdningen av batteriet, när spänningen sjunker snabbt. (3)



Figur 20. Urladdningskurva för batteri. (3)

## 6 Simuleringar

Simuleringen är till för att se hur bra simuleringmodellerna presterar. Två simuleringar tas upp här en med BLDC-motor drive och en med DTC-motor drive. Simuleringstiden för de båda simuleringarna är 60 sekunder. Som hastighetsreferens valdes ett block som ger ut en slumpmässig siffra mellan 0 och 1000. Detta är motorns referensvarvtal (rpm) och med hjälp av det här fås rätt hastighet på motorn. Samplingstiden för blocket valdes till tre sekunder. Det betyder att utsignalen från blocket ändrar var tredje sekund. Motorbelastningen valdes till att vara konstant 20 Nm under hela simuleringen. Parameterlistorna för de båda simuleringarna finns bifogade som bilaga 1 för BLDC-motor drive och bilaga 2 för DTC-induktionsmotor drive.

### 6.1 Simulering med BLDC-motor drive

Från simuleringen erhöles många olika utsignaler. Dessa gjordes åskådliga med hjälp av grafer. För att få en bättre översikt finns dessa grafer bifogade som bilagor och dess innebörd är förklarade längre fram.

Batteriets utdata finns bifogat som bilaga 3, där framgår hur mycket batteriet urladdas, hur mycket ström som förbrukas och spänningsnivån i batteriet. Där syns det att batteriet urladdas ungefär 1 % under simuleringstiden 60 s. Den ström som tas från batteriet är mellan 53 - 67 A och spänningsnivån sjunker från 460 V till ungefär 450 V.

Den utdata som erhöles för motorn vid simuleringen finns bifogad som bilaga 4. I bilagan finns tre grafer för motorns statorström, rotorhastighet och vridmoment. I den första grafen syns att vågformen för statorströmmarna är rektangulära, vilket nämndes i teorin i början av detta examensarbete. Amplituden på strömmen är ungefär 10 A. I den andra grafen syns rotorhastighetens referens med rött och den riktiga rotorhastigheten med blått. Dessa kan vara svåra att urskilja eftersom de nästan är ovan på varandra, vilket betyder att regleringen fungerar mycket bra. I den tredje och sista grafen finns den utdata som erhöles för motorns vridmoment, där är den röda linjen vridmomentreferensen och den blåa linjen är det egentliga vridmomentet för motorn. Där fungerar också regleringen bra.

Med hjälp av att göra en modell av fordonets dynamik erhöles dess hastighet, vilket finns bifogat som en graf i bilaga 5. Fordonets hastighet varierar mellan 0 - 11 km/h.



## 6.2 Simulering med DTC-induktionsmotor drive

Samma typ av ut signaler erhö lls också från simuleringsmodellen för induktionsmotorn. Den utdata som erhö lls vid simuleringen finns bifogade som bilagor och dessa finns förklarade i detta kapitel.

Den utdata som erhö lls för batteriet finns bifogad som bilaga 6. Där är det möjligt att se att urladdning av batteriet och spänningsnivån i batteriet är ungefär likadan som i simuleringen med BLDC-motorn, men strömmen som tas från batteriet under simuleringen är högre, d.v.s. den pendlar mellan 46 - 74 A.

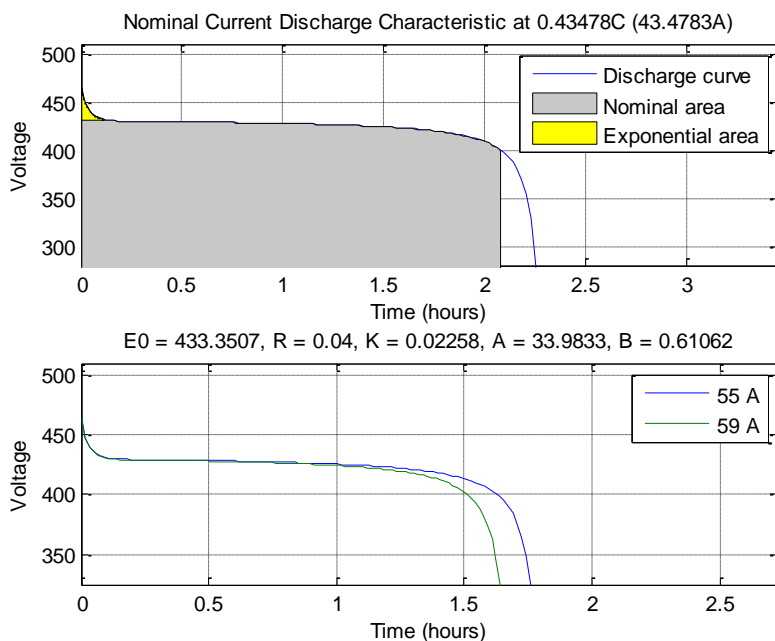
Induktionsmotorns utdata finns bifogad som grafer i bilaga 7. Vid analys av detta märks det att i den första grafen är statorströmmen mycket högre för induktionsmotormodellen. Amplituden är 25 A, alltså hela 15 A större. Den andra grafen visar att regleringen inte är lika bra som för BLDC-motorsimuleringen. Det testades med olika värden, men detta var den bästa regleringen som uppnåddes med denna simuleringsmodell. I den tredje grafen syns det att vridmomentet inte är lika bra reglerat som vid simuleringen med BLDC-motormodellen. Det pendlar mer kraftigt och dessutom har det inte lika högt vridmoment.

Hastigheten för fordonet erhö lls med samma modell som användes vid simuleringen med BLDC-motor drive simuleringsmodellen. Graf av detta finns bifogat som bilaga 8. I den syns att fordonet har en hastighet mellan 0 - 11 km/h, ungefär samma som med den andra simuleringsmodellen.

## 6.3 Batteriurladdning för simulationerna

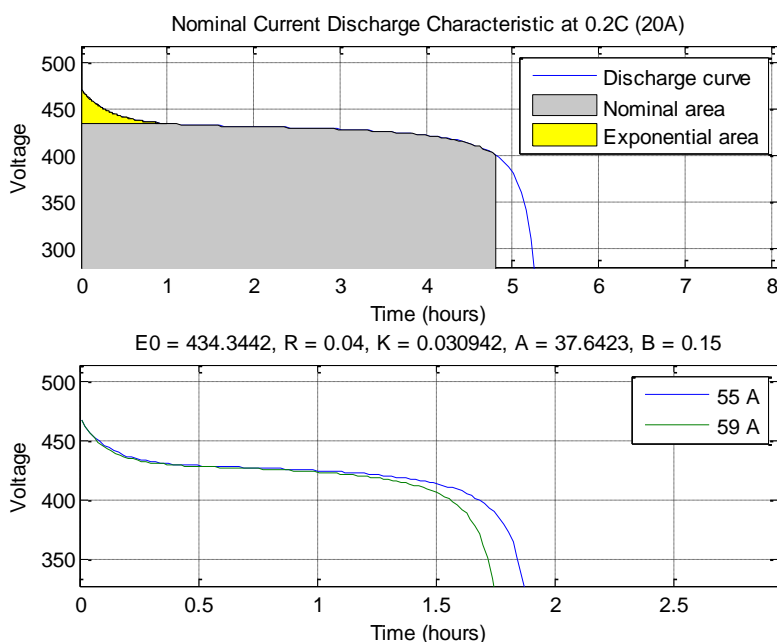
Med hjälp av simuleringsdata för den ström som tas från batteriet går det att, genom att ta medelvärdet av dessa mätvärden, beräkna batteriets urladdningstid. Alltså erhö lls användningstiden för batteriet.

I batterimodellblocket som finns i MATLAB:s bibliotek går det att få fram en graf med urladdningskurvorna för batterierna. För ”BLDC-motordrive-simuleringen” beräknades att medelströmmen var 55 A och för ”DTC-induktionsmotordrive-simuleringen” var medelströmmen 59 A. Urladdningskurvan för litium-jonbatteriet för de båda simuleringsmodellerna finns som figur 21.



Figur 21. Urladdningskurva för litiumjonbatteri.

Enligt grafen håller litium-jonbatteriet i ungefär 1,5 timmar för induktionsmotormodellen och ungefär 1,6 för BLDC-motormodellen. Den övre grafen, av de båda graferna i figurerna, visar den nominella strömladdningskaraktistiken för batterierna.



Figur 22. Urladdningskurva för Nickel-Metallhydridbatteri.

Enligt den nedre grafen i figur 22 så håller nickel-metallhydridbatteriet i ungefär 1,6 timmar om induktionsmotormodellen användes och ungefär 1,7 timmar om BLDC-motormodellen användes. Dock bör man beakta att det har använts samma elektriska egenskaper för båda batterimodellerna. Den fysiska storleken är således inte samma.

## 7 Resultat

Resultatet av detta examensarbete var två fungerande simuleringsmodeller. Dessa modeller jämfördes genom att köra två liknande simuleringar, där jag använde samma motorbelastning och olika motortyper med ungefär samma märkdata. Motortyperna som användes var induktionsmotor med DTC-motorstyrning och PMSM-motor med BLDC-motorstyrning, som kallas också för BLDC-motor på grund av att den styrs på liknande sätt som DC-motorn.

Beroende på kostnaderna och utrymmet som finns till förfogande i fordonet så är de olika simuleringsmodellerna bra på sitt eget sätt. Ifall man vill hålla ner kostnaderna och om det finns gott om utrymme är det bäst att välja DTC-induktionsmotorkonfigurationen. Men behövs det ett system som ska ta så lite utrymme som möjligt är det bättre att välja BLDC-motorkonfigurationen, men då blir det en mera komplex och dyrare konfiguration. BLDC-motorn är mera energieffektiv än induktionsmotorn, enligt de data som fås från simuleringarna. I detta examensarbete valde jag att inte ta med den termiska påverkan som de olika komponenterna har. Detta för att hålla ner komplexiteten på simuleringsmodellerna.

Det går inte att säga vilken batterityp man skall använda eftersom detta måste anpassas till de krav som ställs på fordonet. I detta examensarbete testades två olika batterityper och dessa fungerade lika bra. Därför är det svårt att säga att det ena är bättre än det andra. Jag har inte tagit någon hänsyn till den fysiska storleken på batteripaketet bara simulerat med liknande elektriska egenskaper.

Som slutsats kan sägas att ifall priset för fordonet inte har så stor betydelse så är den bästa lösningen BLDC-motor drive med nickel-metallhydridbatteri. Detta eftersom det tar mindre utrymme i fordonet, samt att det inte behövs lika stort batteri för samma användningstid som med induktionsmotorn, eftersom PMSM:n har högre verkningsgrad än induktionsmotorn.

## 8 Diskussion

Detta examensarbete har varit utmanande och lärorikt jag har lärt mig många nya saker. I början var det som en del av EPS-projektet vid Yrkeshögskolan Novia. Men senare fick jag tanken att detta skulle vara en bra uppgift till ett examensarbete. EPS-projektet var väldigt intressant och jag rekommenderar det åt alla som vill lära sig mera om projektarbete. Om man har möjlighet att göra det i en annan skola skall man ta den chansen. Visserligen har jag nog lärt mig en hel del av de utbytesstuderandena som var med i projektet, men man hade säkert lärt sig ännu mera om man gjort det i en annan skola än i den egna.

Uppgiften som jag skulle lösa var inte alltid klar efter som jag ställde upp egna krav, men slutresultatet blev bra enligt mig. Det var många utmaningar och problemlösningar som uppstod vid detta examensarbete. Hjälpkapitlet i MATLAB var till stor nytta, för där hittade jag ofta lösningen på de problem som uppstod, men även Internet användes flitigt. Där kunde jag läsa på forum och jämföra hur andra personer har löst liknande problem. När jag skulle skaffa en teoretisk kunskap för hur saker fungera var bibliotekets böcker väldigt bra för att skaffa information. Det var svårt att hitta böcker om den allra nyaste tekniken. Därför användes också Internet för att jämföra och se om den information som står i böckerna är föråldrad eller inte.

Elektriska fordon är en relativt gammal teknik, men det är först på senare år som den har tillämpats. Det är svårt att hitta de nyaste teknikerna eftersom tillverkarna ofta vill hålla dem hemliga så att inte konkurrenterna får tillgång till samma teknologier, eftersom man vill vara först ut med de banbrytande teknikerna.

De lösningar som jag kommit fram till i detta examensarbete är långt ifrån perfekta, eftersom jag inte hade så stor kunskap om elektriska fordon när jag började arbeta med denna uppgift. Men jag har lärt mig väldigt mycket och är glad för att ha fått ta del av alla olika teknologier som finns för elektriska fordon. Men jag gissar att jag bara har skrapat på ytan, för det finns säkert en hel uppsjö av teknologier som inte är tillgängliga för offentligheten. Jag har även lärt mig en hel del om MATLAB och Simulink.

Det som kunde ha gjorts bättre var att från början sätta upp krav och mål för vad som ska uppnås, eftersom det gick mycket tid till spillo med att göra en massa olika saker utan att riktigt ha på klart vad jag ska komma fram till. När det kommer till simuleringsmodellerna så finns det säkert många olika sätt att förbättra dem. Ett skulle vara att göra så att det går att få ut den belastning som fordonet har på elmotor och mata detta tillbaka till

reglersystemet. På så sätt skulle man fått ett mera verklighetstroget resultat. Detta skulle säkert kunna göras genom att modifiera den mekaniska fordonsmodellen som skapades.

Det här är i alla fall min lösning på det problem som jag skulle lösa och jag är nöjd med det resultat som jag har kommit fram till.

## Källförteckning

1. **Asynchronous Machine. 2012.** Mathworks. [Online] 2012. [Cited: februari 26, 2012.]  
<http://www.mathworks.se/help/toolbox/physmod/powersys/ref/asynchronousmachine.html>.
2. **Asynkronmotor. 2012.** [Online] februari 17, 2012. [Cited: februari 20, 2012.]  
<http://sv.wikipedia.org/wiki/Asynkronmotor>.
3. **Battery. 2012.** Mathworks. [Online] 2012. [Cited: februari 27, 2012.]  
<http://www.mathworks.se/help/toolbox/physmod/powersys/ref/battery.html>.
4. **Brushless DC Motor Drive. 2012.** Mathworks. [Online] 2012. [Cited: februari 25, 2012.]  
<http://www.mathworks.se/help/toolbox/physmod/powersys/ref/brushlessdcmotordrive.html>.
5. **Chiasson, John. 2005.** *Modeling and High-Performance Control of Electric Machines.* New York : John Wiley and Sons, Inc, 2005.
6. **DTC Induction Motor Drive. 2012.** Mathworks. [Online] 2012. [Cited: februari 26, 2012.]  
<http://www.mathworks.se/help/toolbox/physmod/powersys/ref/dtcinductionmotordrive.html>.
7. **European Project Semester. 2012.** Yrkeshögskolan Novia. [Online] 2012. [Cited: februari 11, 2012.] <http://eps.novia.fi/sv/european-project-semester.html>.
8. **EV World Sverige. 2011.** Hur fungerar en elbil? [Online] 2011. [Cited: februari 9, 2012.]  
<http://evworld.com/international/sverige/index.cfm?link=HUR%20FUNKERAR%20EN%20ELBIL>.
9. **Grunditz, Emma och Jansson, Emma. 2009.** *Modelling and Simulation of a Hybrid Electric Vehicle for Shell Eco-marathon and an Electric Go-kart.* Master of Science Thesis in Electric Power Engineering : Chalmers University of Technology, Department of Energy and Environment, Göteborg, 2009.
10. **Hansen, Jørgen och Abata, Duane. 2011.** European Project Semester. [Online] 2011. [Citat: den 11 februari 2012.]  
<http://www.europeanprojectsemester.eu/info/Introduction>.
11. **Harmonic Media, Inc. 2012.** Squirrel Cage Motors. [Online] Electrical design tutor, 2012. [Cited: februari 20, 2012.] <http://www.electrical-design-tutor.com/squirrelcagemotors.html>.
12. **Husain, Iqbal. 2011.** Electric Machines. *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals.* 2nd. Boca Raton : CRC Press, 2011, sidor. 197-249.
13. **Husain, Iqbal. 2011.** Electrical Vehicles. *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals.* 2nd. Boca Raton : CRC Press, 2011, sidor. 3-5.

14. **Husain, Iqbal. 2011.** Traction Batteries. *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*. 2nd. Boca Raton : CRC Press, 2011, sidor. 146-157.
15. **Klee, Harold and Allen, Randal. 2011.** *Simulaton of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink*. 2nd. New York : CRC Press, 2011.
16. **Larminie, James and Lowry, John. 2003.** *Electric Vehicle Technology Explained*. Oxford : John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
17. **Ong, Chee-Mun. 1998.** *Dynamic simulation of Electric Machinery using MATLAB/Simulink*. Indiana : Prentice hall PTR, 1998.
18. **PMSM. 2012.** Mathworks. [Online] 2012. [Cited: februari 25, 2012.] <http://www.mathworks.se/help/toolbox/phymod/powersys/ref/permanentmagne tsynchronouismachine.html>.
19. **SimMechanics. 2012.** Mathworks. [Online] 2012. [Citat: den 24 februari 2012.] <http://www.mathworks.se/products/simmechanics/>.
20. **SimPowerSystems. 2011.** Mathworks. [Online] 2011. [Cited: december 7, 2011.] <http://www.mathworks.se/products/simpower/>.
21. **Simulink. 2012.** Mathworks. [Online] 2012. [Cited: februari 14, 2012.] <http://www.mathworks.se/products/simulink/>.
22. **Technical guide No. 1 Direct torque control - the world's most advanced AC drive technology. 2011.** ABB. [Online] den 6 juni 2011. [Citat: den 18 februari 2012.] [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/14f3a3ad8f3362bac12578a70041e728/\\$file/abb\\_technical%20guide%20no.1\\_revc.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/14f3a3ad8f3362bac12578a70041e728/$file/abb_technical%20guide%20no.1_revc.pdf).

## **Bilagor**

**Bilaga 1 – Parameterlista för BLDC-motor drive**

**Bilaga 2 – Parameterlista för DTC-induktionsmotor drive**

**Bilaga 3 – Batterimodellens utdata vid simulering med BLDC-motor drive**

**Bilaga 4 – BLDC-motorns simuleringsutdata**

**Bilaga 5 – Fordonets hastighet vid simulering med BLDC-motor drive**

**Bilaga 6 – Batterimodellens utdata vid simulering med DTC-induktionsmotor drive**

**Bilaga 7 – Induktionsmotorns simuleringsdata**

**Bilaga 8 – Fordonets hastighet vid simulering med DTC-induktions motor drive**



```

%% Parameters for simulation

Ts = 1e-5;           % Samplingtime (s)

%% Input signal

ML = 20;           % Mechanical load (Nm)

%% Battery parameters

NV = 400;          % Nominal Voltage (V)
RC = 100;          % Rated Capacity (Ah)
SOC = 100;         % Initial State-Of-Charge (%)

%% Braking chopper

CaV = 320;         % Chopper activation voltage (V)
CsV = 310;         % Chopper shutdown voltage (V)
BcF = 4000;        % Braking chopper frequency (Hz)
DCbusC = 2000e-6; % DC bus capacitance (F)
BR = 8;           % Braking resistance(ohm)

%% Speed controller

Srrdec = -1000;    % Speed reference ramp (rpm/s) deceleration
Srracc = 1000;     % Speed reference ramp (rpm/s) acceleration
SCKp = 2;          % Proportional gain
SCKi = 10;         % Integral gain
lpfc = 100;        % Speed measurement -
                   % low-pass filter cutoff frequency (Hz)
Cotsneg = -100;    % Controller output torque saturation (N.m) negative
Cotspos = 100;     % Controller output torque saturation (N.m) positive
CTs = 7*20e-6;    % Controller sampling time (s)

%% Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)

Rs = 1.33;         % Stator phase resistance Rs (ohm)
Ls = 0.048;        % Stator phase inductance Ls (H)
Flux = 0.894;      % Flux linkage established by magnets (V.s)
VC = 374.4778;     % Voltage Constant (V_peak L-L / krpm)
TC = 3.576;        % Torque Constant (N.m / A_peak)
BEMF = 120;        % Back EMF flat area (degrees)
J = 0.089;         % Inertia J (Kg.m^2)
Fdamp = 0.005;     % Viscous damping F (N.m.s)
p = 2;            % Pole pairs p

% Initial conditions of the motor

wm = 0;           % Rotor speed wm (rad/s)
thetam = 0;       % Thetam (deg)
ia = 0;           % Current ia (A)
ib = 0;           % Current ib (A)

```

```
%% Current controller

% Motor pairs of poles is the same as for the PMSM

FluxI = 0.894;          % Flux induced by magnets (Wb)
Maxsf = 20e3;          % Maximum switching frequency (Hz)
CCTs = 20e-6;         % Sampling time (s)
Chb = 0.01;           % Current hysteresis bandwidth (A)

%% Three-phase Inverter

SRs = 5000;           % Snubber resistance SRs (Ohms)
SCs = inf;            % Snubber capacitance SCs (F)

Ron = 1e-3;           % Resistance Ron (ohm)
DVf = 0.8;           % Forward voltages Vf (V)
DVfd = 0.8;          % Forward voltages Vfd (V)
Tfs = 1e-6;          % Tf (s)
Tts = 2e-6;          % Tt (s)
```

```

%% Parameters for simulation

Ts = 1e-5;           % Samplingtime (s)

%% Input signal

ML = 20;           % Mechanical load (Nm)

%% Battery parameters

NV = 400;          % Nominal Voltage (V)
RC = 100;          % Rated Capacity (Ah)
SOC = 100;         % Initial State-Of-Charge (%)

%% Braking chopper

CaV = 320;         % Chopper activation voltage (V)
CsV = 310;         % Chopper shutdown voltage (V)
BcF = 4000;        % Braking chopper frequency (Hz)
DCbusC = 2000e-6;  % DC bus capacitance (F)
BR = 8;            % Braking resistance(ohm)

%% Speed controller

F = 60;            % Machine nominal frequency (Hz)
Srrdec = -1800;    % Speed reference ramp (rpm/s) deceleration
Srracc = 1800;     % Speed reference ramp (rpm/s) acceleration
SCKp = 6;          % Proportional gain
SCKi = 20;         % Integral gain
lpfc = 100;        % Speed measurement
                    % - low-pass filter cutoff frequency (Hz)
Cotsneg = -100;    % Controller output torque saturation (N.m) negative
Cotspos = 100;     % Controller output torque saturation (N.m) positive
p = 2;             % Motor pole pairs
Wb = 0.3;          % Machine nominal flux
CTs = 100e-6;      % Controller sampling time (s)

%% Asynchronous Machine (Induction Motor)

Pn = 2238;         % Nominal power (VA)
Vn = 220;          % Voltage (line-line) (Vrms)
Fn = 60;           % Frequency (Hz)
Rs = 0.432;        % Stator resistance Rs (ohm)
LIs = 2e-3;        % Stator inductance LIs (H)
Rr = 0.816;        % Rotor resistance Rr (ohm)
LIr = 2e-3;        % Rotor inductance LIr (H)
Lm = 69.31e-3;    % Mutual inductance Lm (H)
VC = 374.4778;    % Voltage Constant (V_peak L-L / krpm)

J = 0.089;        % Inertia J (Kg.m^2)
Fdamp = 0.005;    % Viscous damping F (N.m.s)

```

```
%% DTC unit

% Motor pairs of poles is the same as for the PMSM

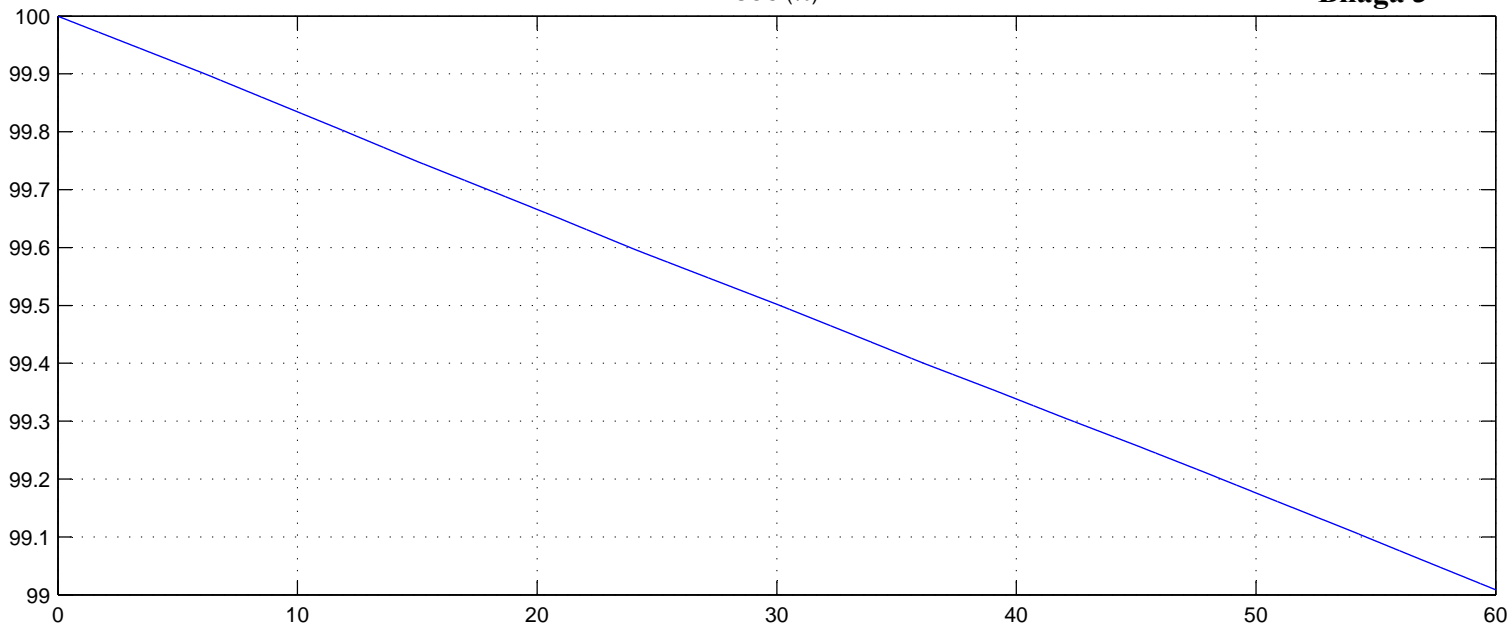
spR = 0.435;           % Stator phase resistance (ohms)
Thb = 0.5;            % Torque hysteresis Bandwidth (N.m)
Fhb = 0.01;          % Flux hysteresis bandwidth (Wb)
imF = 0.3;           % Initial machine flux (Wb)
maxF = 2000;         % Maximum switching frequency (Hz)
DTCTs = 20e-6;       % DTC units sampling time (s)

%% Three-phase Inverter

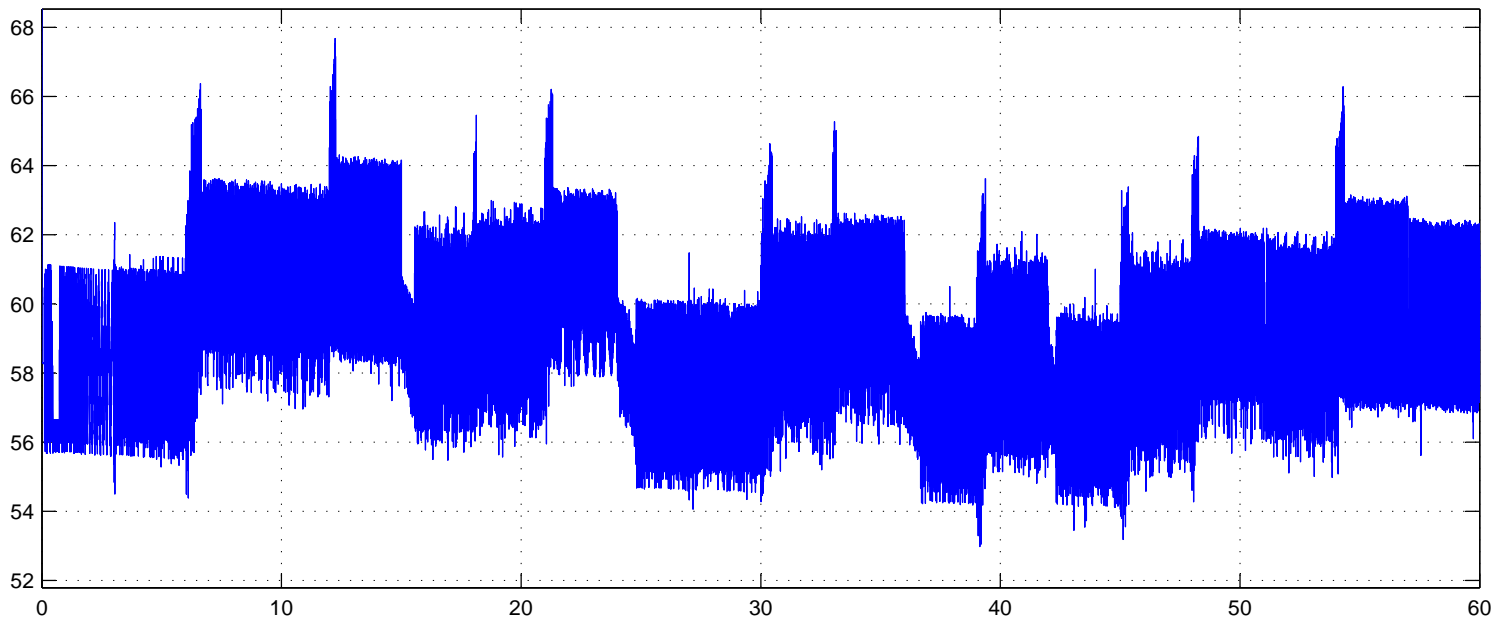
SRs = 10e3;          % Snubber resistance SRs (Ohms)
SCs = inf;           % Snubber capacitance SCs (F)

Ron = 1e-3;          % Resistance Ron (ohm)
DVf = 1.4;           % Forward voltages Vf (V)
DVfd = 1.4;         % Forward voltages Vfd (V)
Tfs = 1e-6;          % Tf (s)
Tts = 2e-6;          % Tt (s)
```

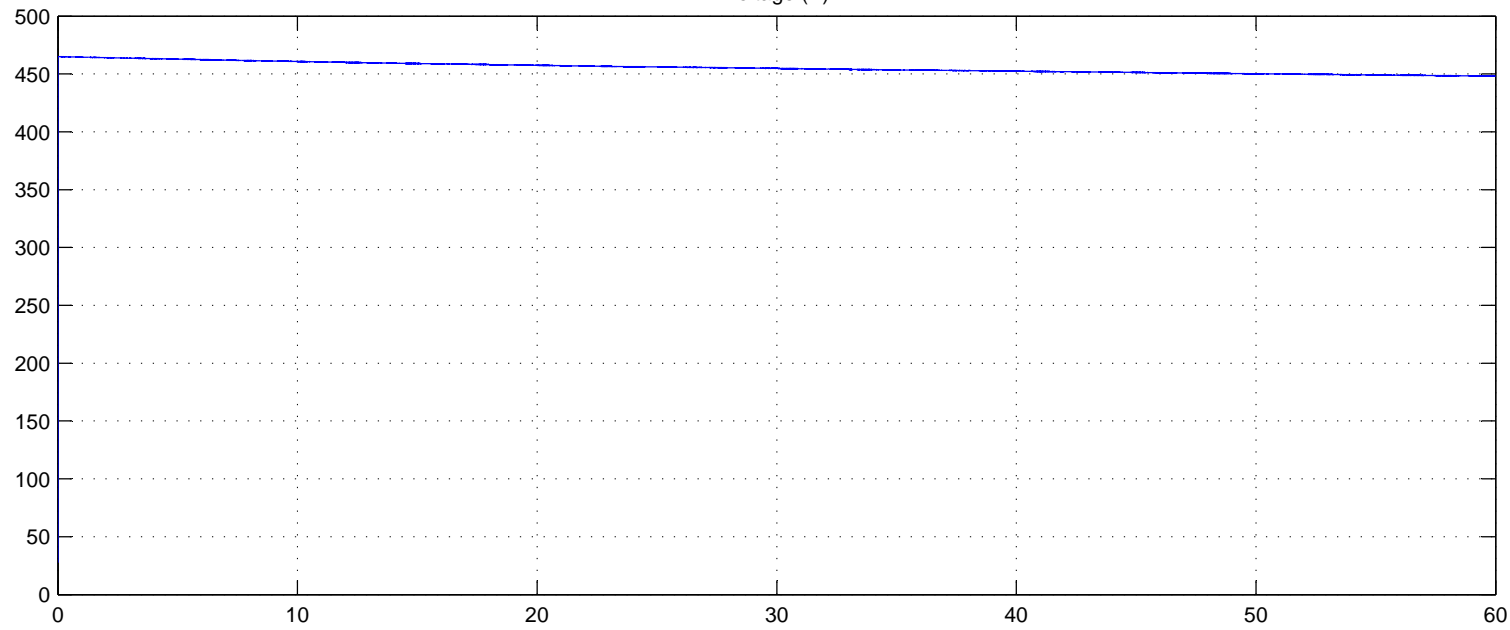
<SOC (%)>



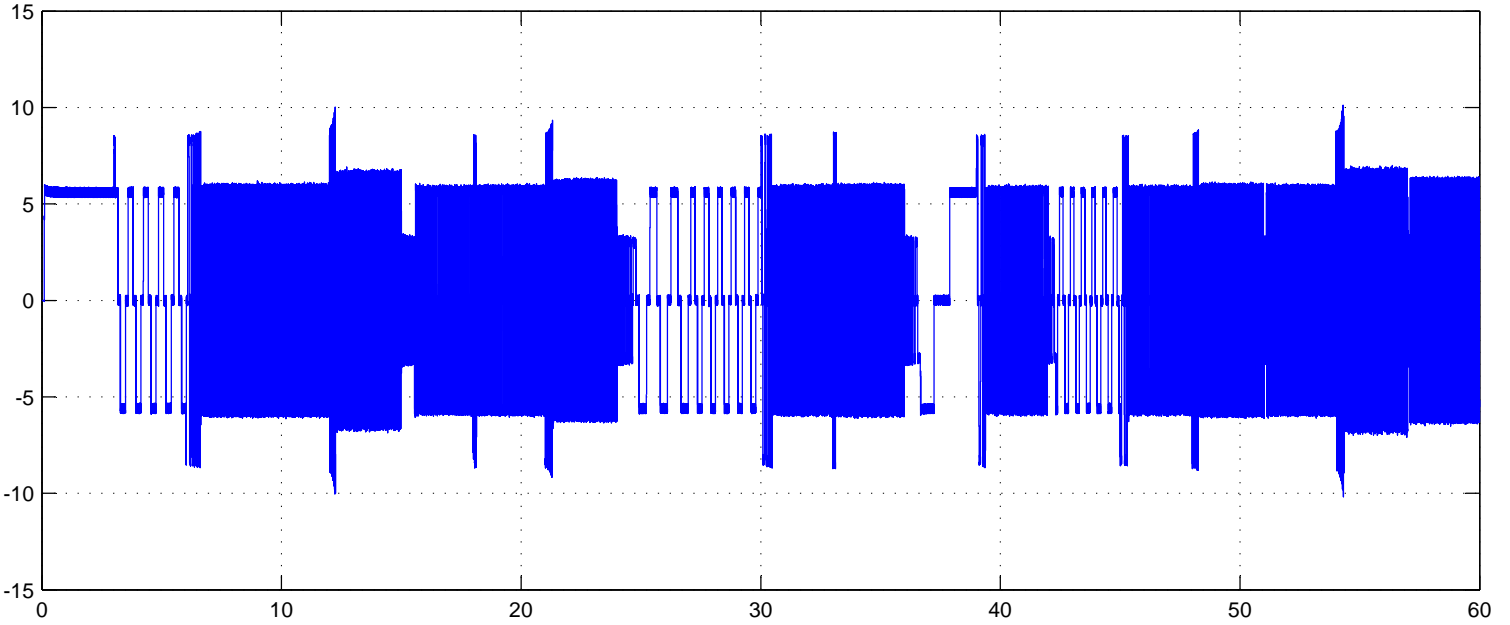
<Current (A)>



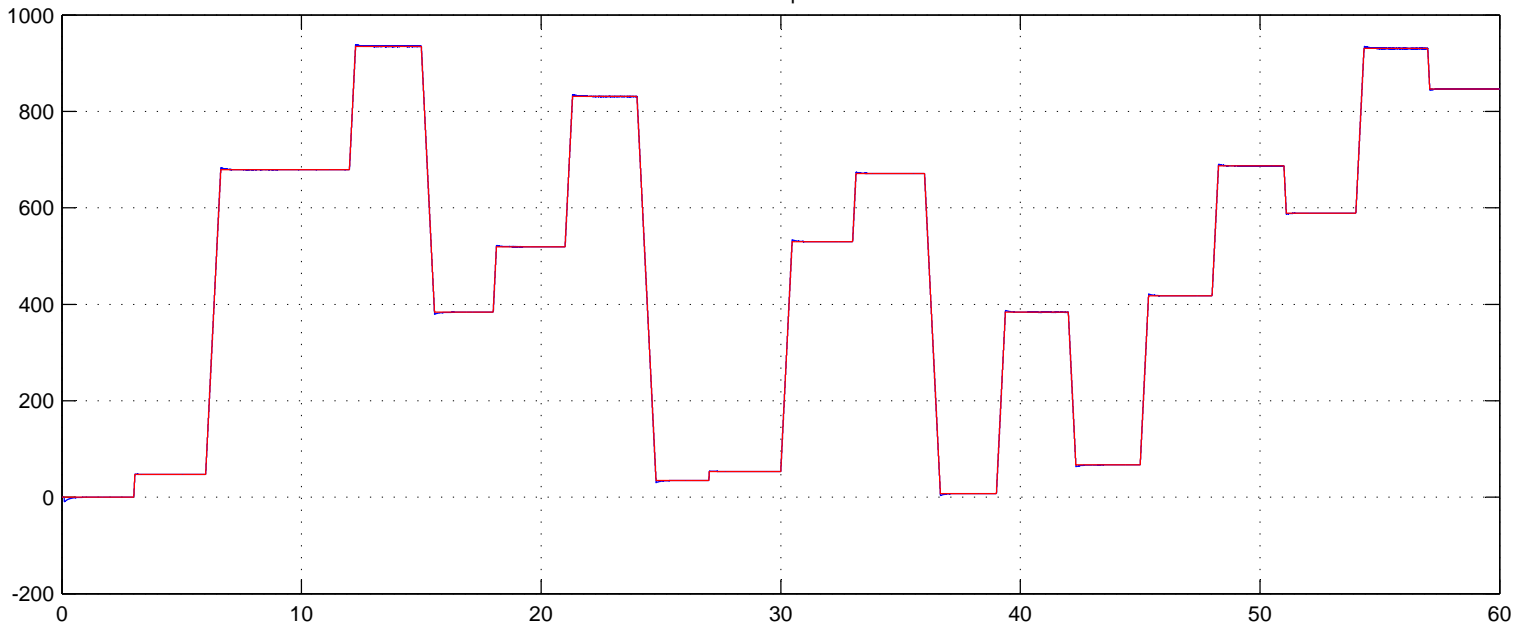
<Voltage (V)>



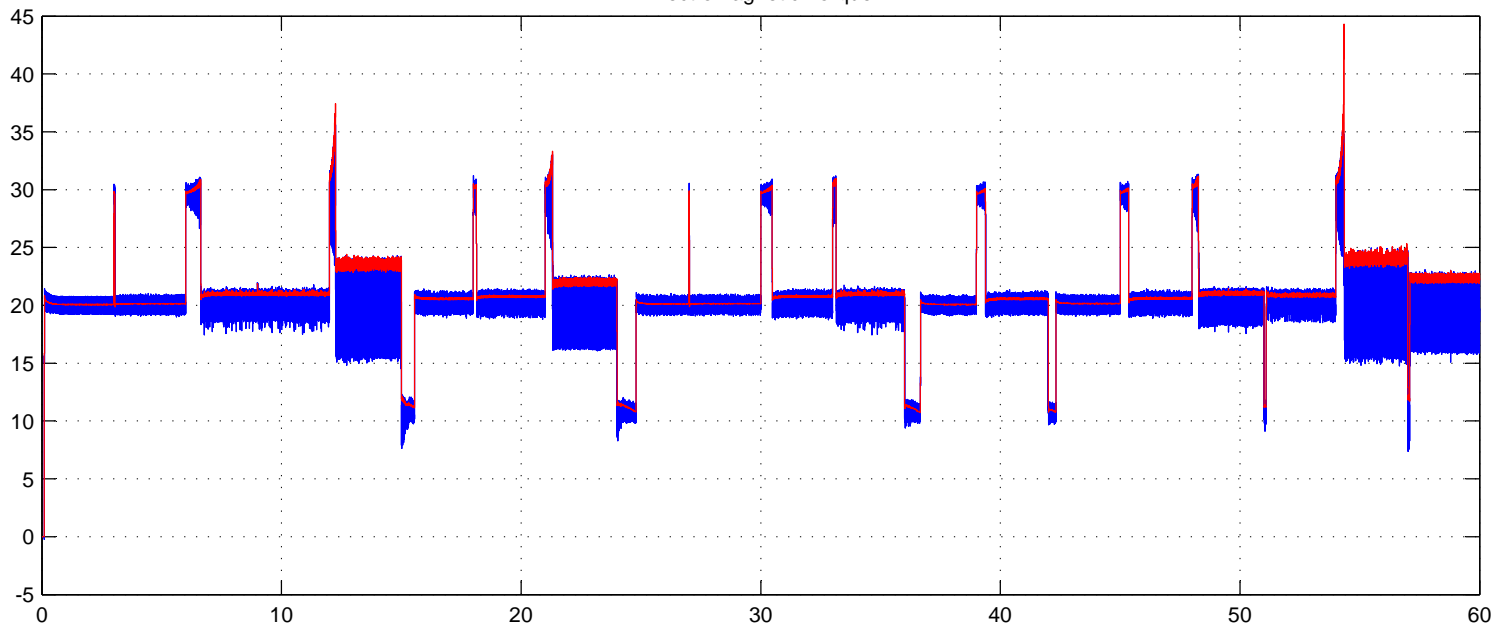
Stator current

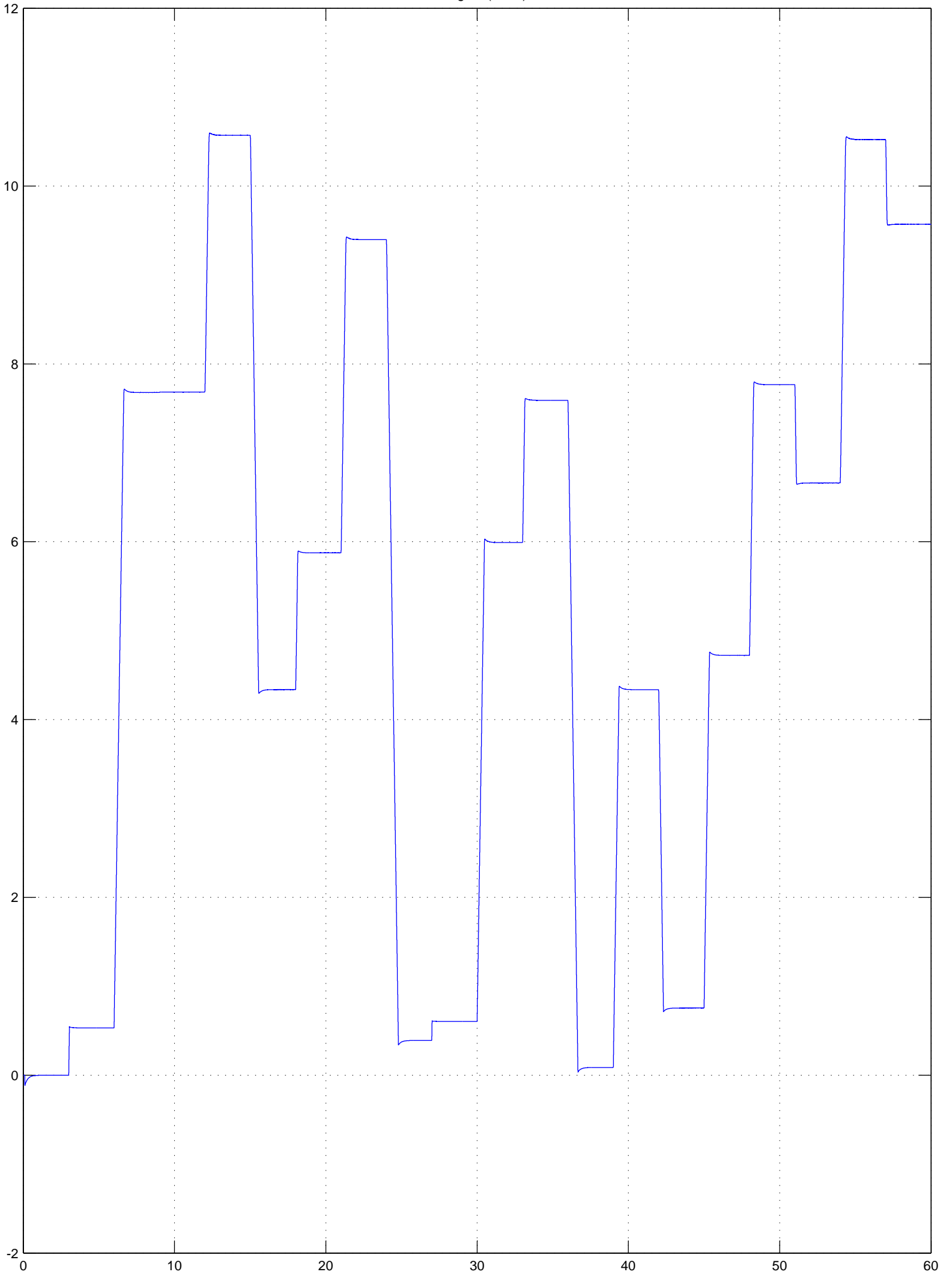


Rotor speed

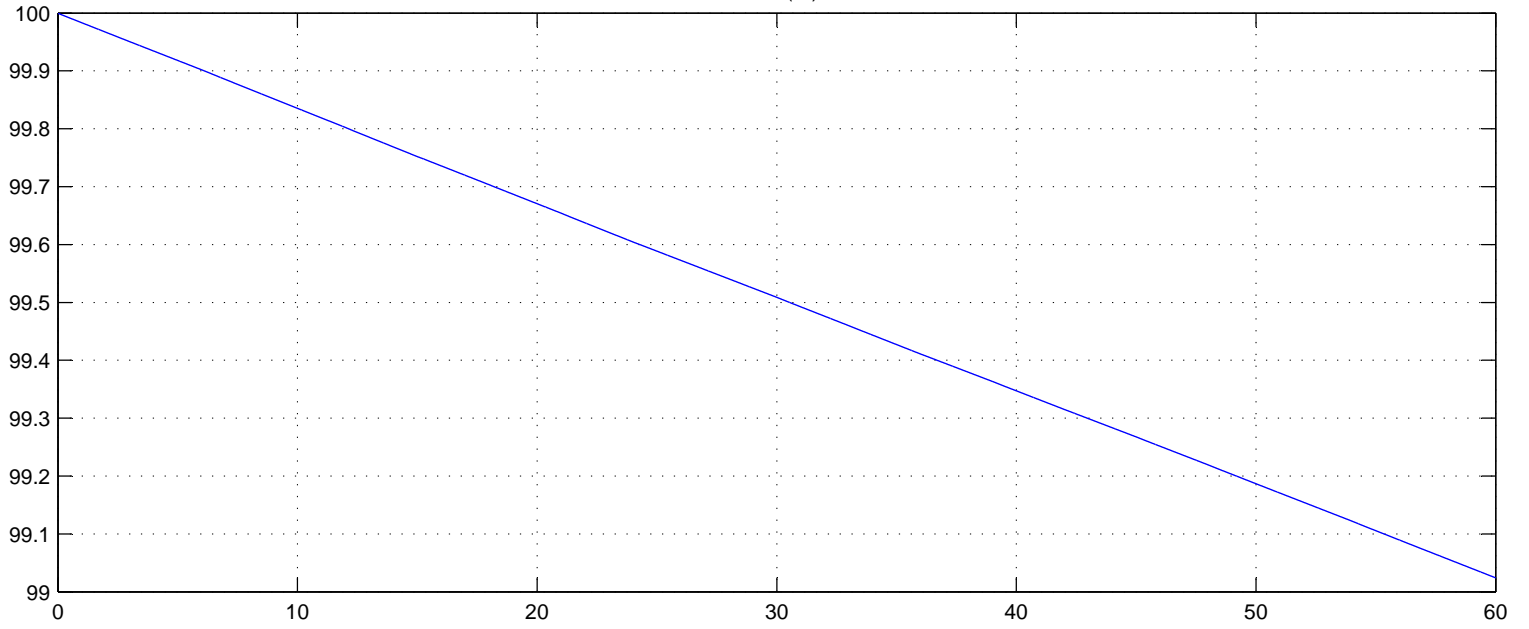


Electromagnetic Torque

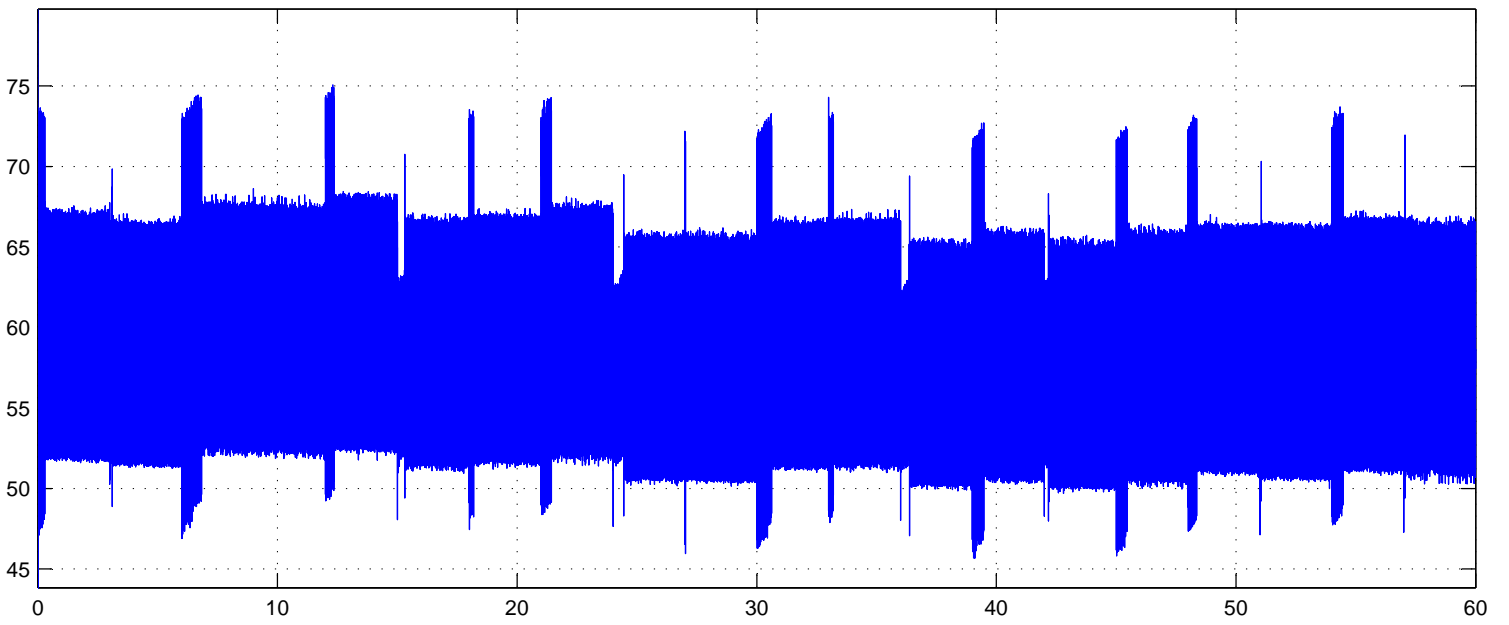




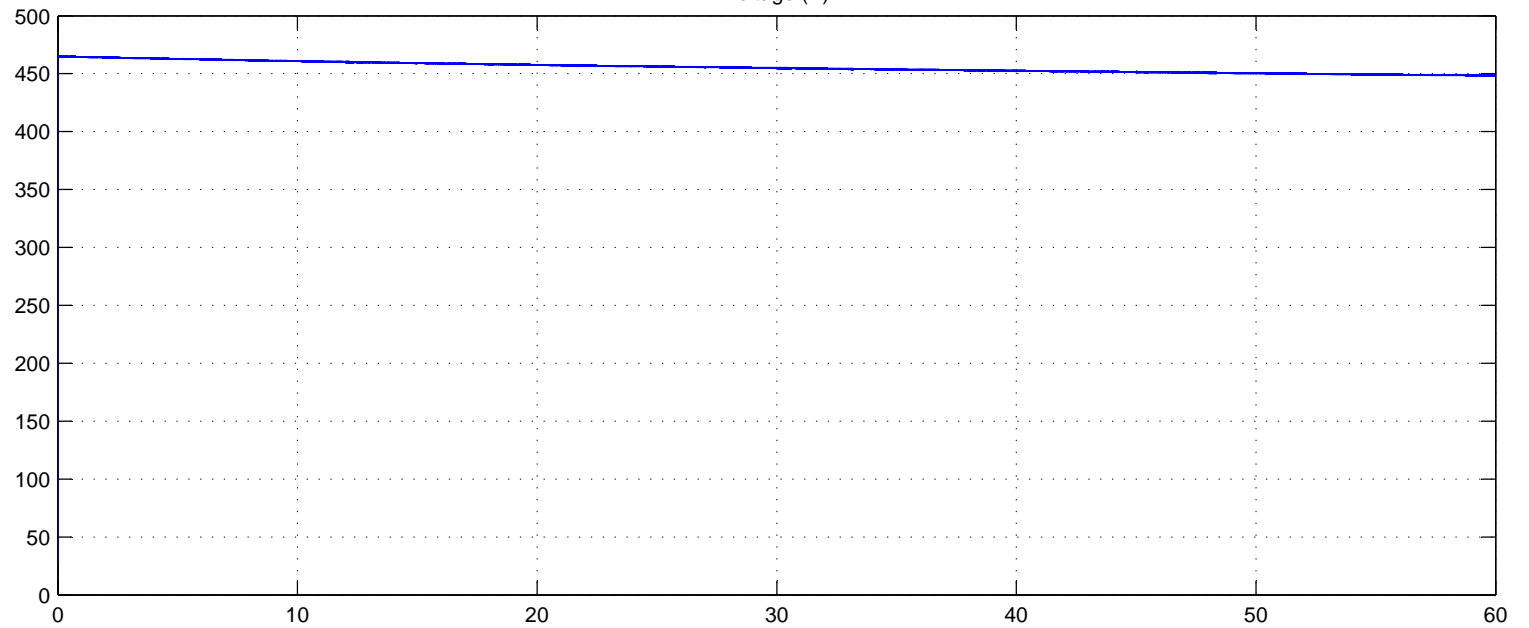
<SOC (%)>



<Current (A)>

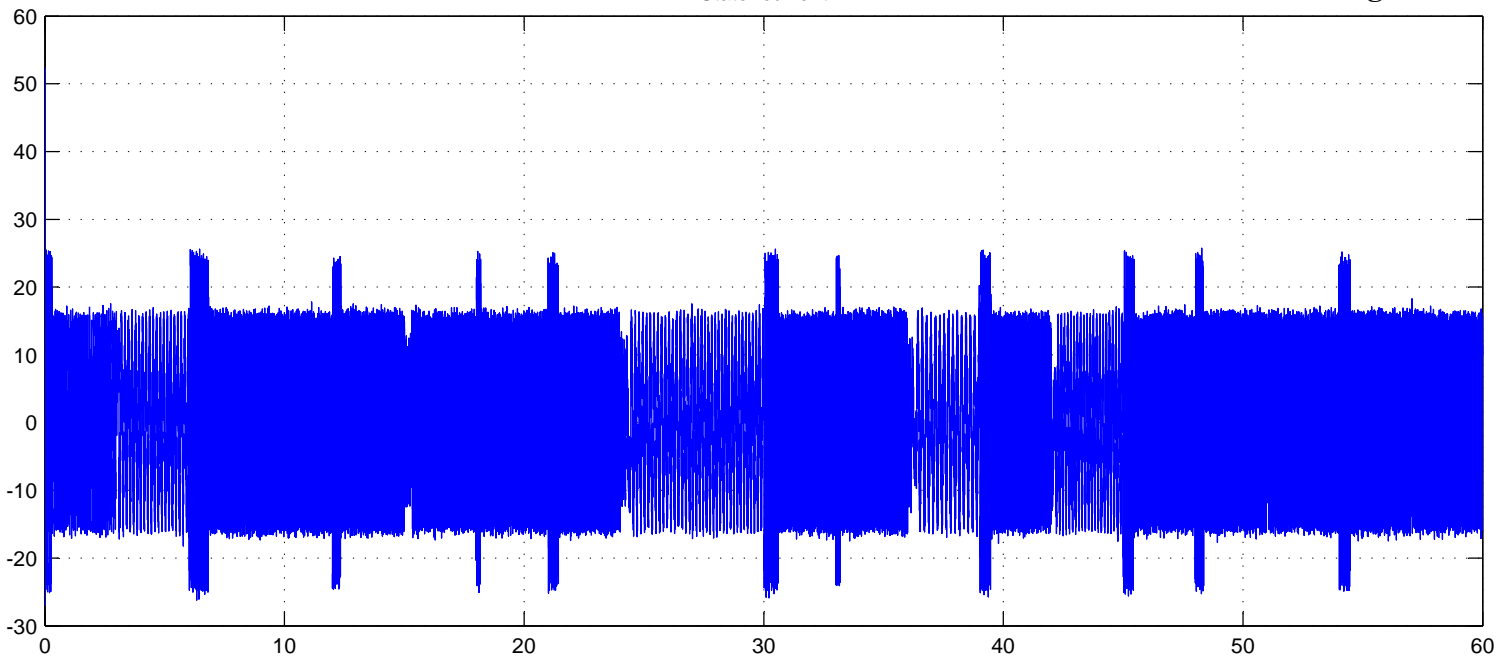


<Voltage (V)>

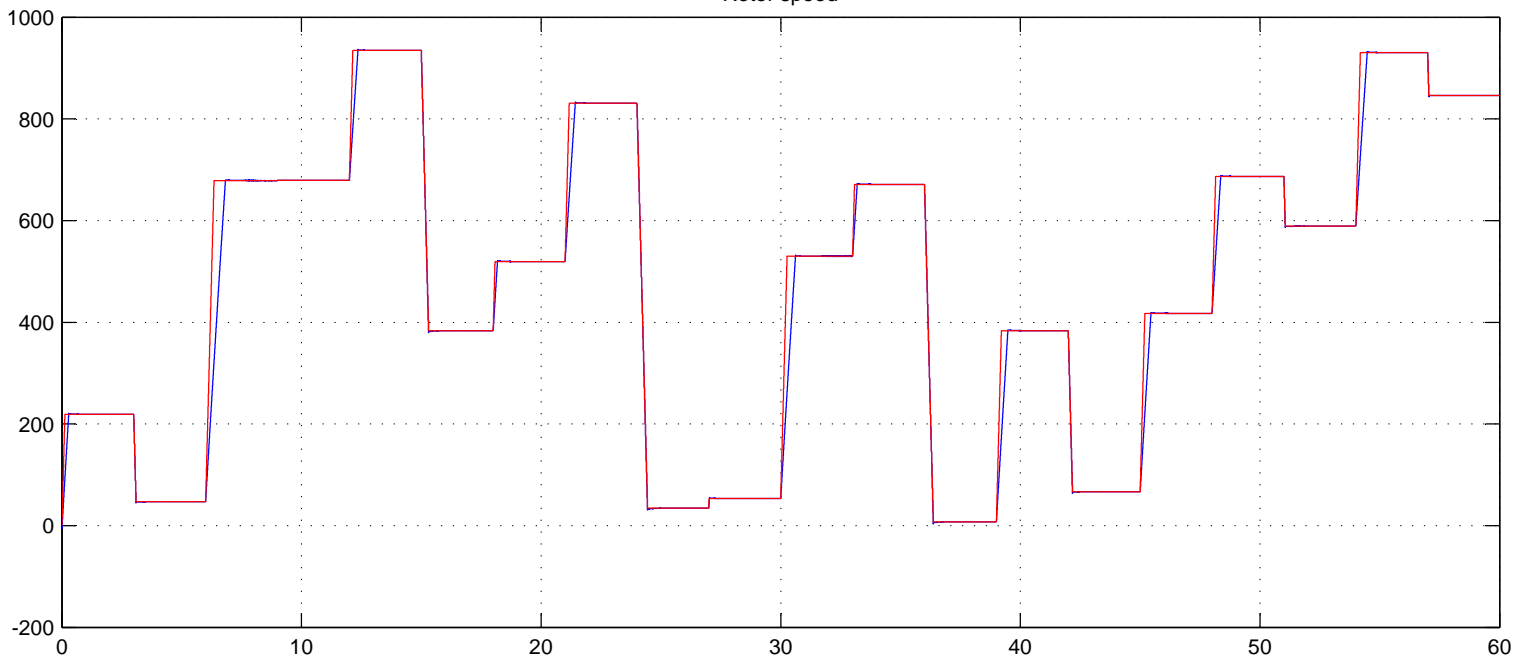




Stator current



Rotor speed



Electromagnetic Torque

